



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Raimo Vierimaa

Syrjältään liimatun sahatavarapalkin kestävyys



Julkaisu 1011 • Publication 1011

Raimo Vierimaa

Syrjältään liimatun sahatavarapalkin kestävyys

Tekniikan tohtorin arvon saavuttamiseksi tehty väitöskirja, joka julkaistavaksi hyväksyttynä esitetään julkisesti tarkastettavaksi Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustalon salissa RG202 tammikuun 13. päivänä 2012 kello 12.

ISBN 978-952-15-2695-4 (nid.)
ISBN 978-952-15-2740-1 (PDF)
ISSN 1459-2045

TIIVISTELMÄ

Vierimaa, Raimo: Syrjältään liimatun sahatavarapalkin kestävyys, Tampereen teknillinen yliopisto 2011.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää syrjältään liimatun sahatavarapalkin valmistamiseen liittyviä ongelmia. Työssä tutkittiin lamellien vuosirengaskuvion asettelun vaikutusta poikkileikkauksen muotovirheisiin, sormijatkosten vaikutusta taivutuskestävyyteen ja liimasaumojen kestävyyttä. Lisäksi tutkimuksessa selvitettiin 1-komponenttisen polyuretaaniliiman soveltuvuutta syrjältään liimatun sahatavarapalkin valmistuksessa ja euronormien käyttömahdollisuuksia liimatun sahatavarapalkin mitoittamisessa.

Syrjältään liimatun sahatavarapalkin valmistamiseen liittyviä ongelmia tutkittiin yhteensä 79 koekappaleen avulla. Tutkimustyö aloitettiin selvittämällä lamellien asettelun vaikutusta poikkileikkauksen suoruuteen. Tutkimuksen toisessa vaiheessa selvitettiin lamellisaumojen leikkauskestävyyttä ja ponttisauman tarpeellisuutta sekä valittiin liimasaumojen liimatyypit. Taivutuskokeiden tarkoituksena oli tutkia liimattujen 2- ja 3-lamellisten sahatavarapalkkien kestävyyttä. Vertailuarvoja 2-lamellisille palkeille haettiin taivuttamalla niiden kanssa samankorkuisia 1-lamellisia palkkeja täyspitkinä eli jännevälin mittaisina ja sormijatkettuina. Koejärjestelyillä pyrittiin saamaan selville lamellien ja sormijatkosten vaikutus palkin kestävyteen vertaamalla tuloksia sekä sahatavara- että liimapuupalkkien euronormien mukaisiin ominaisarvoihin. Jokaisen koekappaleen murtokuorma, murtoa vastaava taipuma sekä murtotapa ja -kohta kirjattiin. Koekappaleille laskettiin murtokuormaa vastaava taivutuskestävyys ja yleinen kimmomoduuli sekä määritettiin niiden tiheydet ja kosteusprosentit. Kaikkien koekappaleiden kuormitusohjelmat sekä voima-siirtymä-riippuvuudet tulostettiin graafisesti.

Tutkimustulokseksi saatiin, että poikkileikkauksen kiertyminen pieneni, kun lamellien sydänkuviot asetettiin vuorotellen vastakkaisiin suuntiin. Keskimmäiseksi tuleva lamelli käännettiin alkuperäisestä sahausasennosta pituusakselinsa ympäri vastakkaiseen suuntaan. Tällöin palkin päässä vuorotteli lamellin tyvi-, latva- ja tyvipää. Suorassa polyuretaaniliimasaumassa leikkausjännitysten ominaisarvo oli lähes kaksinkertainen euronormien antamiin sahatavaran ja liimapuupalkin ominaisleikkauslujuuksiin verrattuna. Leikkauskokeiden tuloksena ja tuotannolliset näkökannat huomioon ottaen päädyttiin käyttämään suoraa saumaa ja liimana 1-komponenttista polyuretaaniliimaa. Taivutuslujuudet olivat 1- ja 3-lamellisissa palkeissa riittäviä myös sormijatkettuina. Lujuusluokan C30 sahatavarasta valmistettujen 2-lamellisten palkkien taivutuslujuudet alittivat ominaislujuusvaatimukset. Kimmomoduulit ja tiheydet olivat riittäviä sekä sahatavarana että liimapuupalkkeina. Sormijatkettujen palkkien taipumat olivat murtohetkellä noin nelinkertaiset standardin hyväksymiin lopputaipumiin verrattuina. Pitkäaikaiskoeket osoittivat, että normaaliolosuhteissa virumaluku pysyi alle standardin hyväksymän rajan.

Tutkimustulosten mukaan lujuusluokitellusta sahatavarasta valmistetut syrjältään liimatut sahatavarapalkit täyttivät vastaavien euronormien vaatimukset ominaislujuuksien suhteen sekä sahatavarana että liimapuupalkkeina. Näin ollen euronormien SFS-EN 338 (2010) ja SFS-EN 1194 (1999) vastaavia mitoitusarvoja voidaan käyttää. Tämän tutkimuksen mukaan syrjältään liimatut sahatavarapalkit voidaan mitoittaa käyttämällä lujuusluokkien GL24h ja GL28c mukaisia ominaisarvoja. Poikkileikkaukset voidaan toteuttaa sormijatkettuina.

Ennen syrjältään liimatun sahatavarapalkin tuotannollisen toiminnan aloittamista on syytä varmistaa koestamalla sopiva puristusaine ja -aika sekä käytettävä liimamäärä.

Avainsanat: syrjältään liimattu sahatavarapalkki, poikkileikkauksen muotovirheet, 1-komponenttinen polyuretaaniliima, leikkauskestävyys, sormijatkokset, taivutuskestävyys.

ABSTRACT

Vierimaa, Raimo: Strength of Edge Glued Timber Beam, Tampere University of Technology 2011.

The objective of this research was to solve problems in the production of edge glued timber beams. The effect of the arrangement of the lamella growth ring patterns on cross-sectional deformations, that of finger joints on bending strength, and the strength of the glued joints were studied. In addition, the applicability of one-component polyurethane adhesive to the manufacture of edge glued timber beams as well as the possibilities of applying the European Standards to the design of edge glued timber beams were studied.

A total of 79 test pieces were used to study problems hampering the production of edge glued timber beams. The study was begun by determining the effect of the lamella arrangement on the flatness of the cross-section. In the second stage, the shear strength of the joints between the lamellae was studied, the need for a tongue-and-groove joint was investigated, and the adhesive type for the glued joints was selected. The purpose of the bending tests was to study the strength of glued two- or three-lamella timber beams. Reference values for the two-lamella beam were sought by bending one-lamella beams which were of equal height with the two-lamella ones, of full i.e. span length, and finger-jointed. The experimental arrangement aimed to determine the effect of lamellae and finger joints on strength by comparing the results with specific values as given in the Eurocodes for both sawn timber and glulam beams. The failure load, ultimate deflection, and manner and point of failure were recorded for each test piece. A bending strength corresponding to the failure load and a sustained modulus of elasticity were calculated for the test pieces, and the density and percentage of moisture of the pieces were determined. The load programs and force-deflection dependences of all test pieces were printed out in the form of graphs.

As a result it emerged that cross-sectional twist was reduced with alternately reversed lamella kern areas. The middle lamella was reversed from its original sawing position by turning it into the opposite direction around its longitudinal axis. Thus, an alternating arrangement of top, butt, and top ends at the end of the beam was obtained. In a flat polyurethane glue joint, the specific value of shear stresses was nearly double the specific resistance to shear for sawn timber and glulam beams as given in the Eurocodes. As a result of the shear tests and with regard to production aspects, a flat joint and one-component polyurethane adhesive were settled on. The bending strengths of one- and three-lamella beams were sufficient even with finger jointing. The bending strength of two-lamella beams of stress grade C30 timber, however, did not meet the requirements for characteristic strength. The modulus of elasticity and density values were sufficient in the case of both sawn timber and glulam beams. The deflection of finger-jointed beams at rupture was approximately four times the final deflection allowed by the standard. Long-term experiments showed that under normal conditions, the creep value remained below the limit set by the standard.

Based on this research, edge glued beams of stress graded timber met the criteria of the corresponding Eurocodes for the specific strength of both sawn timber and glulam. Thus, the corresponding design values of Eurocodes SFS-EN 338 and SFS-EN 1194 (1999) may be used. In the dimensioning of cross-sections, glulam stress grades GL24h and GL28c are applicable. Cross-sections may be implemented with finger joints.

Prior to commencing production of edge glued timber beams, it is advisable to conduct tests to determine the suitable compression load and duration as well as the amount of adhesive applied.

Keywords: edge glued timber beam, deformed cross-sections, one-component polyurethane adhesive, shear strength, finger joints, bending strength

ESIPUHE

Vuonna 1993 aloitti yhdeksän turkulaista diplomi-insinööriä jatko-opiskelun Tampereen teknillisessä korkeakoulussa. Jatko-opiskeluun sisältyvät teoriaopinnot suoritettiin seminaarimuotoisina. Seminaarien vetäjinä toimivat talonrakennustekniikan professori Jouko Pynnönen ja rakentamistalouden professori Raimo Salokangas. Saman vuoden syksyllä Turun teknillinen oppilaitos muuttui Turun ammattikorkeakouluksi, ja yliopettajan virkoihin tuli kelpoisuusvaatimukseksi tekniikan lisensiaatin tutkinto. Seminaariin osallistujista Matti Lahti, Pertti Saarinen ja tämän tutkimuksen tekijä olivat uuden ammattikorkeakoulun opettajia. He huomasivat ennakoineensa tilanteen hyvin.

Kaikki kolme opettajaa valitsivat tutkimustyönsä puurakentamisen alalta. Ensimmäinen lisensiaatin tutkinto suoritettiin vuonna 1998 ja neljä vähän myöhemmin.

Turun ammattikorkeakoulun rakennustekniikan koulutusohjelman rakennesuunnittelu-painotteisessa suuntautumisvaihtoehdossa opiskelijat ovat lopputyönään tehneet pientalojen rakennesuunnittelua, ja töihin on pyritty lisäämään pieniä kehitystehtäviä. 2000-luvun alkupuolella koulutusohjelma huomasi kehittäneensä uuden puurunkojärjestelmän. Järjestelmään liittyi oleellisena osana syrjältään liimattu sahatavarapalkki, jota voitaisiin käyttää rakennuksissa sekä pysty- että vaakarakenteena. Pilareina käytettyinä sahatavarapalkit antaisivat rakennuksille ylimääräistä jäykkyyttä. Vaakarakenteina käytettyinä ne olisivat ratkaisu kasvavien lämmöneristävyys- ja värähtelyvaatimusten mukanaan tuomiin rakenteiden poikkileikkauslisäyksiin.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää syrjältään liimatun sahatavarapalkin kestävyyttä ja tarkastella palkin tuotteistamiseen liittyviä ongelmia. Palkin tulee asuinrakentamisessa soveltua kantaviin rakenteisiin sekä pysty- että vaakasuunnassa keskipitkillä jänneväleillä. Ristikko- ja liimapuuvaikeuksien haastattelujen tuloksena palkkimateriaaliksi valittiin kuusi, joka osoittautuikin taivutuskokeissa sitkeäksi materiaaliksi.

Kiitän vastaväittäjäni TKT Ari Ahosta ja emeritusprofessori Mikko Kilpeläistä heidän tekemistään väitöskirjaani koskevista huomautuksista ja arvioinneista. Kiitän myös emeritusprofessori Mikko Kilpeläistä ja professori Karl Öigeriä väitöskirjan käsikirjoituksen esitarkastusvaiheessa tekemistään huomautuksista ja antamastaan ohjauksesta työni kehittämiseksi. Samoin professori Matti Kairin kommentit olivat tervetulleita. Professori Ralf Lindbergiä kiitän tämän tutkimuksen määrätietoisesta ohjaamisesta ja kustoksena toimimisesta. Hänen kokemuksensa on antanut varmuutta ja uskoa tehtävän onnistumisesta.

Kiitokset ansaitsee myös työnantajani Turun ammattikorkeakoulu, jonka johto uskoi, että rakenteiden tutkiminen ja samalla koulutusohjelman kehittäminen vaatii sijoittamista laitteeseen, jolla tämäkin tutkimus voitiin suorittaa. Varsinais-Suomen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus tuki jo alkuvaiheessa uuden puurunkojärjestelmän kehittämistä. Alusta lähtien kehitystyössä on mukana ollut myös Yläpuu Oy, jonka tuki yhdessä ammattikorkeakoulun kanssa mahdollisti laboratoriohenkilökunnan ja opiskelija-assistenttien käytön tutkimuksen tekemisessä. Kiitokset ansaitsee myös työhön omilla panoksillaan osallistuneet ammattikorkeakoulun henkilökunta ja opiskelijat. Erityiset kiitokset ansaitsevat opettajakollegani Laura Nurminen ja Sari Loppela-Rauha, jotka huolehtivat kielten ymmärrettävyydestä. Tukea saatiin myös Tekesin TULI-ohjelmasta.

Kiitän myös vaimoani Ulla-Maijaa tuesta ja joustavasta suhtautumisesta lomasuunnitelmiin viime vuosina.

Haluan muistaa myös edesmennyt Yläpuu Oy:n toimitusjohtaja Ari Palojokea, jonka panos koekappaleiden valmistamisessa ja koerakentamisessa oli oleellinen. Työ jäi kesken.

SISÄLTÖ

Tiivistelmä	3
Abstract	4
Esipuhe	5
Lyhenteet	8
1 Johdanto	9
1.1 Tutkimuksen tausta	9
1.2 Tutkimuksen tavoite	10
1.3. Tutkimushypoteesit	11
1.4 Tutkimuksen rajaus	12
1.5 Tutkimuksen rakenne	12
2 Puupohjaiset palkkituotteet	14
2.1 Liimapuu	14
2.2 Viilupuu ja I-palkki	14
2.3 Liimatut sahatavarapalkit	15
3 Liimatulle palkille asetetut vaatimukset	17
3.1 Liiman vaatimukset	17
3.2 Muotovaatimukset	18
3.3 Lujuusvaatimukset	21
3.4 Taipuma	21
3.5 Tuotettavuus	22
3.5.1 Tuotanto-olosuhteet	22
3.5.2 Tilojen varustelu	22
3.5.3 Puutavara	23
3.5.4 Tuotanto	24
4 Kuormituskokeet	25
4.1 Syrjältään liimatun sahatavaran muodonmuutokset ja muotovirheet	25
4.1.1 Tarkoitus	25
4.1.2 Koekappaleet, dimensiot ja laatu	25
4.1.3 Koekappaleiden valmistus	26
4.1.4 Koejärjestelyt ja mittaukset	27
4.1.5 Tulokset	29
4.1.6 Päätelmät	30
4.2 Leikkauskokeet	31
4.2.1 Tarkoitus	31
4.2.2 Koekappaleet, dimensiot ja laatu	32
4.2.3 Koekappaleiden valmistus ja liimaus	33
4.2.4 Koejärjestelyt ja mittaukset	33

4.2.5 Tulokset	35
4.2.6 Päätelmät	37
4.3 Taivutuskokeet	38
4.3.1 Tarkoitus	38
4.3.2 Koekappaleet, dimensiot ja laatu	38
4.2.3 Koekappaleiden valmistus ja liimaus	40
4.2.4 Koejärjestelyt	40
4.2.5 Yhteenveto taivutuskokeitten tuloksista	43
4.2.6 Päätelmät	47
4.4 Pitkäaikaiskokeet taivutukselle	51
5 Tutkimushypoteesien tarkastelu	55
6 Tutkimuksen arviointi	61
6.1 Tutkimuksen luotettavuus	61
6.2 Tutkimuksen uutuusarvo	62
7 Johtopäätökset	64
7.1 Tutkimuksen merkitys ja sovellettavuus	64
7.2 Jatkotutkimukset	64
Lähteet	66
Liitteet	70
Liite 1. Leikkauskokeiden tulokset ja puristusvoima–siirtymä-riippuvuudet	7 s.
Liite 2. Taivutuskokeiden tulokset ja puristusvoima–siirtymä-riippuvuudet	32 s.
Liite 3. Muodonmuutoskoekappaleiden muotovirheet graafisesti	4 s.
Liite 4. Taivutuskokeiden tulokset yksittäisille koekappaleille	3 s.
Liite 5. Taivutuskokeet, palkkien poikkileikkausmitat, tiheydet sekä kosteusprosentit	3 s.
Liite 6. Pitkäaikaiskokeet palkille, mitatut taipumat ja olosuhteet	5 s.
Liite 7. Kuormituksen kestosta riippuva suhde w_t/w_{inst}	2 s.

Lyhenteet

A_{sauma}	liimasaumojen pinta-ala yhteensä
$E_{0,g,\text{mean}}$	yleisen kimmomoduulin keskiarvo
$f_{c,0,g,k}$	puristuslujuuden ominaisarvo syiden suuntaan
f_m	taivutuslujuus
$f_{m,k}$	taivutuslujuuden ominaisarvo
F_{max}	murtokuorma
$F_{\text{max,est}}$	arvioitu murtokuorma
$f_{c,0,g,k}$	puristuslujuuden ominaisarvo syiden suuntaan
$f_{v,k}$	leikkauslujuuden ominaisarvo
G_1	palkin oma paino
G_2	välipohjan painosta palkille tuleva lisäkuorma
$G_{g,\text{mean}}$	liukumoduulin keskiarvo
GL28c	liimapuun lujuusluokka eri lujuusluokan lamelleista kootulle liimapuulle
GL28h	liimapuun lujuusluokka saman lujuusluokan lamelleista kootulle liimapuulle
k_s	koekappaleiden lukumäärän huomioon ottava kerroin
m_i	materiaalin lujuuden tai kestävyiden testiarvo
m_k	materiaalin lujuuden tai kestävyiden ominaisarvo
Q	hyötykuormasta palkille tuleva lisäkuorma
S_y	standardihajonta
W_{creep}	viruman aiheuttama taipuma
W_{inst}	hetkellinen taipuma
$W_{\text{net,fin}}$	lopputaipuma, joka sisältää viruman
$\rho_{g,k}$	ominaistiheys
ρ_{mean}	tiheyden keskiarvo
σ_c	syysuuntainen puristusjännitys
τ	liimasauman leikkausjännitys murtohetkellä
ω	koekappaleen kosteusprosentti
\bar{y}	satunnaissuureen $\ln m$ keskiarvo

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Vuonna 1998 tutkin lisensiaatin työssäni kotelopalkin kantavuutta. Kattoelementtien rivat olivat 200 mm korkeita kertopuupalkkeja, joihin naulattiin ala- ja yläpuolelle vanerilevyt. Kattoelementtiä oli tarkoitus käyttää jyrkkäkattoisissa kerrostaloissa Saksassa, jossa rakennusoikeuden tehokas käyttö vaati yläpohjarakenteeksi mahdollisimman matalaa kotelorakennetta. Kasvavat lämmöneristävyys- ja värähtelyvaatimukset ovat Suomessa johtaneet noin 300 mm korkean poikkileikkauksen käyttöön asuintaloissa.

Jari Helmisaari testautti vuonna 1994 Tampereen teknillisessä korkeakoulussa 4 kappaletta syrjältään liimattuja 3-lamellisia sahatavarapalkkeja. Puumateriaalina oli mänty. Testaus ei kuitenkaan johtanut palkkituotantoon.

Turun ammattikorkeakouluun siirryttyään Jari Helmisaari jatkoi syrjältään liimatun sahatavarapalkin kehittelyä. Ensimmäinen opiskelijavoimin suunniteltu puurunkoinen kohde, jossa käytettiin liimaamalla koottuja puupilareita, oli Yläneen pappila vuonna 2004. Pilarit toteutettiin liimaamalla kaksi lamellia yhteen. Näin saatiin seinälle 200 mm rakennepaksuutta ja samalla näyttävä pystyrunko pappilalle. Pilarien sisälamellit ulotuivat välipohjan tasolle ja muodostivat tuet välipohjapalkeille. Pilarit asennettiin säännöllisin 600 mm:n välein aluspuihin lovetuihin koloihin. Nurkkadetaljit suunniteltiin niin, että sisäverhouslevytyksen materiaalihukka jäi minimiin. Näin syntyi Timperi-puurunkojärjestelmä. Seuraavana vuonna Turun ammattikorkeakoulu osallistui kahdella opiskelijavoimin suunnitellulla omakotitalolla Airiston loma-asuntomessuille. Molempiin rakennuksiin sovellettiin uutta puurunkojärjestelmää pystyrungon osalta. Pientalojen runkorakenteisiin pilariratkaisua on käytetty vuosittain muutamaan kohteeseen ja samalla on kehitetty puurunkojärjestelmää. Rakennusten suunnittelun ovat tehneet opiskelijat opinnäyte- tai projektitöinä. Pientalojen rakennus- ja rakennesuunnittelun toteuttamiseksi koulutusohjelmaan syntyi vuonna 2008 Timperi-suunnittelutoimisto, jossa opiskelija-assistentit suunnittelevat kohteita Helmisaaren ohjaamina myös kesäisin.

Patentti- ja rekisterihallitus myönsi pilarille hyödyllisyysmallisuojan 2.2.2004. Kasvaneet lämmöneristysvaatimukset ovat sopineet hyvin syrjältään liimatulle sahatavarapalkille. Vertex Oy:n johtamana räätälöitiin yrityksen 3D-mallinnusohjelmaa uudelle puurunkojärjestelmälle sopivaksi. Puurungon rakenneosista voidaan toimittaa sähköiset tuotantokuvat suoraan elementtitehtaalle. Viime vuosina Kymdata Oy:n CADS Planner House -ohjelmisto on helppokäyttöisenä kasvattanut suosiotaan opiskelijoiden keskuudessa.

Varsinais-Suomen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus tuki jo alkuvaiheessa uuden puurunkojärjestelmän kehittämistä. Alusta lähtien kehitystyössä on mukana ollut myös Yläpuu Oy Yläneeltä, joka on liimannut lamelleja pilareiksi ja urakoinut suunnitellut kohteet. Yläpuu Oy:n toinen päätuote on ollut hirsitalojen valmistus ja pystytys. Hirsien valmistamisessa yritys on käyttänyt polyuretaaniliimaa, minkä vuoksi oli luontevaa tutkia sen käyttömahdollisuuksia syrjältään liimatuissa lamellipalkeissakin. Leikkauskokeisiin valittiin toiseksi liimaksi melamiiniureaformaldehydiliima (MUF), jota liimapuuvalmistajat yleisesti käyttävät.

Tuloaan tekevät euronormit osoittivat samaan aikaan, että kantavien vaakarakenteiden toteuttamiseksi eivät enää sahatavarasta saatavat lankut riitä. Ylä- ja alapohjien kasvavat lämmöneristys- ja välipohjien värähtelyvaatimukset vaatisivat noin 300 mm:n korkeutta kantavalta vaakarakenteelta. Yleisesti käytettyjen halkaistun liimapuupalkin ja kertosuupalkin rinnalle lähdettiin etsimään kilpailukykyistä vaihtoehtoa. Syrjältään liimatut sahatavarapalkit olisivat tutkimisen arvoinen vaihtoehto.

Ammattikorkeakoulun johto hyväksyi investoinnin laitteeseen, jolla taivutus- ja puristuskestävyksiä voitaisiin testata. Laitteen hankinta oli pitkä prosessi uusine kunnallisine hankintalakeineen. Laitteen suunnittelussa oli otettava huomioon 1950-luvulla rakennetun tilan rajoitukset. Perustamisolosuhteet johtivat siihen, että laitteen runkona toimivat järeät teräspalkit ulokkeina. Tilan koko rajoitti koestettavan kappaleen maksimipituudeksi 6 m, ja leveyttä koekappaleella voi olla 1,2 m. Sekä taivutus- että puristus-sylinterin kapasiteetti on 450 kN. Koko laitteisto ohjausjärjestelmineen oli asennettu, kalibroitu ja toimintavalmis vuoden 2009 syksyllä.

Jatkona pilarin kehitystyölle haettiin patenttia syrjältään liimatulle sahatavarapalkille. Patenttihakuumennessä ei ollut tehty ainoatakaan testiä. Liimattuja sahatavarapalkkituotteita valmistetaan ainakin Ruotsissa, Tanskassa, Saksassa ja Australiassa. Toistaiseksi patenttihakemusta ei ole kumottu.

Syrjältään liimattu sahatavarapalkki on edelleen tuntematon Suomessa, joten palkin tutkiminen, valmistuksen aloittaminen ja tunnetuksi tekeminen vaikuttanevat edullisesti puurungon rakentamisen kustannuksiin. Tuotannossa olevista ratkaisuista ei ole tehty tutkimuksia.

1.2 Tutkimuksen tavoite

Rakennusten keskipitkät jännevälit ja välipohjarakenteiden värähtelyvaatimukset vaativat poikkileikkaukselta korkeutta, joka ylittää sahatavaran ilmoittaman suurimman sahatavaran poikkileikkaukseen. Sen vuoksi valitaan yleensä kertopuu-, liimapuu- tai I-palkki, joilla on riittävä kantavuus.

Liimaamalla syrjältään toisiinsa kaksi tai kolme höylättyä soiroa päästään poikkileikkauskokoon, joka kattaa asuinrakennusten puurunkomateriaalin poikkileikkaustarpeet normaali kuormitukselle.

Sahatavaran maksimipituus on 5,5 m. Mikäli käytetään syrjältään liimaamalla toteutuksessa palkissa sormijatkettua puutavaraa, päästään tarvittaessa tätä pitempiin jänneväleihin ja palkkipituuksiin. Sormijatkoksilla saadaan aikaan lisäksi materiaalisäästöä. Sormijatkamisen yhteydessä voidaan poistaa suurimmat syrjä- ja läpimenevät oksat sekä muut viat.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää syrjältään liimatun sahatavarpalkin valmistamiseen liittyviä ongelmia. Työssä tutkitaan lamellien vuosirengaskuvion asettelun vaikutusta poikkileikkauksen muodonmuutoksiin ja 1-komponenttisen polyuretaaniliiman käyttömahdollisuuksia. Tutkimuksessa selvitetään liimasaumojen leikkaus- ja pitkäaikaiskestävyyttä, poikkileikkauksen taivutuskestävyyttä sekä sormijatkosten vaikutusta taivutuskestävyyteen. Työssä arvioidaan myös euronormien soveltuvuutta liimatun sahatavarpalkin mitoittamisessa.

1.3 Tutkimushypoteesit

Palkin muotovirheet saadaan hallintaan lamellien oikealla asettelulla

Muotovirheet pysyvät kohtuullisina, kun kuivatut ja sormijatkettut lamellit asetellaan palkkiin vuosirenkaat vuorotellen vastakkaisiin suuntiin. Lamellit liimataan toisiinsa, puristetaan kahteen suuntaan, ja palkki höylätään liimauksen jälkeen.

1-komponenttinen polyuretaaniliima sopii lamellien liimaamiseen

1-komponenttinen polyuretaaniliima Kestopur 1030 täyttää liimattavilta lamellisaumoilta vaadittavat ominaisuudet lujuuden, lämpötilan keston, kosteuden keston ja pitkäaikaiskestävyyden suhteen.

Sormijatkaminen on mahdollista syrjältään liimatuissa sahatavarpalkeissa

Sahatavaran maksimipituus on 5,5 m. Mikäli käytetään syrjältään liimaamalla toteutuksessa palkissa sormijatkettua puutavaraa, palkkien pituus riippuu puristuslaitteiston pituudesta. Sormijatkoksilla saadaan lisäksi aikaan materiaalisäästöä. Sormijatkamisen yhteydessä voidaan myös poistaa suurimmat syrjäoksat sekä muut viat. Sormijatkokset tekevät palkista hauraan murron suhteen, mutta kestävyys täyttävät euronormien vaatimukset.

Syrjältään liimattujen sahatavarpalkkien mitoitus voidaan tehdä soveltamalla mitoittamiseen euronormeja

Kansallisten normien puuttumisen vuoksi liimatun sahatavarpalkin mahdollisuudet ovat jääneet käyttämättä. Euronormien mukaan lamellit voidaan kääntää syrjälleen. Lamellit liimataan tällöin lappeeltaan toisiinsa kiinni. Tämä ratkaisu on liimapuupalkkimäärittelyn mukainen. Euronormeissa ei kuitenkaan kuvata yhden pystylamellin käyttömahdollisuutta eikä syrjältään liimaamista. Liimapuupalkeille tarkoitetut EN-

standardit sopivat myös syrjältään liimatulle sahatavarapalkille, jossa palkin uuma muodostuu yhdestä pystyasennossa olevasta lamellista.

1.4 Tutkimuksen rajaus

Vuosirengaskuvion asettelun vaikutusta poikkileikkauksen muodonmuutoksiin tarkasteltiin 3-lamellisten palkkien avulla. Muotovirheet mitattiin lamellien liimauksen jälkeen.

Koska käytetty polyuretaaniliima täyttää standardin SFS-EN 301 mukaiset vaatimukset standardissa SFS-EN 302 esitetyille testimenetelmille, niitä ei toistettu. Valittu leikkaus-testimenetelmä ei ole standardin mukainen, mutta sillä haluttiin selvittää leikkausliitoksen vähimmäiskestävyys ja pontin käytön tarpeellisuus. Tuotteen kelvollisuus on osoitettava CE-merkinnällä. Tämä vaatimus tulee pakolliseksi vuonna 2013. Tässä tutkimuksessa käytetyllä liimalla ei ole standardin SFS-EN 14080 mukaista hyväksyntää, mikä on CE-merkinnän edellytys. CE-merkintä edellyttää yrityksen toiminnan perustuvan sertifioituun laatujärjestelmään. Standardin vaatimat kokeet on suoritettava ennen tuotannon aloittamista tai tuotannossa on käytettävä niitä saksalaisia liimoja, joilla on vaadittu hyväksyntä (NTI 2010).

Leikkauskokeissa tutkittiin kahta saumaratkaisua ja kahta liimaa. 1-komponenttisen polyuretaaniliiman leikkauskestävyyttä verrattiin yleisesti liimapuupalkin valmistamisessa käytettävän 2-komponenttisen melamiiniureaformaldehydiliiman leikkauskestävyyteen. Liiman leikkauskestävyys on vähintään puun kestävyuden suuruinen.

Taivuttamalla koestettavien palkkien poikkileikkauksiksi valittiin 1- ja 2-lamelliset palkit 195 mm x 45 mm ja 3-lamelliset 285 mm x 45 mm. Puumateriaalina käytettiin kuusta (*Picea Abies*), joka on myös liimapuupalkeissa ja ristikkorakenteissa yleisesti käytetty materiaali. Muiden kuin lujuteen liittyvien liiman ominaisuuksien tutkiminen on jätetty liimanvalmistajille.

Leikkauskoekappaleiden kuormitusohjelmasta (SFS-EN 380:en) jätettiin alkuvaiheen kuormitusvaihteluosa pois. Tarkkuussahatut koekappaleet seisoivat vapaasti alustallaan. Puristuslaitteen pallonivelöity 2 kN painava teräspalkki asetettiin koekappaleen päälle, ja puristus toteutettiin liitteen 1 ohjelman mukaisesti.

Tutkimuksen tuloksena saatuja arvoja on verrattu suoraan taulukossa 3.2 esitettyihin sahatavaran ja liimapuun ominaisarvoihin. Tässä työssä käytetään *eurokoodeista* sanaa *euronormi*.

1.5 Tutkimuksen rakenne

Syrjältään liimatun sahatavarapalkin tutkiminen aloitettiin poikkileikkauksen muodonmuutos- ja muotovirhemittauksilla, joilla selvitettiin lamellien asettelun ja koon vaihtelun sekä saumatyyppin vaikutuksia palkkien suoruteen.

Leikkauskokeilla tutkittiin liimaliitoksen leikkauskestävyyttä. Taivutuksessa palkkiin syntyy liimattaviin saumoihin vaakasuora leikkausjännitys, joka on hallittava liimalla. Leikkauskokeiden tarkoituksena oli selvittää ponttisauman tarpeellisuus ja valita saumoihin sopiva liima.

Palkin taivutuskokeita tehtiin 1-, 2- ja 3-lamellisille poikkileikkauksille. Jokaiseen sarjaan kuului viisi palkkia. Jotta sormijatkamisen vaikutusta pystyttiin tutkimaan, testit tehtiin sekä täyspitkistä että sormijatketuista lamelleista liimatuille palkeille. Testit tehtiin jokaisessa ryhmässä sekä puutavaran lujuusluokalle C24 että C30. Taivutuskokeilla selvitettiin koekappaleiden kimmomoduuli ja taivutuskestävyys kuormittamalla koekappale murtoon asti. Samalla kirjattiin murtotapa.

Liimaliitoksen ja palkin pitkäaikaiskestävyyttä selvitettiin kahdella pitkäaikaiskokeella. Toinen kokeista suoritettiin laboratorio-olosuhteissa suhteellisen kosteuden ollessa $+ 65 \% \pm 5 \%$ ja lämpötilan $+ 20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$. Toinen koe suoritettiin ulkona katoksen alla. Päädyt ja toinen pitkä sivu olivat suojassa sateelta. Kummassakin kokeessa kaksi palkkia oli kiepahdusjäykisteillä liitetty toisiinsa. Palkkeja kuormitettiin välipohjan hyötykuorman suuruisella tasaisella kuormalla. Laboratoriokoe alkoi 1.4.2010 ja ulkona koe alkoi 22.4.2010. Aluksi taipuma kirjattiin päivittäin, myöhemmin viikoittain. Laboratoriokoetta jatkettiin 15.1.2011 ottamalla kosteudenkehitin pois päältä. 8.2.2011 nostettiin koekappaletta ympäröivän tilan lämpötilaa aluksi 30 °C :een ja 10.2.2011 50 °C :een. Taipuman muutoksia seurattiin digitaalisella mittakellolla Mitutoyo ID-C150B, jonka mittaustarkkuus on $0,006 \text{ mm}$ ja luentatarkkuus $0,001 \text{ mm}$.

2 Puupohjaiset palkkituotteet

2.1 Liimapuu

Liimapuu valmistetaan vähintään neljästä toisiinsa liimatuista laudoista tai lankuista. Lamellit asetetaan lappelleen siten, että poikkileikkauksen syyn suunta on elementin pituussuuntainen, ja liimapuusaumat ovat samansuuntaiset kuin poikkileikkauksen leveyssiunta.

Liimapuussa lamellit ovat korkeintaan 45 mm paksuja, ja lamellien vakioleveydet ovat 90 mm – 240 mm. Vakiokorkeudet vaihtelevat 45 mm:n välein 180 mm – 2050 mm. Liimapuupalkit voidaan halkaista. Liimapuun vahvuuksia ovat tasalaatuisuus, mittatarkkuus sekä muodonmuutosten vähäisyys. Yhteen liimattavan lamellipuutavaran kosteus voi vaihdella 8 %:sta 15 %:iin. Toimitettavien liimapuutuotteiden kosteus on 10–14 %. Toisiinsa liittyvissä lamelleissa kosteus voi poiketa korkeintaan 4 %. Liimapuuelementillä on parempi keskimääräinen lujuus ja pienempi lujuusominaisuuksien hajonta kuin vastaavalla rakennepuutavaraelementillä. (Carling 2003.)

Norjalainen Treteknisk-puuntutkimuslaitos ylläpitää luetteloja kantaviin rakenteisiin tarkoitetuista liimoista. Liimat on luokiteltu SFS-EN 301 -standardin suoritusvaatimusten mukaisesti. SFS-EN 302 -standardissa on esitetty kantaviin puurakenteisiin tarkoitettujen liimojen testimenetelmät. Liimatyyppin 1 liimojen on kestävä yli 50 °C:n lämpötila, ja ne soveltuvat kaikkiin kolmeen käyttöluokkaan ja siten myös ulkokäyttöön (SFS-EN 1195-1; SFS-EN 386).

Liimapurakenteissa voidaan käyttää 2-komponenttista fenoliresorsinoliformaldehydiliimaa (PRF), melamiiniureaformaldehydiliimaa (MUF) ja melamiiniformaldehydiliimaa (MF) tai 1-komponenttista polyuretaaniliimaa (PUR). Erityisesti sormijatkosten liimaamiseen hyväksytyjä liimoja ovat 2-komponenttiset emulsiopolymeerisoitu isosyaniidiliima (EPI) ja melamiiniureaformaldehydiliima (MUF).

2.2 Viilupuu ja I-palkki

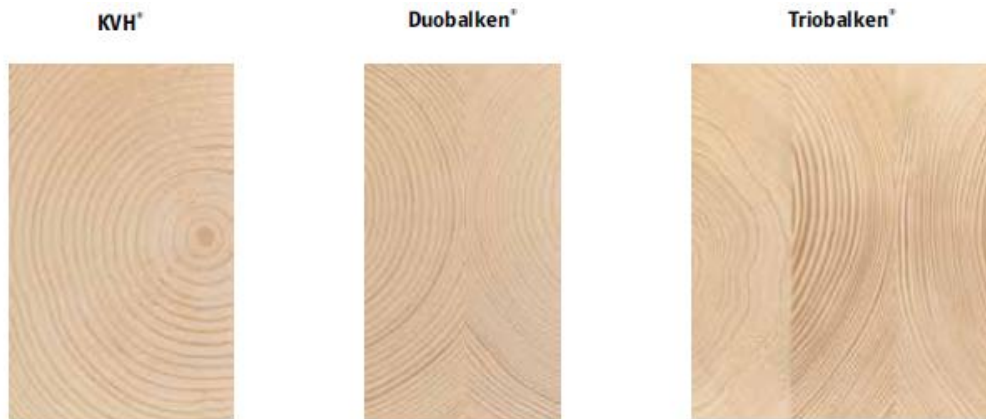
Viilupuu (*laminated veneer lumber, LVL*) on liimaamalla valmistettu puutuote, jonka tuotenimi on *kertopuu*. Viilupuu valmistetaan Suomessa 3 mm:n kuusiviiluista. Viilupuu on sekä lujuus- että jäykkyysominaisuuksiltaan rakennepuuta vahvempaa. Viilupuupalkkien vakioleveydet vaihtelevat kuuden millimetrin välein 27 mm – 75 mm. Vakiokorkeudet vaihtelevat 200 mm – 900 mm. Viilupuun etuja ovat tasalaatuisuus, mittatarkkuus ja muodonmuutosten vähäisyys. Viilupuuta käytetään palkkina syrjällään,

lankkuina lappeellaan ja sauvana pystyssä. Viilupuun tyypillinen jännevälialue on 5 m – 12 m. (RT 21-10978.)

I-palkki kuuluu kevyisiin puupohjaisiin liittorakenteisiin. Palkki koostuu ylä- ja alapääteesta, jotka ovat lujuusluokiteltua puuta. Palkissa on uuma, joka on yleensä noin senttimetrin paksuista vaneria. I-palkin etuja ovat keveys ja helppo käsiteltävyys. Palkin haittapuolia ovat alhainen leikkausvoimakestävyys uuman ja paarteiden välisissä saumoissa. (RT 21-10978.)

2.3 Liimatut sahatavarapalkit

Liimatulla sahatavaralla tarkoitetaan kahdesta tai useammasta sahatavarakappaleesta liimaamalla valmistettua tuotetta, joka ei täytä liimapuun standardeja (RT 21-10978). Kuvassa 2.1 lamellit on liimattu lappeeltaan toisiinsa kiinni.



Kuva 2.1. Liimatut sahatavarapalkit (Wiegand 2009).

Tuotteita voi käyttää kantavina palkkeina, pilareina ja aihioina erilaisille puutuotteille, kuten ikkunan karmeille, hirsille ja paneeleille (RT 21-10978).

Liimatulle sahatavaralle ei ole Suomessa omia suunnitteluohjeita. Liimapuupalkin rajana on pidetty neljää lamellia (Carling 2003). Liimatussa sahatavarapalkissa on lamelleja yleensä kaksi tai kolme. Liimatusta sahatavarapalkista on kysymys myös silloin, kun useammasta kuin kolmesta lamellista liimataan palkki, jossa lamellien paksuudet ylittävät 50 mm kohtisuoraan liimasaumaa vastaan.

Ruotsissa on käytössä omat lujuudet liimatuille sahatavarapalkeille (Regelsamling för konstruktion BKR 2010). Lujuudet asettuvat liimapuupalkkien ja sahatavaran lujuuksien välille. Niiden mukaan sahatavaran sormijatkaminen on mahdollista, kun sormijatkos valmistetaan ja tarkastetaan SFS-EN 385:en -standardin mukaan. Sormijatkosten käyttö edellyttää, että rakenne muodostetaan niin, että murto yksittäisessä sormijatkoksessa ei aiheuta koko rakenteen sortumista. Tämän on katsottu toteutuvan rakenteissa, joissa palkki- tai kehäjako on tiheä. BKR:n mukaan kahdesta tai kolmesta lamellista voi liimata sahatavarapalkkeja, kun valmistuksessa, tarkastamisessa ja leimaamisessa noudatetaan SFS-EN 14080 -standardin mukaisia ohjeita soveltuvilta osin. (BKR 2010.)

Saksassa toimiva Deutsches Institut für Bautechnik on hyväksynyt vuonna 2004 kolmesta syrjältään liimatusta lamellista valmistetun sahatavarapalkin (Trio-balken). Palkin leveys voi olla korkeintaan 100 mm, ja yhden lamellin korkeus enintään 120 mm. Lamellien vuosirenkaiden suunnan asetteluun ei ole otettu kantaa. (Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung 2009.)

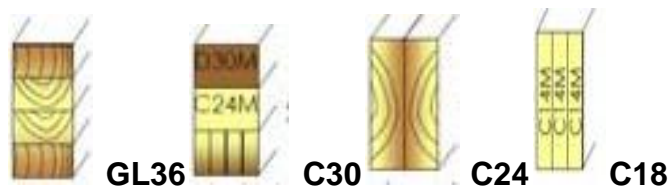


Kuva 2.2. HQL-sahatavarapalkki (Palsgaard Trae 2011).

Tanskassa on valmistettu 1990-luvun puolivälistä lähtien HQL-sahatavarapalkkia, jonka paksuudet voivat olla 34 mm, 45 mm tai 58 mm. Määrämittaiset lamellit on liimattu tasoksi kuvan 2.2 mukaisesti vuosirenkaat vuorotellen vastakkaisiin suuntiin. Tasolevy sahataan halutun korkuiseksi palkin osiksi (95 mm – 466 mm). Osista kootaan sormijatkamalla koko poikkileikkaus halutun mittaiseksi palkiksi. Tuotteen on tyyppihyväksynyt Ruotsissa Boverket (tyyppihyväksyntätodistus 4772/92). Mitoituksessa käytetään liimapuupalkin lujuuksia GL24h ja GL28c (Palsgaard Trae 2011).

Muita liimattuja innovatiivisia palkkiratkaisuja

Saksassa on viime vuosina kehitelty uusia liimattuja sahatavarapalkkiratkaisuja (ks. kuva 2.3). GL36-palkkiratkaisu täyttää nelilamellisena liimapuupalkkimäärittelyn vaatimukset, kun reunalamelleina käytettyjen liimapuupalkkien leveys ei ole suurempi kuin 45 mm. Muut palkit ovat liimattuja sahatavarapalkkeja.



Kuva 2.3. Liimattuja palkkiratkaisuja Saksasta (Tratzmiller 2009).

3 Liimatulle palkille asetetut vaatimukset

3.1 Liiman vaatimukset

Kantavissa rakenteissa käytettyjen liimojen tulee täyttää SFS-EN 301:en -standardissa esitetyt vaatimukset, ja ne tulee olla testattu SFS-EN 302 -standardin mukaisin menetelmin. Norjalainen tutkimuslaitos Norsk Treteknisk Institutt (NTI) ylläpitää luetteloa hyväksytyistä puurakenteiden liimatuotteista. Luetteloinnin ovat hyväksyneet Sveriges Tekniska Forskningsinstitut (SP), Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) ja Dansk Teknologisk Institut (DTI). (NTI 2010.)

Vick ja Okkonen (1998) ovat suorittaneet nopeutettuja kestävyystestejä PUR-liimoille ja todenneet kuivalle ja kostealle douglaskuuselle ja keltakoivulle liitosten leikkauskestävyydet vähintään yhtä lujiksi kuin resorsinoliformaldehydiliimoilla (RF). PUR-liimojen virumakestävyys oli erinomainen ohuissa saumoissa. Lamellien irtoamista tapahtui kuumavesitesteissä enemmän PUR-liimoille kuin RF-liimoille. Christiansen, Vick ja Okkonen (1999; 2000) ovat parantaneet 1-komponenttisten polyuretaaniliimaliitosten kestävyyttä esikäsittelemällä liitospinnat hydroksimetyloidulla resorsinolikiinnitysaineella (HMR).

Radovic ja Rothkopf (2003) ovat raportoineet 1-komponenttisten polyuretaaniliimojen soveltuvuudesta kantaviin rakenteisiin. Kokeet kestivät 10 vuotta. He toteavat, että PUR-liimojen teollisesta käytöstä Saksassa on saatu hyviä tuloksia, sillä yhtään liimasta johtuvaa vahinkotapausta ei todettu, kun valmistajan ohjeita oli noudatettu. Tärkeää on ottaa huomioon PUR-liiman vaahtoava ominaisuus ja reagointi kosteuden kanssa. Lisäksi pitää ottaa huomioon PUR-liimamerkkien erilaiset ominaisuudet. Saksassa voi käyttää kaikkia testattuja ja hyväksytyjä PUR-liimoja 0,3 mm:n liimasauman paksuuteen asti, mikä on myös SFS-EN 15425:en -standardin mukainen vaatimus. Minimipaksuuden tulee olla 0,1 mm saman standardin mukaan. Saksassa hyväksyty 1-komponenttinen polyuretaaniliima on mm. Collanon Purbond HB 110.

Sterley, Blümer ja Wålinder (2004) ovat selvittäneet tuoreen puutavaran liimaliitoksia käyttämällä 1-komponenttista PUR-liimaa sekä syrjä- että lapeliimaukseen. Muuttujina olivat puristus aika ja puristusvoima. Syrjältään liimatuista 48 liimasaumasta 46 täyttivät SFS-EN 386:en -normin vaatimukset. Epäonnistuneet liimasaumat löytyivät palkista, jossa oli suuri määrä vikoja ja korkea kosteus. Lujuustestit tehtiin heti, vuorokauden kuluttua ja uunikuivatuksen jälkeen. Suurta eroa ei löydetty eri puristus paineiden ja -aikojen välillä.

Teollisessa tuotannossa liimoina voi käyttää NTI:n testaamia ja hyväksymiä liimatuotteita. Yleisesti liimapuupalkkien valmistuksessa käytetty tuote on MUF-liima. Tämän 2-

komponenttiliiman puristusaikaa säädellään kovettajan ja liiman suhteella. Kun liima-kovettaja-suhde on

- 100:50, puristusaika on noin 2 tuntia
- 100:30, puristusaika on noin 3 tuntia
- 100:20, puristusaika on noin 6 tuntia.

Puristuslämpötila on puristettaessa noin 22 °C (minimi 20 °C) ja puristusvoima 1 N/mm² ([M. Mikkonen](#), henkilökohtainen tiedonanto 22.6.2010).

Tämän tutkimuksen leikkauskokeissa käytetään liimana sekä MUF-liimaa että Kiilto Oy:n 1-komponenttista polyuretaaniliimaa Kestopur 1030. Kestopur 1030:n puristusai-ka on 2 tuntia 20 °C:ssa. Puun kosteus voi vaihdella 10–20 %. Liiman valmistaja suosittelee puun kosteudeksi 14 % ja puristuspaineeksi 0,5 N/mm² – 1,0 N/mm².

Liimasauman paksuuden rajoittamiseksi alle 0,3 mm:n riittää 0,01–0,1 N/mm²:n paine (Housh 1985). Sibeliustalon parveke-elementit valmistettiin liittämällä kertopuupalkki-ripien molemmille puolille Kerto-Q-levyt ruuveilla ja polyuretaaniliimalla (Kairi 2001). Liimaa käytettiin 250 g/m², ruuviväli oli 400 mm ja reunaetäisyys 100 mm – 150 mm. Ruuveilla saatava matala puristuspaine edellytti, että pinnat olivat suoria, puhtaita ja hiekkapaperilla karhennettuja.

Tässä tutkimuksessa käytetyt liimat MUF ja Kestopur täyttävät SFS-EN 301:n ja SFS-EN 302:n vaatimukset. Ne on hyväksytty käytettäväksi rakenneluokitellun puutavaran liimaukseen kantavissa rakenteissa kaikissa kolmessa käyttöluokassa 1, 2 ja 3. Tämän tutkimuksen leikkauskokeissa tarkasteltiin liimasauman leikkauskestävyyttä vertaamalla sitä puun lujuuteen. Kokeissa tutkittiin myös ponttisauman vaikutusta leikkauskestävyyteen. Pitkäaikaiskokeissa selvitettiin liimasauman pitkäaikaiskestävyyttä.

3.2 Muotovaatimukset

Rakennepuuna käytettävän puutavaran ja siitä liimaamalla koottavien rakenneosien tulee olla riittävän lujia, jäykkiä ja muotovakaita. Puun anisotrooppisesta luonteesta johtuen sahatavaraan syntyy muodonmuutoksia, kun sitä kuivataan rakenteen käyttöolosuh-teiden vaatimaan kosteuteen. Tuoreen havupuun kosteuspitoisuus on noin 30 %. Liimaamiseen suositeltu kosteus on 12–14 %. Kuusipuun pituussuuntainen kutistuma on 0,1–0,3 %, tangentiaalinen kutistuma 7,5–8,0 % ja säteensuuntainen 3,6 %. (TreFokus AS 2011.)

Yksittäisiin lamelleihin pyrkii puun kuivuessa syntymään muotovirheitä: kieroutta, lape- ja syrjäväääryyttä sekä leveisiin lankkuihin kuperuutta. Lisäksi puun syiden kiertei-syys eli vinosyisyys, reaktiopuu, latvamutka ja epäsymmetrinen oksisto aiheuttavat soi-roon epätasaista pituussuuntaista kutistumista ja saavat aikaan kieroutumista sekä syrjä- ja lapeväääryyttä. (Ormarsson 1999.)

Tutkimukset ovat osoittaneet, että kuivaustavalla ja painojen käytöllä voidaan vaikuttaa muodonmuutoksiin. Näillä menetelmillä kieroutumista on saatu pienennetyksi 30 %. (Tarvainen 2005.)

Elementtimenetelmällä on tutkittu ja kokeellisesti todennettu, kuinka voidaan vaikuttaa eri tavoin yhteen liimattujen puutuotteiden kuivumisessa syntyviin muodonmuutoksiin. Muotovirheitä on saatu pienemmiksi halkaisemalla tukin ytimen vierestä sahattu soiro syrjän suuntaisesti kahteen osaan ja liittämällä osat liimaamalla toisiinsa. Jos osat liimaataan väärässä asennossa toisiinsa, muotovirheet kasvavat. Tutkimuksen kohteena ovat olleet myös kolmesta lamellista liimatut ikkunaprofiilit ja neljästä lamellista kootut pilarit. Samoin on tutkittu soiron halkaisemista lappeen suuntaisesti kahteen osaan ja osien liimaamista eri tavoin yhteen. (Ormarsson ym. 1998; Eriksson ym. 2004; 2005.)

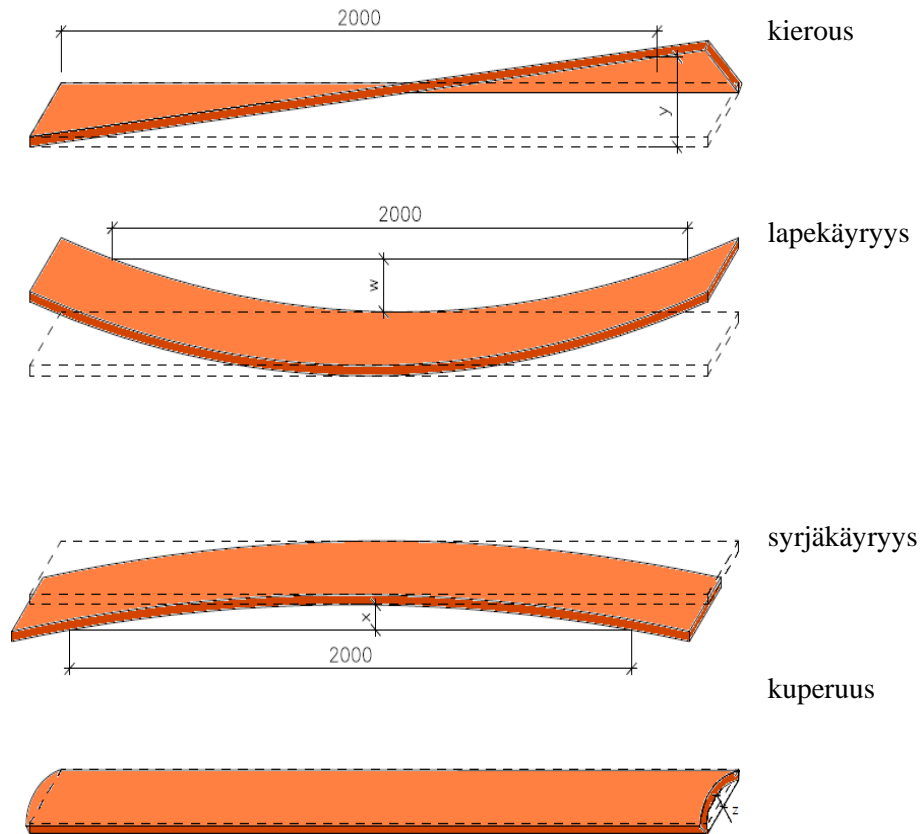
Elementtimenetelmällä on tutkittu puun kimmo- ja liukumoduulien, kosteuden vähene-
misen, kuormituksen ja puun kierteisyyden vaikutusta muodonmuutoksiin. Koekappa-
leet ovat olleet kolme metriä pitkiä soiroja. Niiden poikkileikkauksen koko on ollut 100 mm
x 50 mm. Muodonmuutoksia on tarkasteltu kuuden päivän aikana, kun puun kosteutta
on pienennetty 27 %:sta 10,75 %:iin. Soiron etäisyys tukin ytimestä vaikuttaa edellä
mainittujen muuttujien lisäksi materiaaliominaisuuksiin. (Ormarsson ym. 1999.)

Elementtimenetelmällä ja kokeellisesti mittaamalla on saatu todennetuksi, että soiron
sijainnilla puun poikkileikkauksessa on suuri vaikutus muodonmuutoksiin. Suurimmat
kieroutumiset ja lapevääryydet ovat syntyneet ydinpuukeskeisesti sahattuun soiroon.
Puun kierteisyydellä on suuri vaikutus soiron kierouteen. Suurimmat kuperuusmuo-
donmuutokset syntyvät, kun ydin on soiron pinnassa. Tutkimuksissa on pystytty vähen-
tämään muotovikoja sahaamalla kolme ohutta lautaa tukin eri kohdista ja liimaamalla ne
yhteen. (Ormarsson ym. 2000.)

Elementtimenetelmällä on tehty muitakin muodonmuutostutkimuksia. Kolmesta ja nel-
jästä lamellista on valmistettu liimaamalla rakennustuotteita, joiden käyttötarkoitus on
ollut ikkunoiden pielirakenteet, portaat ja ovet. Sopivalla asettelulla on pystytty pien-
entämään muodonmuutoksia. Ormarsson ym. (2003) ovat tutkineet myös rimoista liimat-
tujen pöytälevyjen muodonmuutoksia.

Tarvaisen (2005) mukaan puu kannattaa jättää niin korkeaan loppukosteuteen kuin tuot-
teen loppukäyttö mahdollistaa. Mittauksissa on todettu, että latvatukista sahatun ydin-
keskeisen sahatavaran kierous kasvaa 30 %, kun puuta kuivataan 16 %:sta 12 %:iin
(Tarvainen ym. 1998).

Tämän tutkimuksen ensimmäisessä osassa tarkastellaan kolmen lamellin erilaisten aset-
telujen ja yhteen liimaamisen vaikutusta muodonmuutoksiin. Tutkimuksessa käytetyt
soirot on sahattu pieniläpimittaisista tukeista (ks. kuva 3.2). Muodonmuutuskokeissa
tutkittiin lamellien erilaisten asettelujen vaikutusta muotovirheisiin. Kuvassa 3.1 on
esitetty muotovirhetyypit (SFS-EN 1310).



Kuva 3.1. Muotovirhetyypit (SFS-EN 1310; SFS 5878 INSTA 142).

Taulukossa 3.1 on esitetty standardin mukaiset suurimmat hyväksytyt muotoviat. Standardin mukaan sahatavaran kuperuus ei ole ongelma.

Taulukko 3.1. Suurin sallittu muotovian suuruus millimetreinä 2 m:n matkalla (SFS-EN 14081-1).

Ominaisuus	Lujuusluokka C18 ja alle	Lujuusluokka yli C18
Lapekäyryys (w)	20	10
Syrjäkäyryys (x)	12	8
Kierous (y)	2 mm / 25 mm:n leveys	1 mm / 25 mm:n leveys
Kuperuus (z)	Ei rajoituksia	Ei rajoituksia

3.3 Lujuusvaatimukset

Tässä tutkimuksessa on vertailtu leikkaus- ja taivutuskokeissa saatuja tuloksia sahatavaran kestävyksiin. Koesarjat on tehty sekä lujuusluokalle C24 että lujuusluokalle C30.

Taulukossa 3.2 on esitetty SFS-EN 338:n mukaiset sahatavaran ja SFS-EN 1194:n liimapuupalkin ominaislujuudet. Arvot on annettu laboratorio-olosuhteiden mukaisina. Käyttöluokka- ja kuorman aikaluokkamuunnoskerroin k_{mod} on taulukoitu standardissa SFS-EN 1995-1-1 + A1 + AC.

Taulukko 3. 2. Sahatavaran ja liimapuun ominaislujuudet (SFS-EN 1194; SFS-EN 338).

Lujuusluokka		Sahatavara (C24 ja C30) ja liimapuu (GL24h-GL32c)						
		C24	C30	GL24h	GL28h	GL32h	GL28c	GL32c
Ominaislujuudet N/mm ² ja tiheydet kg/m ³								
Taivutus	$f_{m,k}$	24	30	24	28	32	28	32
Veto II	$f_{t,0,g,k}$	14	18	16,5	19,5	22,5	16,5	18,5
Veto 90°	$f_{t,90,g,k}$	0,5	0,6	0,4	0,45	0,5	0,4	0,45
Puristus II	$f_{c,0,g,k}$	21	23	24	26,5	29	24	26,5
Puristus 90°	$f_{c,90,g,k}$	2,5	2,7	2,7	3,0	3,3	2,7	3,0
Leikkaus	$f_{v,k}$	2,5	3,0	2,7	3,2	3,8	2,7	3,2
Kimmomod.	$E_{0,g,mean}$	11000	12000	11600	12600	13700	12600	13700
Kimmomod.	$E_{0,05}$	7400	8000	9400	10200	11100	10200	11100
Liukumod.	$G_{g,mean}$	690	750	720	780	850	720	780
Tiheys	$\rho_{g,k}$	350	380	380	410	430	380	410
Tiheys, ka	ρ_{mean}	420	460				430	470

3.4 Taipuma

Palkin taipuma on kääntäen verrannollinen palkin jäykkyyteen ja siis myös kimmomoduuliin. Jokaiselle taivutuskokeen palkille laskettiin yleinen kimmomoduuli, ryhmien kimmomoduulien keskiarvot ja keskihajonta sekä ominaisarvot $E_{0,mean}$ ja $E_{0,05}$.

Pitkäaikaiskokeissa seurattiin taipuman kehittymistä sekä ulkona katoksen alla vaihtelevissa sääoloissa että laboratorio-olosuhteissa. Laboratoriossa ilman suhteellinen kosteus oli 65 % ± 5 % ja lämpötila + 20 °C ± 2 °C. Taipuman lisäksi mittauspäivinä kirjattiin olosuhteet.

Taulukossa 3.3 on esitetty taipumien enimmäisarvot RIL:n suunnitteluohjeiden mukaisesti.

Taulukko 3.3. Taipumien enimmäisarvot (RIL 205-1-2009).

Rakenne	$w_{inst}^{1)}$	$w_{net,fin}^{2)}$	$w_{fin}^{3)}$
Pääkannattimet	l / 400	l / 300	l / 200
Orret ja muut sekundäärikannattimet	-	l / 200	l/150

l on jänneväli
¹⁾ koskee pelkästään lattioita
²⁾ koskee suoria ja esikorotettuja rakenteita, mutta ei tukipisteiden välillä kaarevia tai taitteellisia kannattimia
³⁾ koskee esikorotettuja sekä tukipisteiden välillä kaarevia rakenteita.
 w_{inst} on hetkellinen taipuma
 $w_{net,fin}$ on lopputaipuma, sisältää myös viruman aiheuttaman lisätaipuman w_{creep} .

3.5 Tuotettavuus

3.5.1 Tuotanto-olosuhteet

Henkilökunnalla tulee olla riittävät taidot puutavaran lujuuslajitteluun sekä liimapuu-palkkien ja sormijatkosten liimaamiseen (SFS-EN 386:en). Tuotantotilassa lämpötilan tulee olla vähintään + 15 °C. Kappaleiden käsittelyn tulee tapahtua + 20 °C:n lämpötilassa, kun puutavaran alkulämpötila on + 18 °C, ja + 25 °C:n lämpötilassa, kun alkulämpötila on + 15 °C (SFS-EN 386:en). Tuotannon aikana ilman suhteellisen kosteuden on oltava 40–75 %. Valmistelun aikana on 30 %:n suhteellinen kosteus hyväksyttävissä. Puutavaran kuivaukseen ja varastointiin täytyy olla riittävät tilat, jotta sopiva puutavaran kosteus ja lämpötila saavutetaan. Puun kieroutumista voidaan vähentää 30 %:lla kuormittamalla kuivausvaiheessa sahatavaraa 600–800 kg/m²:n kuormalla tai kuivaamalla puut mahdollisimman leveinä ja särmäämättöminä (Tarvainen & Hukka 1997).

3.5.2 Tilojen varustelu

Tiloissa tarvitaan laitteet ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden jatkuvaan tarkkailuun sekä puutavaran kosteuden mittaamiseksi. Tuotantotilan alkupäähän tarvitaan laitteet koneellisen lujuuslajittelun suorittamiseen, mikäli se tehdään tuotantotiloissa. (SFS-EN 386.) Sen lisäksi tiloissa tarvitaan varusteet

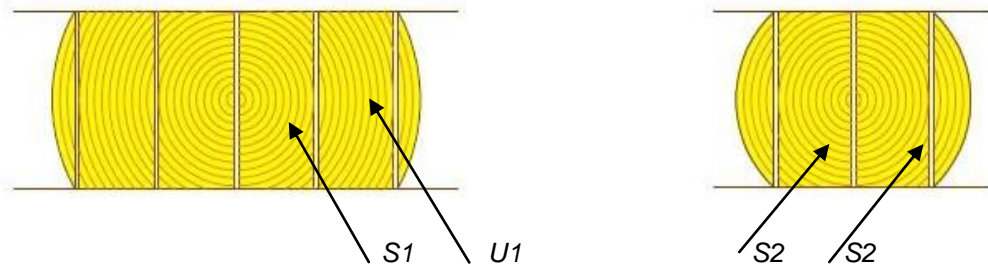
- sormijatkosten tekemiseen, mikäli ne tehdään tuotantotiloissa
- lamellien mittaamista varten
- pintojen oikaisua varten
- 2-komponenttiliiman valmistamiseen, mikäli sitä käytetään
- liiman levittämiseen
- halutun puristuspuheen aikaansaamiseen
- sormijatkosten lujuuden testaamiseen

- liimauksen eheyden varmistamiseen.

Tuotantolaitoksen on osoitettava tuotteen kelvollisuus CE-merkinnällä, minkä saanti edellyttää toiminnan perustuvan sertfioituun laatu järjestelmään. CE-merkintä tulee pakolliseksi vuonna 2013 (Ympäristöministeriö 2010).

3.5.3 Puutavara

Pieniläpimittaisesta tukista sahataan kaksi lamelliksi sopivaa soiroa (S2) kuvan 3.2 mukaisesti. Tällöin tukki sahataan keskeltä sydänpuuta. Lujuuslajittelun (C24 ja C30) jälkeen soirot kuivataan noin 12 %:n kosteuteen. Tapulien päällä käytetään ylimääräistä kuormaa $600 \text{ kg/m}^2 - 800 \text{ kg/m}^2$ (Tarvainen 2005). Varastotapulien tulee olla rimoitettuja ja ilman kierron mahdollista tapulin alapuolelta. Kuivatut soirot sormijatketaan, höylätään ja niputetaan tasaantumaan.



Kuva 3.2. Tukin sahaaminen.

Paksun tukin laatuominaisuudet muuttuvat siirryttäessä sydänpuusta (S1) tukin ulkopintaan (U1). Oksaisuus pienenee 50 % 200 mm:n etäisyydellä keskikohdasta. Tiheys on samassa kohdassa noin 15 % suurempi, kimmomoduuli noin 45 % suurempi ja taivutuskestävyys jopa 70 % suurempi kuin sydänpuussa. (Tratzmiller 2009.)

Ohuesta tukista (S2) saadaan 7 % lujuusluokan C35M-sahatavaraa (DIN). Paksusta tukista saadaan 35 % lujuusluokan C35M-sahatavaraa (S1) 100 mm:n etäisyydelle asti puun ytimestä mitattuna. Vielä tätä ulompana lujan puun osuus voi olla 74 %. (Tratzmiller 2009.)

Puun saatavuus Varsinais-Suomessa johti lujuusominaisuuksista huolimatta siihen, että kaikki taivutuskoe kappaleet valmistettiin S2-tyypin saheista. Tämä valinta edellyttää tukin latvaläpimitaksi vähintään 150 mm.

Yksittäiset lamellit sormijatketaan ennen höyläystä. Tällöin puutavaran lämpötila ei saa olla alle $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Sormijatkokset tehdään SFS-EN 385:en -standardin mukaisesti. Oksan etäisyyden on oltava sormijatkoksen reunasta ainakin kolme kertaa niin suuri kuin oksan halkaisija. (Oja ym. 2009.) Sormijatkettavien lamellien kosteus ei saa poiketa toisistaan enempää kuin 5 %. Sormijatkettaessa lamelleja puristetaan yhteen 1–5 s:n ajan. Lamellien tulee olla höylättyjä ennen liimausta. Höyläystä ei saa suorittaa enempää kuin

24 tuntia ennen liimausta. Mikäli kappaleita on vaikea liimata esimerkiksi pihkan tai lahonsuoja-aineiden vuoksi, liimaus on tehtävä 6 tunnin kuluessa höyläyksestä.

3.5.4 Tuotanto

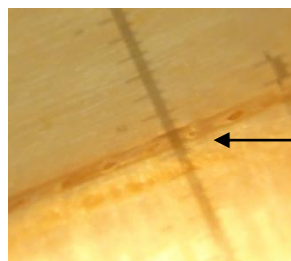
Sormijatkettut lamellit asetellaan syrjälleen päällekkäin vuosirenkaat vuorotellen vastakkaisiin suuntiin.

Liimaus suoritetaan 24 tunnin aikana höyläämisestä. Liimauksessa lamellien pintojen tulee olla puhtaita. Liiman käytön suhteen on noudatettava liiman valmistajan ohjeita. Polyuretaaniliimaa käytettäessä liimattavan palkin puristusaika on 90 min – 120 min ja puristuspaine $0,5 \text{ N/mm}^2$ – $1,0 \text{ N/mm}^2$ molempiin suuntiin. Avoimen ajan maksimipituus on 30 min. Liiman valmistaja on antanut nämä ohjeelliset arvot, kun työ suoritetaan $20 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa. Puun suosituskosteus liimauksessa on 14 %, kun käytetään 1-komponenttista polyuretaaniliimaa. Tällöin liimasauman paksuus ei saa ylittää 0,3 mm. Vierekkäisten lamellien välinen kosteusero ei saa ylittää 4 %. Puristuksen jälkeen palkit mitallistetaan tai höylätään puhtaaksi ja tarvittaessa suojakäsitellään. Palkit pakataan ja varastoidaan kuivassa tilassa valolta suojattuna. Varastotilan lämpötilaksi suositellaan $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ – $+25 \text{ }^\circ\text{C}$. (SFS-EN 386.)

Liiman valmistaja suosittelee liiman levitysmääräksi 150 g/m^2 – 300 g/m^2 . Kuvassa 3.3 liimataan sahatavarapalkkeja Karosen Sahalla Alastarolla. Kuvassa 3.4 esitetään lamellien välinen sauma, jonka leveys on 0,1 mm.



Kuva 3.3. Liimattuja sahatavarapalkkeja puristetaan. Palkkeja on kaksi päällekkäin ja kaksi rinnakkain.



Sauman suurennos noin 25-kertaisena

Kuva 3.4. Lamellien välisen liimasauman leveys on 0,1 mm. Näkyvissä on höyläyksessä haljenneita ilmakuplia.

4 Kuormituskokeet

Kuormituskokeet jakaantuvat tässä tutkimuksessa viiteen osaan. Aluksi tutkitaan, mikä on lamellien asettelun vaikutus 3-lamellisen palkin muotovirheiden hallintaan. Toisessa vaiheessa selvitetään saumatyyppi ja valitaan liima. Kolmannessa vaiheessa selvitetään taivutuskokeilla palkin taivutuskestävyys. Lopuksi selvitetään pitkäaikaiskokeilla, miten liimasauma kestää ulko-olosuhteet katoksen alla. Vertailuarvoja hankitaan toteuttamalla sama pitkäaikaiskoe laboratorio-olosuhteissa. Laboratoriokokeen loppuvaiheessa tarkastellaan palkin käyttäytymistä, kun koekappaleen säilytystilan lämpötilaa nostetaan 50 °C:een kahdeksi viikoksi.

4.1 Syrjältään liimatun sahatavaran muodonmuutokset ja muotovirheet

Rakennustuoteteollisuus vaatii puutuotteilta hyvää muoto- ja mittavakautta. Ongelmana on kosteuden muutosten vaikutusten hallinta. Puu materiaalina käyttäytyy eri tavalla pituussuunnassa kuin poikittain. Toinen tärkeä muodonmuutoksiin vaikuttava ominaisuus on puun kierresyisyys. Lisäksi ominaisuudet poikkeavat riippuen siitä, mistä kohtaa tukkia soiro on sahattu. Tässä tutkimuksessa syrjältään liimaamisen onnistumista arvioidaan mittaamalla koekappaleiden muodonmuutosvirheitä. Muodonmuutosvirheitä verrataan euronormien sallimiin muotovikoihin. Muotovirhemittausten tulokset on esitetty graafisesti liitteessä 3.

4.1.1 Tarkoitus

Yksittäisten soirojen muodonmuutoksia on tutkittu perusteellisesti. Samoin on tutkittu soiroista liimattujen pilareiden ja pöytälevyjen muodonmuutoksia. Tässä tutkimuksessa muodonmuutoskokeiden tarkoituksena oli selvittää lamellien asettelun sekä koon vaihtelun ja saumatyyppin vaikutuksia palkkien suoruuteen.

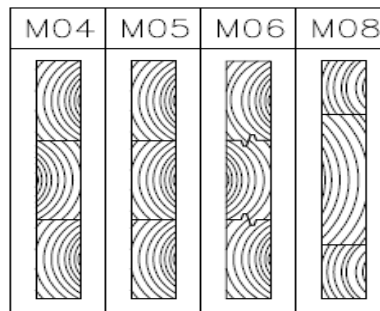
4.1.2 Koekappaleet, dimensiot ja laatu

Koekappaleet koostuivat neljästä eri ryhmästä, joihin jokaiseen kuului kolme koekappaletta. Kaikki koekappaleet olivat 2007 mm pitkiä. Koekappaleiden numerointi ja vuosirenkaiden suunnat esitetään kuvassa 4.1. Rakennepuutavaraksi sopivasta latvaltaan pieniläpimittaisesta kuusitukista pelkkasahataan kaksi soiroa niin, että niistä saa höyläällä kaksi sopivankokoista lamellia. Tässä tutkimuksessa höylättyjen lamellien poikki-

leikkaukset olivat noin 45 mm x 115 mm paitsi koekappaleessa M08, jossa keskilamelli oli 45 mm x 145 mm ja reunalamellit 45 mm x 100 mm.

Pieniläpimittaiseen tukkiin (latvahalkaisija 150 mm) päädyttiin sen saatavuuden vuoksi. Lamellit suunniteltiin sahattaviksi niin, että niissä ei ole näkyvissä sydänpuuta. Sydänpuukeskeiset saheet kieroutuvat eniten (Ormarsson ym. 1998; 1999). Lisäksi niihin syntyy pintahalkeamia.

Muodonmuutoskoekappaleissa sydänpuukeskeisyyden välttäminen ei täysin toteutunut (ks. kuvat 4.3–4.6).



Kuva 4.1. Muodonmuutoskokeen koekappaleiden poikkileikkaukset.



Kuva 4.2. Muodonmuutoskokeen M08-, M06-, M05- ja M04-ryhmien koekappaleiden säilytys. Kussakin ryhmässä on 3 koekappaletta.

4.1.3 Koekappaleiden valmistus

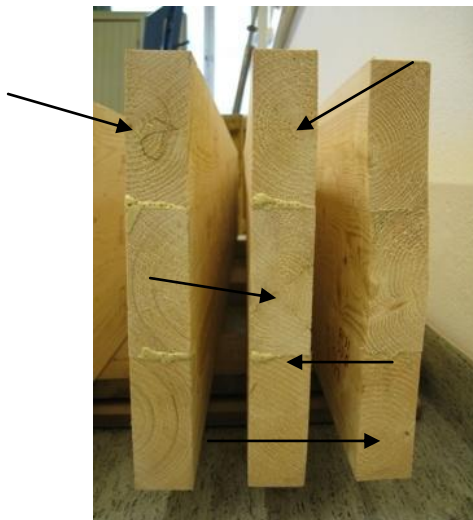
Koekappaleet valmistettiin Yläpuu Oy:n tiloissa Yläneellä. Liimauksessa käytettiin 1-komponenttista polyuretaaniliimaa Kestopur 1030, joka täyttää SFS-EN 301:n ja SFS-EN 302:n vaatimukset. Palkit valmistettiin liiman toimittajan ohjeiden mukaisissa olo-

suhteissa. Muutamista hammastuksista lamellien välillä voi päätellä, että puristusaine sivusuunnassa ei ollut riittävä.

4.1.4 Koejärjestelyt ja mittaukset

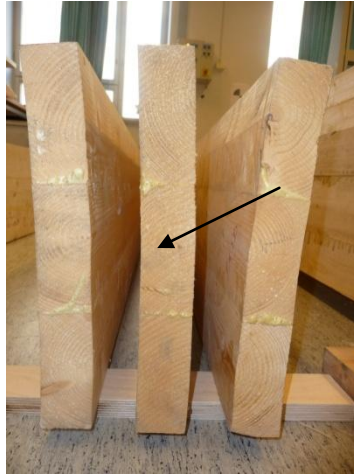
Koekappaleita säilytettiin syrjällään huonetilassa, jossa ilman suhteellinen kosteus vaihteli ulkona vallitsevan kosteuden mukaan. RH vaihteli 20–70 %, ja lämpötila pysytteli noin 20 °C:ssa koko kokeen ajan (ks. kuva 4.2). Ensimmäisen kerran muotovirheet mitattiin heti liimauksen jälkeisenä päivänä ja viimeisen kerran puolen vuoden päästä liimauksesta. Puun kosteusprosentti mitattiin piikkimittarilla Gann Hydromette RTU 600 + M 18. Piikkimittari antaa noin 1 % liian suuria arvoja puun kosteudeksi. Ensimmäisellä kerralla puun kosteus vaihteli 15–18 % ja viimeisellä kerralla 13–14 %.

Palkit mitattiin yhteensä neljä kertaa. Muotovirhemittauksissa käytettiin apuna työntömittaa ja vatupasseja. Kuvissa 4.3–4.6 näkyvät muodonmuutoskoekappaleiden päätykuvannot ryhmittäin.



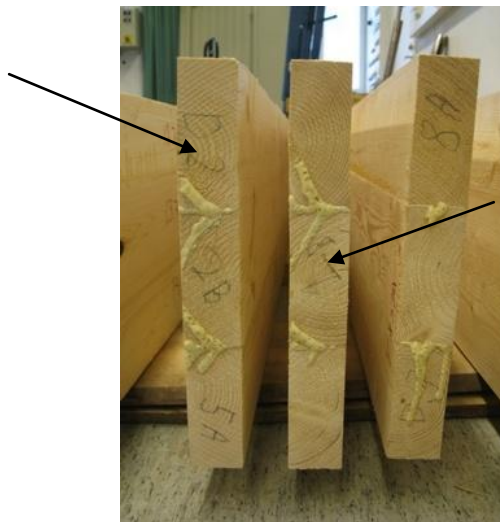
Kuva 4.3. M04-muodonmuutoskoekappaleiden päädyt. Lamellien vuosirenkaat ovat vuorotellen vastakkaisiin suuntiin. Saumat ovat sileät.

M04-1-koekappaleessa on noin 1 metrin pituinen pintahalkeama sydänpuun kohdalla. Sydänpuu näkyy vain toisessa päässä. M04-2-koekappaleen ylimmän lamellin sydänpuu näkyy molemmissa päissä. Muiden lamellien sydänpuut näkyvät vain toisessa päässä. Ylin lamelli on haljennut sydänpuun kohdalta. M04-3-koekappaleessa on lyhyt halkeama ylimmän lamellin sydänpuun kohdalla.



Kuva 4.4. M05-muodonmuutoskoekappaleiden päädyt. Kappaleiden vuosirenkaat ovat samaan suuntaan ja liimasaumat ovat sileät.

M05-2-koekappaleen keskimäinen lamelli on haljennut sydänpuun kohdalta. Muissa M05-sarjan koekappaleissa sydänpuu ei ollut näkyvillä eikä halkeamia esiintynyt.



Kuva 4.5. M06-muodonmuutoskoekappaleiden päädyt. Koekappaleiden vuosirenkaat ovat vuorotellen vastakkaisesti suuntiin. Koekappaleissa on ponttisauma.

M06-1-koekappaleen ylimmän lamellin molemmissa päissä näkyy sydänpuu. Lamelli on myös halkeillut. M06-2-koekappaleen keskimäisessä lamellissa esiintyy myös halkeama sydänpuun kohdalla.



Kuva 4.6. M08-muodonmuutoskoekappaleiden päädyt. Koekappaleiden vuosirengaat ovat vuorotellen vastakkaisiin suuntiin. Keskilamelli on 145 mm leveä, ja kappaleiden saumat ovat sileät.

Koekappaleessa M08-1 keskimäinen lamelli oli käännetty sahauksen jälkeen pituusakselinsa ympäri. Palkin päässä vuorottelivat tyvi, latva ja tyvi. Tässä koekappaleessa kieroutuminen pieneni merkittävästi toisen kuukauden aikana liimauksen jälkeen. Koekappaleen M08-2 ylimmässä lamellissa näkyy sydänpuu molemmissa päissä. Halkeamaa ei tällä kertaa kuitenkaan syntynyt.

4.1.5 Tulokset



Kuva 4.7. Muotovirheiden mittaaminen.

Kuvassa 4.7 mitataan koekappaleen kuperuutta. Kaikkien koekappaleiden M04–M08 muotovirhemittausten tulokset on esitetty liitteessä 3. Liitteessä on ilmoitettu myös suurimmat SFS-EN 14081-1 -standardin maksimiarvot kullekin sahatavaran muotovirhetypille ja lasketut keskiarvot. Kuperuudelle ei ole rajoituksia. Vaaka-akseli osoittaa mittauskerrat. Mittakaava ei ole lineaarinen. Liimaus suoritettiin 3.6.2009. Ensimmäiset mittaukset suoritettiin 4. ja 5.6.2009. Mittaukset suoritettiin toisen kerran 30.6. ja

1.7.2009. Kolmas mittaus suoritettiin 10.8.2009 ja neljäs mittaus 14.12.2009. Kolmen ensimmäisen mittauksen aikaväli oli noin kuukausi. Kolmannen ja neljännen mittauskerran väli oli noin neljä kuukautta. Koekappaleita säilytettiin huonetilassa vapaasti syrjällään lattiasta irti tuettuina (kuva 4.2).

Ryhmässä M04 muut muotovirheet ovat alle standardin maksimirajojen, paitsi koekappaleen 2 kierous kasvaa kolmen kuukauden jälkeen yli maksimin. Muidenkin koekappaleiden kierous kasvaa loppuvaiheessa.

M05-ryhmän kaikkien koekappaleiden muotovirheet pysyivät alle standardin maksimiarvojen. Kuperuudet olivat tässä ryhmässä selvästi suurimmat ja kasvoivat koko mittausajan lukuun ottamatta koekappaletta 1. Kierous oli tässä ryhmässä pienintä.

Ryhmän M06 kaikki muut muotovirheet olivat alle maksimirajojen paitsi koekappale 2:n kierous ja mittausjakson loppuvaiheessa koekappale 1:n. Kieroudet kasvoivat kahden kuukauden jälkeen.

Ryhmässä M08 kaikki arvot olivat alle maksimirajojen. Koekappaleissa 1 ja 2 tapahtui selvä kierouden pieneneminen toisen kuukauden aikana. Kaikista koekappaleista M08-1 oli ainoa, jossa keskimmäisen lamellin tyvipää oli käännetty vastakkaiseen suuntaan reunalamelleihin nähden.

4.1.6 Päätelmät

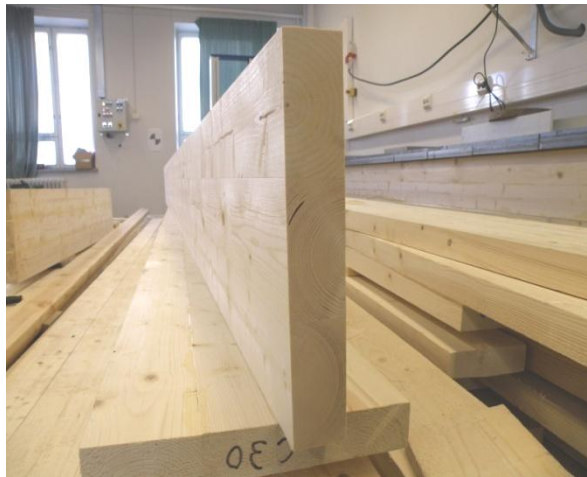
Mittaustulosten mukaan muotovirheiden keskiarvot ovat kohtuullisia. Ryhmän M05 tulosten perusteella palkin kierous on pienimmillään, kun vuosirenkaat vaikuttavat samaan suuntaan. Tässä ryhmässä kuperuus on suurimmillaan. Ryhmän M08 tulosten mukaan lamellit on hyvä asetella siten, että lamellien vuosirenkaat ovat vastakkaisiin suuntiin, koska se vähentää koekappaleiden kieroutta. Ryhmän M04 kierouteen on vaikuttanut lamellien sydänpuukeskisyys. Ryhmän ensimmäisessä koekappaleessa ylimmän ja alimman lamellin toisessa päässä näkyi sydänpuu. Toisen koekappaleen ylimässä lamellissa sydänpuu oli näkyvissä molemmissa päissä, kun taas keskimmäisessä ja alimmassa lamellissa sydänpuu näkyi vain toisessa päässä. Kolmannen koekappaleen ylimmän lamellin molemmissa päissä sydänpuut olivat näkyvissä. Kieroutuminen on suurinta sydänpuussa (Ormarsson 1999). Sydänpuun näkyminen vain lamellin toisessa päässä viittaa käytetyn tukin käyryyteen. Ryhmän M05 vuosirenkaiden samansuuntaisuus on saanut aikaan kuperuutta, mikä näkyy kuvassa 4.4. Käytännön rakentamisessa kuperuudesta on enemmän haittaa kuin kieroudesta esimerkiksi palkki-palkki- ja palkki-pilariliitoksissa. Kieroutta voi vähentää kiinnityksillä helpommin kuin kuperuutta. Standardissa SFS-EN 14081-1 ei ole annettu maksimirajoja kuperuudelle.

Lamellien asettelulla pystytään vaikuttamaan muotovirheisiin. Liimaamalla lamellit toisiinsa niin, että muodonmuutokset pakotetaan vaikuttamaan toisiaan vastaan, pienennetään muodonmuutoksia. Tähän tilanteeseen päästään kääntämällä keskimmäiseksi tuleva lamelli alkuperäisestä sahausasennosta ympäri vastakkaiseen suuntaan. Näin oli

menetelty koekappaleen M08-1 kohdalla. Kieroutuminen pieneni selvästi ensimmäisen kuukauden jälkeen.

Ryhmän M04 lamellien muodonmuutokset osoittivat, että sahausessa ei ydinosaa voi sijoittaa lamellin keskelle. Tämän ryhmän toisen koekappaleen olisi voinut hylätä, koska se ei vastaa suunniteltua sahaustapaa, jossa suora tukki halkaistaan keskeltä kahteen osaan. Ydinpuukeskeinen sahe pyrkii halkeamaan keskikohdalta. (Ormarsson 1999.) Tämän ryhmän kaksi muutakin koekappaletta oli sahattu väärin, koska ydin on näkyvässä koekappaleen toisessa päässä. Ryhmän M08 palkeissa kierous oli vähäistä. Taivutuskokeita varten valmistetut 3-lamelliset palkit tehtiin asettamalla sydänkuviot vuorotellen vastakkaisiin suuntiin eli ryhmien M04 ja M08 palkkien mukaisesti. Ryhmän M06 palkeissa oli lisäksi pontti lamellien välissä.

Kaikki syrjältään liimatut 45 taivutuskoe kappaletta olivat silmämääräisesti arvioituina kohtuullisen suorina (kuva 4.8).



Kuva 4.8. 3-lamellinen palkki. Lamellien vuosirenkaat ovat vuorotellen vastakkaisiin suuntiin.

4.2 Leikkauskokeet

4.2.1 Tarkoitus

Leikkauskokeilla tutkittiin liimasauman leikkauskestävyyttä. Taivutuksessa palkkiin syntyy liimattaviin saumoihin vaakasuora leikkausjännitys, joka on hallittava liimalla. Leikkauskokeiden tarkoituksena oli lisäksi selvittää ponttisauman tarpeellisuus ja löytää sopiva liima saumoihin.

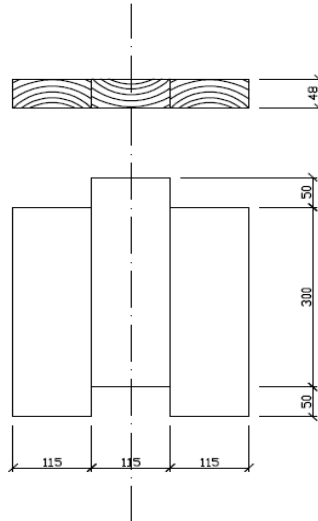
4.2.2 Koekappaleet, dimensiot ja laatu

Koekappaleet valmistettiin C24-lujuusluokan sahatavarasoeroista. Koekappaleen osia oli 3, ja kunkin osan poikkileikkaus oli 48 mm x 115 mm ja L = 350 mm. Osat liimattiin

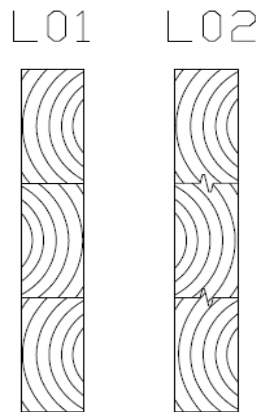
toisiinsa syrjiltään kuvan 4.9 mukaisesti. Koekappale tarkkuussahattiin levysirkkelillä. Kokeessa käytettiin kahta erilaista saumatyyppiä: suoraa saumaa ja ponttisaumaa, jonka muoto esitetään kuvassa 4.10. Tutkimukseen valittiin kaksi eri liimatyyppiä: 1-komponenttinen polyuretaaniliima Kestopur 1030 ja 2-komponenttinen melamiiniurea-formaldehydiliima MUF 1247/2526 (NTI 2010). 1-komponenttinen polyuretaaniliima (PUR-liima) sisältää metyleenidifenyylisosiyaaniittia. Tämä liima on liimahirsien valmistajien yleisesti käyttämä vaihtoehto. Liima on hyväksytty käytettäväksi asuin- ja muiden rakennusten rakentamiseen (Kiilto Oy 2010). Kestopur 1030 täyttää myös standardin SFS-EN 204:en D4-rasitusryhmän vedenkestovaatimukset. 2-komponenttinen MUF-liima sisältää formaldehydiä ja on yleisesti käytetty liimapuupalkkien liimaamiseen. NTI on hyväksynyt molemmat liimat kantavien rakenteiden liimaamiseen. MUF-liima täyttää standardin SFS-EN 14080 vaatimukset, mikä on edellytys liimapuutuotteen CE-merkinnälle. Koekappaleet testattiin kolmen sarjoissa. Kappaleet nimettiin taulukon 4.1 mukaisin tunnuksin. Leikkauskokeiden kappalekohtaiset tulokset murtotapoi- neen on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 4.1. Leikkauskoe-kappaleiden tunnuksot, liima ja saumatyyppit.

Tunnus	MUF	PUR	Suora sauma	Ponttisauma
L01-1MUF	X		X	
L01-2MUF	X		X	
L01-3MUF	X		X	
L01-1PUR		X	X	
L01-2PUR		X	X	
L01-3PUR		X	X	
L02-1MUF	X			X
L02-2MUF	X			X
L02-3MUF	X			X
L02-1PUR		X		X
L02-2PUR		X		X
L02-3PUR		X		X



Kuva 4.9. Leikkauskokeissa käytetyn koekappaleen dimensiot.



Kuva 4.10. Leikkauskokeissa käytettyjen koekappaleiden saumatyypit.

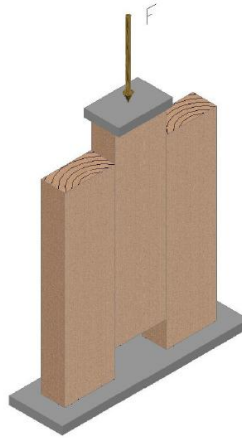
4.2.3 Koekappaleiden valmistus ja liimaus

Koekappaleet valmistettiin Yläpuu Oy:n tiloissa Yläneellä liiman valmistajien liimausohjeita noudattaen. Liimauksen jälkeen kappaleita säilytettiin sääkaapissa, joka oli asetettu standardi-ilmastoon, jossa lämpötila on 20 ± 2 °C ja ilman suhteellinen kosteus 65 ± 5 %. Kappaleita pidettiin sääkaapissa riittävän kauan, jotta kappaleiden sisäinen kosteustasapaino saavutettiin. Massa pysyi muuttumattomana (alle 0,1 %) kahden kuuden tunnin välein tehdyn punnituksen aikana.

4.2.4 Koejärjestelyt ja mittaukset

Koekappaleet asetettiin tukevalle, painumattomalle alustalle. Koekappaletta kuormitettiin keskimmäisestä lamellista sylinterivoimalla F, jolloin liimasaumaan syntyi F/2-suuruinen leikkausvoima. Kuormitusperiaate esitetään kuvassa 4.11. Koekappaleen alla oleva teräksinen alusta oli mitoitettu niin, että minkäänlaisia ylimääräisiä siirtymiä ei päässyt syntymään. Kappaleet kuormitettiin Matertest Oy:n valmistamalla yleisaineen-

koestuskoneella, jonka puristuskapasiteetti on 450 kN. VTT kalibroi puristuslaitteen 26.5.2009 5 kN – 450 kN tarkkuusluokkaan 1. Kappaletta puristavan sylinterin päässä oli pallonivelen varaan ripustettu tukeva teräspalkki. Kuva 4.12 on otettu koetilanteesta.



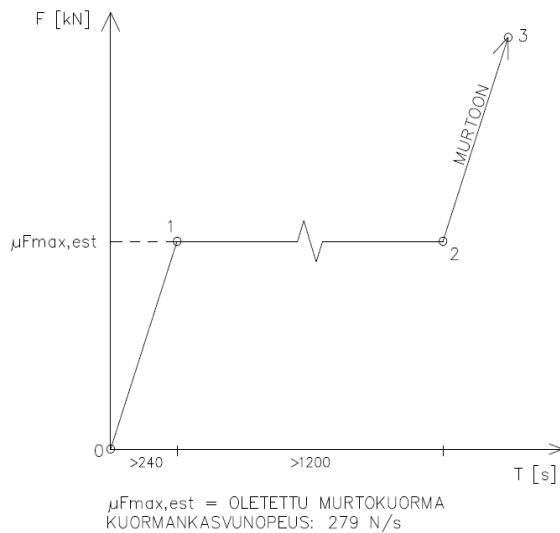
Kuva 4.11. Periaatekuva liimasauman leikkauskoestuksesta.



Kuva 4.12. Koekappale puristuksessa.

Kokeissa noudatettiin kuvan 4.13 mukaista kuormituskaaviota. Ensimmäisessä vaiheessa kuormaa kasvatettiin 240 sekunnin aikana tasaisesti arvoon 72 kN, joka vastaa taulukon 3.2 mukaista C24-lujuusluokan puun ominaisleikkauslujuuden arvoa. Toisessa vaiheessa kuorma pidettiin vakiona arvossa 72 kN 1200 sekunnin ajan, ja kolmannessa vaiheessa kappale kuormitettiin murtoon kasvattamalla voimaa tasaisesti samalla nopeudella kuin ensimmäisessä vaiheessa. Murtokuormien keskiarvo oli kaksinkertainen 1. vaiheen kuormitukselle. Puristava voima F mitattiin $\pm 0,15$ %:n tarkkuudella, ja sylinterissä tapahtuva pystysuuntainen siirtymä s mitattiin $\pm 0,41$ %:n tarkkuudella 0,1 sekunnin välein. Kaikki koekappaleiden leikkausvoima–siirtymä-tulokset kuormitusohjelmiseen on esitetty liitteessä 1.

Koekappaleiden dimensiot mitattiin elektronisella Biltema Digital Caliper -työntötkillä, jonka tarkkuus on $\pm 0,03$ mm. Koekappaleet kuivattiin uunissa ja punnittiin vaakalla Kern EAW4200-2NM, jonka tarkkuus on $\pm 0,01$ g. Koekappaleiden tiheydet ja kosteusprosentti on esitetty taulukossa 4.3.



Kuva 4.13. Leikkauskoekappaleiden kuormitusohjelma (SFS-EN 380).



Kuva 4.14. Koekappaleen L02-3 tyssäntyminen eli puun puristusmurto.

4.2.5 Tulokset

Liitteessä 1 esitetään kappalekohtaisesti murtokuormat, liimasaumojen murtohetken leikkausjännitykset, keskimmäiseen lamelliin muodostunut puun syyn suuntainen puristusjännitys sekä murtotapa.

Puun puristusmurto oli syynä 9 koekappaleen murtoon 12:sta (ks. kuva 4.14). Näin ol- len 3 koekappaletta murtui leikkaantumalla liimasauman vierestä. Näistä yksi oli liimat- tu polyuretaaniliimalla. Koekappaleiden kosteus oli taulukon 4.3 mukaan 15,7–16,4 % eli kohtuullisen korkea. Pontillisen vaihtoehdon puristusjännitykset olivat hieman suu- rempia kuin suoralla saumalla varustetun kappaleen arvot.

Taulukkoon 4.2 on koottu murtohetkellä liimasaumoissa esiintyneiden leikkausjännitys- ten keskiarvot ja hajonnat.

Taulukko 4.2. Liimasaumojen murtoa vastaavien suurimpien leikkausjännitysten keskiarvot.

Sauma- tyyppi	PUR kaikki	MUF kaikki	pontti- sauma	suora sauma	suora + MUF	pontti + MUF	suora + PUR	pontti + PUR
τ [N/m ²]	5,08	4,76	5,02	4,82	4,67	4,86	4,98	5,18
Keski- hajonta	0,50	0,29	0,45	0,42	0,05	0,43	0,59	0,50

Ominaisarvot m_k voidaan laskea kaavasta (1)

$$m_k = e^{(\bar{y} - k_s s_y)}, \quad (1)$$

missä satunnaisuureen $y = \ln m$ keskiarvo \bar{y}

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln m_i. \quad (2)$$

Satunnaisuureen $\ln m$ standardihajonta s_y

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln m_i - \bar{y})^2} \quad (3) \text{ ja}$$

$k_s = 2,06$ taulukosta 1, luku 4 (SFS EN 14358).

Suorien polyuretaanisaumojen leikkausjännitysten ominaisarvoksi saatiin

$$f_{v,k} = 4,08 \text{ N/mm}^2.$$

Arvo ylittää SFS-EN 338:n sahatavaran lujuusluokan C30 leikkauslujuuden ominaisarvon $3,0 \text{ N/mm}^2$ 36 %:lla ja liimapuutavaran lujuusluokan GL28c vastaavan arvon $2,7 \text{ N/mm}^2$ 51 %:lla.

Leikkauskokeessa murtohetkellä esiintyneiden puristusjännitysten (liite 1) ominaisarvoksi $f_{c,0,g,k}$ saatiin edellä olevalla kaavalla

$$f_{c,0,g,k} = 21,96 \text{ N/mm}^2.$$

Arvo ylittää SFS-EN 338:n lujuusluokan C24 puristuslujuuden ominaisarvon 21 N/mm^2 4,5 %:lla, mutta alittaa lujuusluokan C30 vastaavan arvon 23 N/mm^2 4,5 %:lla sekä lujuusluokkien GL24h ja GL24C puristuslujuuden ominaisarvon 24 N/mm^2 8,5 %:lla.

Taulukossa 4.3 on esitetty leikkauskoeleikkokappaleiden tiheydet ja kosteusprosentit sekä niiden keskiarvot ja -hajonnat.

Taulukko 4.3. Leikkauskoekappaleiden tiheydet sekä kosteusprosentit.

Liima	kpl	kg/m ³	kosteus - %
PUR	L01-1	547,7	16,0
	L02-1	445,2	16,0
	L01-2	404,2	16,4
	L02-2	412,0	15,8
	L01-3	420,0	16,2
	L02-3	481,0	15,7
MUF	L01-1	407,5	16,0
	L02-1	397,6	15,7
	L01-2	439,0	16,3
	L02-2	460,4	15,9
	L01-3	434,9	16,4
	L02-3	467,2	15,9
Keskiarvo		443,1	16,0
Keskihajonta s		42,32	0,25

Koska kosteus ylittää 12 %, pienennetään tiheyttä SFS-EN 384 -standardin mukaisesti 2 %. Tiheyden ominaisarvo laskettiin keskiarvosta kaavalla

$$\rho_{05} = (\bar{\rho} - 1,65s), \quad (4)$$

josta saatiin 5 %:n ominaistiheydeksi

$$\rho_{05} = 364,4 \text{ kg/m}^3.$$

Arvo ylittää SFS-EN 338:n lujuusluokan C24 tiheyden ominaisarvon 4,1 %:lla, mutta alittaa lujuusluokkien C30 ja GL28c vastaavan arvon 4,1 %:lla. Leikkauskokeissa käytetty sahatavara täytti puristuslujuuden ja tiheyden osalta sahatavaran C24 ominaisarvot.

4.2.6 Päätelmät

Liitteen 1 sivulla 1/7 taulukossa on kuvattu myös kappaleiden murtumistavat. Puun puristusrutto oli syynä 9 koekappaleen ruttoon 12:sta (ks. kuva 4.14). Näin ollen 3 koekappaletta murtui leikkaantumalla liimasauman vierestä. Näistä yksi oli liimattu polyuretaaniliimalla. Koekappaleiden kosteus oli taulukon 4.3 mukaan 15,7–16,4 % eli korkeahko. Sopiva kosteus olisi ollut noin 12 %. Puun puristuslujuus pienentyi korkeahkon kosteuspitoisuuden vuoksi. Samoin taulukosta voidaan havaita, että mikään koekappale ei murtunut suoraan liimasaumasta. Lasketut lujuuksien ominaisarvot osoittavat, että puristusrutto on ollut todennäköisempi kuin leikkausrutto.

Liimasauman vaatimukseksi oli asetettu, että sen on oltava lujempi kuin yhteen liimatujen puuosien leikkauskestävyys. Näiden kuormituskokeiden perusteella voidaan todeta, että molemmilla käytetyillä liimoilla ja molemmilla saumatyypeillä sekä käytetyillä liimausmenetelmällä saadaan aikaan riittävän luja liitos niin, että kappale toimii yhte-

näisenä rakenteena. Polyuretaaniliiman etu on sen 1-komponenttisuus. Puristusaika polyuretaaniliimalla on 90-120 minuuttia. 2-komponenttisilla melamiiniureaformaldehydi-liimoilla puristusaika on 6 tuntia, kun kovettajan osuus on 20 % liimasta, mutta kovettajaa lisäämällä puristusaikaa voidaan lyhentää. Polyuretaaniliima mahdollistaa jopa 4-kertaisen tuotannon kovettumisnopeutensa ansiosta perinteisiin liimoihin nähden.

Koska koetuloksissa ei havaittu olevan suuria eroja eri saumatyyppien välillä, sauman urittaminen todettiin tarpeettomaksi. Murtokuormissa vaihtelu oli vähäistä. Osa mуроista tapahtui puristusmurtona, osa leikkausmurtona. Tulosten käsittelyssä mурrot on tulkittu tapahtuneeksi leikkausmurtoina. Leikkauskokeet osoittivat, että liimasauma kestää enemmän kuin puu.

Murtotavasta voidaan todeta, että koekappaleiden murtuminen osittain puristusmurtona johtui korkeahkosta kosteuspitoisuudesta. Mikäli puun kosteus olisi ollut hieman pienempi, murtuminen olisi tapahtunut puun leikkausmurtona.

Leikkauskokeiden tuloksena päädyttiin käyttämään taivutuskokeissa 1-komponenttista polyuretaaniliimaa Kestopur 1030 ja suoraa liitossaumaa.

4.3 Taivutuskokeet

4.3.1 Tarkoitus

Taivutuskokeilla oli tarkoituksena tutkia liimattujen 2- ja 3-lamellisten sahatavarapalkkien kestävyyttä. Vertailuarvoja 2-lamelliselle palkille haettiin taivuttamalla niiden kanssa samankorkuisia 1-lamellisia palkkeja täyspitkinä eli jännevälillä mittaisina ja sormijatkettuina. Koejärjestelyillä pyrittiin saamaan selville lamellien ja sormijatkosten vaikutus kestävyteen. Samalla tutkittiin, voiko keskilamellisissa käyttää heikomman lujuusluokan puuta kuin reunalamelleissa, kuten liimapuupalkeissa yleensä tehdään.

4.3.2 Koekappaleet, dimensiot ja laatu

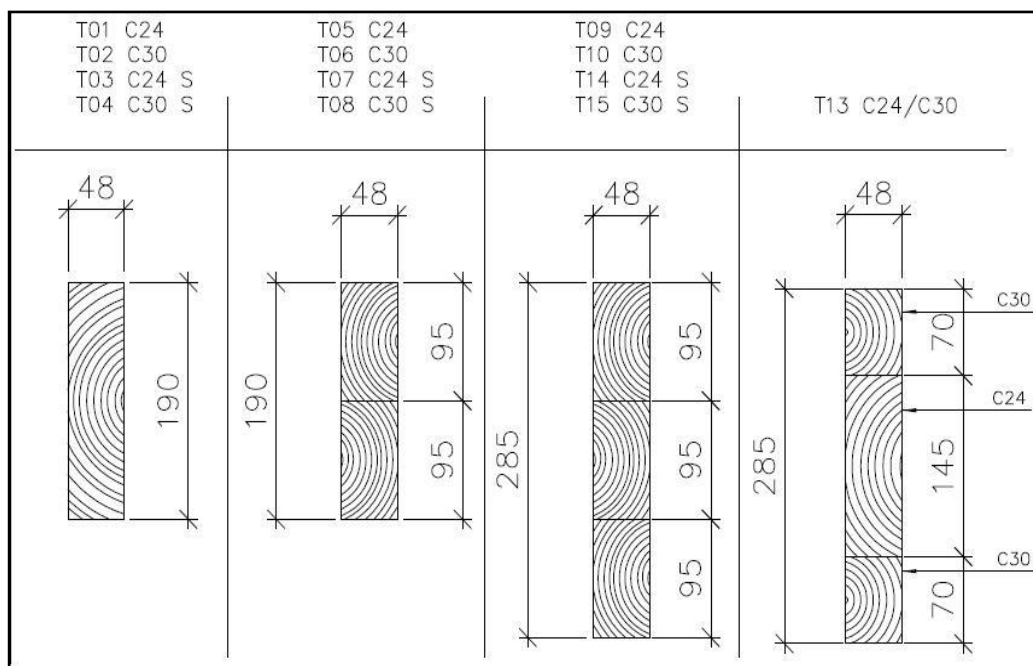
2-lamellisen palkin osalta poikkileikkauksiksi valittiin 195 mm x 45 mm ja 3-lamellisten osalta 285 mm x 45 mm. Puumateriaalina on käytetty kuusta. Palkit valmistettiin lujuusluokkiin C24 ja C30 lajitellusta sahatavarasta. Koestaminen aloitettiin tutkimalla jatkamattoman lankun kestävyyttä (ryhmät T01 ja T02). Lankun poikkileikkauksen koko oli 195 mm x 45 mm. Seuraavaksi testattiin samankokoiset palkit sormijatkettuina (ryhmät T03 ja T04). Tämän jälkeen testattiin samankokoiset palkit 2-lamellisina: ensin täyspitkinä (ryhmät T05 ja T06) ja sitten sormijatkettuina (ryhmät T07 ja T08). Testeillä pyrittiin selvittämään 2-lamellisuuden ja sormijatkosten vaikutusta kestävyysiin. 3-lamellisista palkeista testattiin ensimmäiseksi täyspitkät palkit (ryhmät T09 ja T10). Sen jälkeen testattiin samankorkuiset 3-lamelliset sormijatkettut palkit (ryhmät T14 ja T15).

Viimeisenä ryhmänä testattiin 3-lamellinen palkki, jonka keskiosa oli lujuusluokkaa C24 ja reunaosat lujuusluokkaa C30 (ryhmä T13). Jännevälinä käytettiin matalammilla palkeilla $l = 3420$ mm (18 x h). Palkin kokonaispituus oli $L = 3610$ mm (19 x h). Korkeimmilla palkeilla jänneväli oli $l = 4275$ mm (15 x h) ja palkin kokonaispituus $L = 4560$ mm (16 x h).

Kuvassa 4.15 on esitetty koekappaleet poikkileikkausmittoineen ja tunnuksineen. Tunnuksen perässä mainitaan, minkä lujuusluokan puuta koekappaleessa on käytetty. Jokaisesta palkkityypistä valmistettiin viisi kappaletta sekä täysmittaisina että sormijatkettuina (s) paitsi kahdesta lujuusluokasta valmistettua palkkiryhmää (T13), jota tehtiin vain sormijatkamattomana.

Taivutuskokeet suoritettiin standardien SFS-EN 380 ja 408 mukaisesti. Kosteuspitoisuudet määritettiin standardin SFS-EN 13183-1 mukaan.

Kosteuspitoisuuksien ja tiheyksien määrittämiseksi testipalat mitattiin digitaalisella työntömitalla, jonka tarkkuus on $\pm 0,03$ mm. Testipalat punnittiin vaa'alla Kern EW4200-2M, jonka punnitustarkkuus on $\pm 0,01$ g. Testipalat kuivattiin uunissa MI-NO/100/F/acrylic, jonka tarkkuudeksi on vertailumittauksissa todettu $+ 105$ °C:n lämpötilassa ± 2 °C.



Kuva 4.15. Taivutuskoe-kappaleiden poikkileikkaukset tunnuksineen.

4.3.3 Koekappaleiden liimaus

Koekappaleisiin T01–T10 ja T13 käytetty lujuuslajiteltu puutavara hankittiin liimapuu-tuotteiden valmistajalta Late Oy:ltä Turusta. Puutavaran kosteus oli tällöin liimapuu-valmistajan tuotannossaan käyttämä 9–13 %. Sormijatkokset teki Yläpuu Oy Yläneellä. Nämä sormijatkokset olivat lappeen suuntaisia. Liimana käytettiin samaa polyuretaaniliimaa kuin lamellien liimaamiseen. Koekappaleisiin T14 ja T15 käytetty sormijat-

kettu puutavara hankittiin lujuuslajiteltuna Puumerkki Oy:ltä. Sormijatkokset oli tehty lyhyemmän sivun suuntaisina, ja niissä oli käytetty Casco Adhesives Ab:n MUF-liimaa 1247/2656. Kaksi palkkia jouduttiin hylkäämään valmiiksi murtuneiden sormijatkosten vuoksi. T14-ryhmän lujuusluokan C24 osalta murtokuormat jäivät alhaisiksi ja kimmo-moduulit alle standardin määrittelemien arvojen.

Koekappaleet valmistettiin vuoden 2009 syksyllä Alastarolla M. Karosen sahalla, jonka tärkein tuote on liimahirsien ja liimahirsimökkien valmistus. M. Karosen saha käyttää liimahirsien valmistukseen samaa Kestopur 1030 -liimaa, mihin tässä tutkimuksessakin päädyttiin. Palkkien valmistajalla oli siis käytössään välineet liimaukseen ja laitteet riittävän puristuspuheen aikaansaamiseksi. Yrityksellä oli myös osaamista sekä sormijatkosten teossa että polyuretaanilla liimaamisessa.

Kappaleet valmistettiin liiman valmistajan ohjeita noudattaen siten, että puristusaika ja puristuspuhe olivat riittäviä. Valmistus suoritettiin tilassa, jossa ilmankosteutta ei pystytty säätelemään. Palkkien kosteudet pyrittiin saamaan liiman valmistajan ohjeiden mukaisiksi. Tilassa oli lattialämmitys. Tilan lämpötila oli + 18 °C.

Rakenteelliseen käyttöön tarkoitettujen sormijatkettujen sahatavaran valmistaminen on myös luvanvaraista toimintaa. Tällaisessa sahatavarassa tulee olla tuotestandardin mukainen sormijatkamisesta kertova leima. Muutamat palkeissa käytetyt sormijatkokset poikkesivat oksien ja sormijatkosten välisen etäisyyden suhteen SFS-EN 385 -standardin ohjeista. Oja ja Häggström ovat tutkimuksissaan (2009) osoittaneet, että lähellä sormijatkosta olevilla reunaoksilla tai lähellä reunaa olevilla oksilla on heikentävä vaikutus taivutuskestävyyteen.

4.3.4 Koejärjestelyt

Koekappaleita säilytettiin tilassa, jonka suhteellista kosteutta ja lämpötilaa pystyttiin säätämään. Suhteellisen kosteuden tavoitetaso oli 65 %, vaihteluväli ± 5 % sekä lämpötilan tavoitetaso + 20 °C ja vaihteluväli ± 2 °C. Näitä arvoja seurattiin Vaisala HM I41 -mittalaitteella ja Vaisala HM P42 -anturilla, joiden suhteellisen kosteuden mittaustarkkuudeksi on annettu ± 3 % ja lämpötilan $\pm 0,3$ °C.

Koekappaleet kuormitettiin Matertest Oy:n valmistamalla kuormituslaitteella FMT-SS-ST, jonka puristusvoima on 450 kN sekä tarkkuus voiman osalta $\pm 0,15$ % ja siirtymän suhteen $\pm 0,41$ %. Siirtymämittaukset suoritettiin antureilla Gefran PY-2-C-100, joiden tarkkuus on $\pm 0,1$ %.

Kuormituskaavio toteutettiin EN 380:1993 -standardin kohdan 6.5.2 mukaan, joka on esitetty kuvassa 4.16. Kuormittavat voimat laskettiin puurakenteiden suunnitteluohjeiden (RIL 205-1-2009) kuormille niin, että ne vastasivat palkin käyttötilannetta. Kuormia laskettaessa palkkiväliksi oletettiin 0,6 m, välipohjarakenteen painona G_2 käytettiin $0,6 \text{ kN/m}^2 + 0,3 \text{ kN/m}^2$ ja tasaisena kuormana $Q = 2,0 \text{ kN/m}^2$. Koepalkkien T01–T08 pituudet olivat 3,61 m ja koepalkkien T09–T15 4,56 m. Kuormiksi G_2 saatiin $G_2 = 3,61$

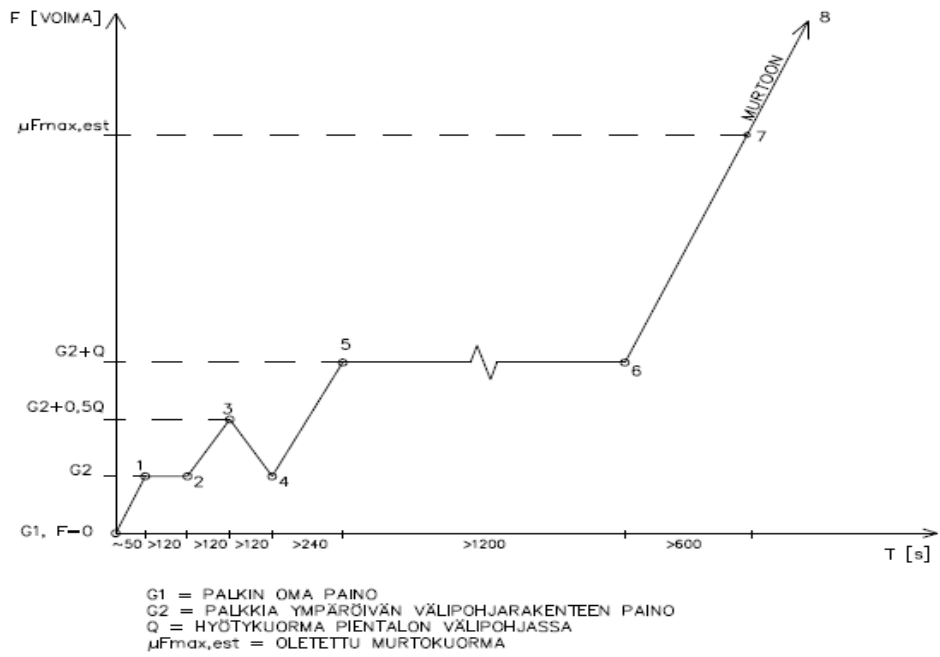
$m \times 0,6 \text{ m} \times 0,9 \text{ kN/m}^2 = 1,95 \text{ kN}$ ja pitemmille palkeille vastaavasti $2,46 \text{ kN}$. Tasaisesta kuormasta saatiin lyhyemmille palkeille kuormaa $Q = 3,61 \text{ m} \times 0,6 \text{ m} \times 2,0 \text{ kN/m}^2 = 4,33 \text{ kN}$ ja pitemmille palkeille vastaavasti $Q = 5,47 \text{ kN}$. Kokonaispistekuorma lyhyemmille palkeille oli näin ollen $F = G_2 + Q = 6,28 \text{ kN}$ ja pitemmille palkeille $F = 7,93 \text{ kN}$.

Taulukossa 4.4 on esitetty kuormituksen vaiheet ja vaiheiden vähimmäiskestot, joiden mukaan kuormitusnopeus määräytyi. Palkin mitat ja asettelu taivutuslaitteistoon järjestettiin SFS-EN 408 -standardin kohdan 10 mukaan. Kaikki palkit oli tuettu päistään ja kahdesta kohtaa keskialueelta kiepahdusta vastaan kuitenkin niin, että kappaleet pääsivät kuormituksen suunnassa vapaasti liikkumaan. Kitkaa palkin ja kiepahdustukien välillä pienennettiin asentamalla palkin ja kiepahdustuen väliin 100 mm leveät muottivanerisuikaleet. Kuormitusjärjestelyt on esitetty kuvassa 4.17. Kuvassa 4.18 on koekappale valmiina kuormitettavaksi. Kaikkien koekappaleiden puristusvoima-siirtymätulokset on esitetty kuvaajina liitteessä 2. Taivutuskokeiden tulokset yksittäisille koekappaleille on esitetty liitteessä 4, jossa on esitetty myös kunkin koekappaleen murtotapa ja -kohta. Taivutuksen jälkeen koekappaleista otettiin näytepala, josta määritettiin palkin kosteuspitoisuus SFS-EN 13183-1 -standardin mukaisesti sekä tiheys SFS-EN 408 -standardin kohdan 6 mukaisesti. Tulokset löytyvät liitteestä 5.

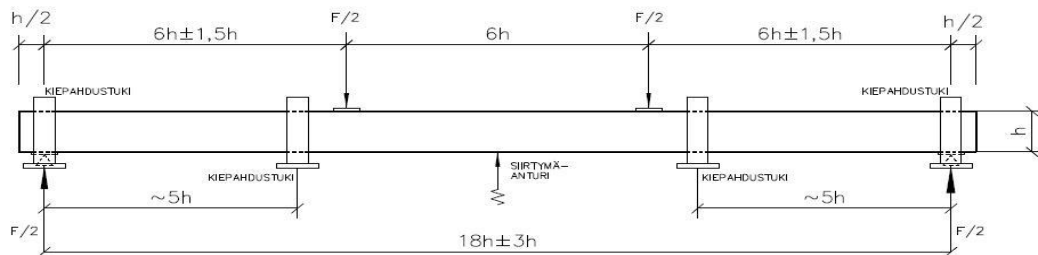
Liimasauman paksuutta mitattiin varsinaisten taivutuskokeiden jälkeen muutamasta ylimääräisestä palkista Semtec Oy:n halkeamamittausmikroskoopilla C 218, jonka tarkkuus on $0,02 \text{ mm}$. Sauman paksuudeksi saatiin yleisesti $0,1 \text{ mm}$. Liimasauman reunassa oli höylän halkaisemia ilmakuplia, mutta myös kohtia, joista liima oli jäänyt pois. Ilmakuplien läpimitta vaihteli $0,1 \text{ mm:n}$ ja $0,03 \text{ mm:n}$ välillä.

Taulukko 4.4. Kuormitusohjelma taivutuskokeissa (SFS-EN 380).

Vaihe	Kuvaus	Aika [s]*
0	G_1	
0-1	Lisäys $F = G_2$	
1-2	Pito $F = G_2$	≥ 120
2-3	Lisäys $F = G_2 + 0,5Q$	≥ 120
3-4	Poisto $F = G_2$	≥ 120
4-5	Lisäys $F = G_2 + Q$	≥ 240
5-6	Pito $F = G_2 + Q$	≥ 1200
6-7	Lisäys kunnes $F = \mu F_{\max,est}$	≥ 600
7-8	Lisäys murtoon	
Aika [s] = vaiheeseen käytettävä vähimmäisaika		



Kuva 4.16. Kuormituskaavio taivutuskokeisiin (SFS-EN 380).



Kuva 4.17. Kuormitusjärjestelyt taivutuskokeissa (SFS-EN 408).



Kuva 4.18. Koekappale T01C24-1 taivutuslaitteistossa.

4.3.5 Yhteenveto taivutuskokeiden tuloksista

Taulukossa 4.5 on esitetty taivutuskokeiden keskiarvotulokset: kunkin palkkiryhmän murtovoimat, taivutuslujuudet murrossa, murtoa vastaavan taivutuslujuuden ja standardin ominaistaivutuslujuuden suhde, kimmomoduulien keskiarvot ja murtoa vastaavat taipumat. Taulukosta käy ilmi myös koekappaleiden määrät, palkin lamellien määrä sekä se, onko palkki sormijatkettu.

Taulukko 4.5. Taivutuskokeiden keskiarvotulokset palkkiryhmittäin.

Palkin tunnus	F_{\max} [kN]	f_m [N/mm ²]	$f_m/f_{m,k}$	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	w_{\max} [mm]	Kuvaus
T01C24	20,8	43,6	1,8	11572,1	63,4	4 kpl 1-lamellinen
keskihajonta	4,3	9,3	0,4	1617,0	7,7	
T02C30	26,4	55,3	1,8	12846,0	85,3	5 kpl 1-lamellinen
keskihajonta	3,0	6,6	0,2	1310,1	9,3	
T03C24	19,7	41,3	1,7	12924,3	49,4	5 kpl Sormijatkos 1-lamellinen
keskihajonta	3,8	7,9	0,3	1651,8	12,5	
T04C30	17,4	36,7	1,2	13036,4	41,6	5 kpl Sormijatkos 1-lamellinen
keskihajonta	1,3	2,5	0,1	1545,3	5,1	
T05C24	21,9	45,2	1,9	13305,7	60,0	5 kpl 2-lamellinen
keskihajonta	2,3	4,7	0,2	1406,7	14,9	
T06C30	21,4	44,1	1,5	12302,3	55,0	5 kpl 2-lamellinen
keskihajonta	3,7	7,6	0,3	702,9	12,1	
T07C24	18,8	38,7	1,6	13854,7	39,5	5 kpl Sormijatkos 2-lamellinen
keskihajonta	1,6	3,4	0,1	814,1	6,2	
T08C30	19,8	40,8	1,4	13286,8	49,9	5 kpl Sormijatkos 2-lamellinen
keskihajonta	4,9	10,1	0,3	2117,3	15,6	
T09C24	45,0	47,6	2,0	12695,2	61,4	4 kpl 3-lamellinen
keskihajonta	6,9	8,2	0,3	1348,1	11,0	
T10C30	46,6	48,3	1,6	12611,5	63,8	5 kpl 3-lamellinen
keskihajonta	6,9	7,4	0,2	718,9	12,8	
T13C24/C30	43,3	44,7	1,5	11748,2	55,7	4 kpl 3-lamellinen
keskihajonta	13,5	14,1	0,5	1197,5	18,4	

Palkin tunnus	F_{max} [kN]	f_m [N/mm ²]	$f_m/f_{m,k}$	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	w_{max} [mm]	Kuvaus
T14C24	28,4	30,2	1,3	10765,1	47,0	4 kpl Sormijatkos 3-lamellinen
keskihajonta	1,9	2,0	0,1	753,1	4,0	
T15C30	39,7	42,6	1,4	12152,0	60,0	5 kpl Sormijatkos 3-lamellinen
keskihajonta	4,3	4,5	0,2	667,0	6,8	

Murtoa vastaava **taivutuskestävyys** f_m on laskettu kaavasta

$$f_m = \frac{aF_{max}}{2W}, \quad (5)$$

missä

a on kuormituspisteen etäisyys lähimmältä tuelta,

F_{max} on murtovoima,

W on kappaleen taivutusvastus ja

w_{max} taipuma murtohetkellä.

Yleinen kimmokerroin $E_{m,g}$ on laskettu kaavasta (SFS-EN 408)

$$E_{m,g} = \frac{l^3(F_2 - F_1)}{bh^3(w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right], \quad (6)$$

missä

$F_2 - F_1$ on kuorman suoraviivainen lisäys kuormitus–muodonmuutos-käyrällä (kuva 5.19). F_2 ja F_1 on otettu kimmoiselta alueelta väliltä $0,1F_{max} - 0,4F_{max}$. Korrelaatiokerroin oli $\geq 0,99$,

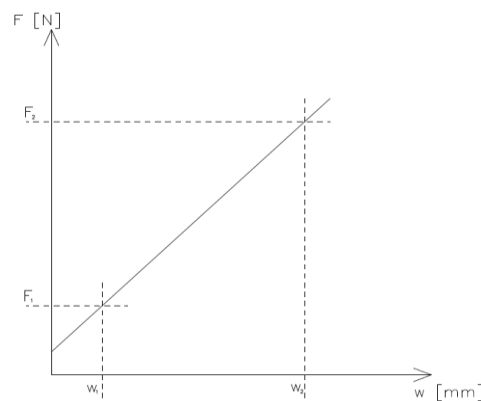
$w_2 - w_1$ on voimien muutosta $F_2 - F_1$ vastaava palkin taipuman lisäys (kuva 4.19),

a on kuormituspisteen etäisyys lähimmältä tuelta,

b on poikkileikkauksen leveys,

h on poikkileikkauksen korkeus ja

l on etäisyys tuen keskeltä tuen keskelle.



Kuva 4.19. Kuormitus–muodonmuutos-kuvaaja (SFS-EN 408).

Liitteessä 4 on esitetty koekappalekohtaiset murtokuormat, taivutuskestävyydet, yleiset kimmomoduulit sekä koekappaleen murtotapa ja -kohta. Liitteessä 5 on esitetty yksittäisten kappaleiden poikkileikkausmitat palkeista otettujen koepalojen perusteella, SFS-EN 408 -standardin kohdan 7 mukaisesti määritetyt kappaleiden tiheydet sekä SFS-EN 13183-1 -standardin mukaisesti määritetyt kosteusprosentit.

Liitteen 4 koestamalla saaduista koekappaleiden yleisistä kimmomoduuleista $E_{m,g}$ (seuraavassa kaavassa E_i) on laskettu aluksi koepalkkiryhmiä kimmomoduulien keskiarvot \bar{E} (SFS-EN 384):

$$\bar{E} = \left[\sum \frac{E_i}{n} \right] * 1,3 - 2690. \quad (7)$$

Kimmomoduuleja korjattiin kosteuden huomioon ottavalla kertoimella. Syiden suuntaisen kimmoisuuden keskiarvomoduuli saatiin lausekkeella

$$E_{0,mean} = \frac{\sum \bar{E}_j n_j}{\sum n_j}, \quad (8)$$

missä

\bar{E}_j on ryhmän j kimmomoduulin keskiarvo ja
 n_j on ryhmän j koekappaleiden lukumäärä.

Syiden suuntaisen kimmomoduulin 5 %:n ominaisarvo saatiin lausekkeella

$$E_{0,05} = 0,67 E_{0,mean} \quad (9)$$

Ominaislujuuksien $E_{0,mean}$ ja $E_{0,05}$ vaatimukset ovat taulukoituja arvoja (sahatavaralla SFS-EN 338 ja liimapuulla SFS-EN 1194).

Tiheydet ρ on laskettu SFS-EN 408 -standardin kaavasta

$$\rho = \frac{m_1}{V_1}, \quad (10)$$

missä

ρ on koekappaleen tiheys koestushetken kosteudessa kg/m^3 ,
 m_1 on koepalan massa koestushetken kosteudessa kilogrammoina ja
 V_1 on koepalan tilavuus koestushetken kosteudessa kuutiometreinä.

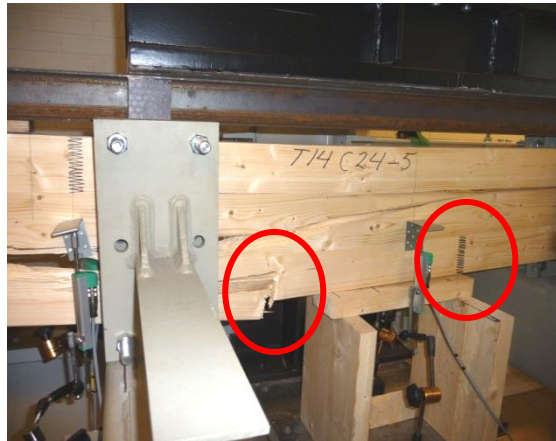
Koekappaleiden kosteusprosentit ω määritettiin seuraavasti (SFS-EN 13183-1):

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} * 100, \quad (11)$$

missä

ω on koekappaleen kosteussisältö prosentteina,
 m_1 on koepalan massa ennen kuivatusta grammoina ja
 m_0 on koepalan massa sähköuunikuivatuksen jälkeen grammoina.

Taivutuskokeiden tulokset koekappaleittain on esitetty liitteessä 2 voima–siirtymä–käyrinä kuormitusohjelmineen.



Kuva 4.20. Koekappale T14 C24-5 murtoon taivutettuna. Murto on alkanut syrjäöksasta, jonka etäisyys keskeltä on 0,4 m. Sormijatkos on ehjä, ja sen etäisyys keskeltä on 0,15 m.



Kuva 4.21. Koekappale T15 C30-2 taivutettuna murtoon. Murto alkanut sormijatkoksesta, joka on 0,1 m palkin keskikohdasta.



Kuva 4.22. Saman koekappaleen murtunut sormijatkos.

4.3.6 Päätelmät

Taivutuslujuudet

Taulukkoon 4.6 on koottu taivutuslujuuksien keskiarvot täyspitkille ja sormijatketuille palkeille sekä 1-, 2- että 3-lamellisina poikkileikkauksina molemmissa lujuusluokissa. Taulukkoon 4.7 on laskettu vastaavat taivutuslujuuksien ominaisarvot kohdan 4.2.5 kaavoilla. Koekappaleiden lukumäärän huomioon ottavana kertoimena on käytetty arvoa $k_s = 2,46$.

Taulukko 4.6. Taivutuslujuuksien keskiarvot, lamellisuus ja sormijatkaminen [N/mm^2].

Lamellisuus	Täyspitkä C24	Sormijatkettu C24	Täyspitkä C30	Sormijatkettu C30
1-lamellinen	43,6	41,3	55,3	36,7
2-lamellinen	45,2	38,7	44,1	40,8
3-lamellinen	47,6	30,2	48,3	42,6

Taulukko 4.7. Taivutuslujuuksien ominaisarvot $f_{m,k}$, lamellisuus ja sormijatkaminen [N/mm^2].

Lamellisuus	Täyspitkä C24	Sormijatkettu C24	Täyspitkä C30	Sormijatkettu C30
1-lamellinen	25,8	24,9	41,5	30,8
2-lamellinen	35,2	31,3	28,7	22,0
3-lamellinen	31,0	25,6	33,7	32,9

Koestuksessa sijoitettiin yksi sormijatkos alimpaan lamelliin alueelle, jossa taivutusrasitus oli suuri. Palkit murtuivat yleensä joko alimman lamellin syrjäöksen tai sormijatkoksen kohdalta.

Kaikki muut palkkiryhmiä ominaistaivutuslujuudet ylittivät standardien vastaavat vaatimukset paitsi 2-lamellisten palkkiryhmiä lujuusluokan C30 ryhmät sekä täyspitkinä että sormijatkettuina. Täyspitkien palkkien ominaistaivutuslujuudeksi saatiin $28,7 \text{ N/mm}^2$ ja sormijatkettujen $22,0 \text{ N/mm}^2$. Vaatimus taulukon 3.2 mukaan on 30 N/mm^2 . Täyspitkien ryhmän kaikkien palkkien murto alkoi syrjäöksen kohdalta. Sormijatkettuisissa 2-lamellisissa palkeissa murto alkoi kahdessa tapauksessa oksan kohdalta ja kolmessa tapauksessa sormijatkoksen kohdalta.

3-lamellisten palkkien ominaistaivutuslujuudet ylittivät standardin vaatimukset. Sormijatkettujen C24-sahatavarasta valmistettujen palkkien ominaistaivutuslujuudeksi saatiin $25,6 \text{ N/mm}^2$, mikä ylittää sekä sahatavaran lujuusluokan C24 että liimapuulujuusluokan GL24 vaatimuksen, joka on molemmille 24 N/mm^2 .

Sahatavarasta C30 valmistettujen 3-lamellisten palkkien ominaistaivutuslujuudeksi saatiin $32,9 \text{ N/mm}^2$, mikä ylittää sekä C30-lujuusluokan vaatimuksen 30 N/mm^2 että

GL28-liimapuulujuusluokkien vaatimuksen 28 N/mm^2 ja GL32:n vaatimuksen 32 N/mm^2 .

Sormijatkaminen

Sormijatketuista lujuusluokan C24 koekappaleista (15 kpl) taivutusmurto tapahtui oksan kohdalta 9 kertaa ja 5 kertaa sormijatkoksen kohdalta. Yksi koekappale hylättiin. Vastaavat luvut lujuusluokan C30 sormijatketuille koekappaleille (16 kpl) olivat murtuminen oksan kohdalta 6 kertaa ja sormijatkoksen kohdalta 9 kertaa. Yksi koekappale hylättiin.

1- ja 3-lamellisissa sormijatketuissa palkeissa ominaislujuudet ovat suurempia kuin standardin vaatimukset. Myös 2-lamellisessa sormijatketuissa lujuusluokan C24 palkissa ominaislujuus on standardin vaatimusta suurempi.

2-lamellisten lujuusluokan C30 palkkien koestuksen tuloksena saatu ominaislujuus alittaa täyspitkien palkkien osalta 4,3 % ja sormijatkettujen palkkien osalta 26,7 % standardin vaatimuksen.

Kimmomoduulit

Taulukko 4.8. Palkkiryhmiä korjatut kimmomoduulien keskiarvot \bar{E} , lamellisuus ja sormijatkaminen [N/mm^2].

Lamellisuus	Täyspitkä C24	Sormijatk. C24	Täyspitkä C30	Sormijatk. C30
1-lamellinen	12353	14111	14009	14257
2-lamellinen	14607	15321	13303	14582
3-lamellinen	13813	11304	13704	13107

Kohdan 4.3.5 kaavoilla laskettiin ryhmien keskiarvomoduuleista syiden suuntaisen kimmoisuuden keskiarvomoduulit $E_{0,\text{mean}}$ ja näistä arvoista edelleen 5 %:n ominaisarvot $E_{0,05}$ kosteuskorjaus huomioon ottaen.

Lujuusluokan C24 sahatavarasta liimatuille palkeille (SFS-EN 384) saatiin arvot

$$E_{0,\text{mean}} = 13981 \text{ N/mm}^2 \text{ ja } E_{0,05} = 9367 \text{ N/mm}^2$$

sekä

lujuusluokan C30 sahatavarasta liimatuille palkeille (SFS-EN 384) arvot

$$E_{0,\text{mean}} = 14104 \text{ N/mm}^2 \text{ ja } E_{0,05} = 9449 \text{ N/mm}^2.$$

$E_{0,05}$ laskettiin standardin SFS-EN 384 kaavalla $E_{0,05} = 0,67 E_{0,\text{mean}}$.

Standardin SFS-EN 338 mukaiset vastaavat ominaisarvovaatimukset ovat sahatavaralle C24

$$E_{0,\text{mean}} = 11000 \text{ N/mm}^2 \text{ ja } E_{0,05} = 7400 \text{ N/mm}^2.$$

Sahatavaralle C30 standardin ominaisarvovaatimukset ovat

$$E_{0,\text{mean}} = 12000 \text{ N/mm}^2 \text{ ja } E_{0,05} = 8000 \text{ N/mm}^2.$$

Sahatavarana mitoitettaessa taivutustesteistä saadut ominaislujuuksien arvot kimmomoduuleille täyttyvät hyvin.

Jos mitoituksessa käytetään liimapuun lujuusluokkia, 5 %:n ominaisarvo $E_{0,05}$ voidaan laskea SFS-EN 1194 -standardin mukaan lausekkeella $E_{0,05} = 0,85 E_{0,\text{mean}}$. Tällöin taivutuskokeista saadaan sahatavarasta C24 valmistetuille palkeille

$$E_{0,\text{mean}} = 13981 \text{ N/mm}^2 \text{ ja } E_{0,05} = 11883 \text{ N/mm}^2$$

ja lujuusluokan C30 sahatavarasta valmistetuille palkeille

$$E_{0,\text{mean}} = 14104 \text{ N/mm}^2 \text{ ja } E_{0,05} = 11988 \text{ N/mm}^2.$$

Liimapuun lujuusluokalle GL24h ominaisarvovaatimukset ovat

$$E_{0,\text{mean}} = 11600 \text{ N/mm}^2 \text{ ja } E_{0,05} = 9400 \text{ N/mm}^2,$$

ja lujuusluokalle GL28c vastaavat vaatimukset ovat

$$E_{0,\text{mean}} = 12600 \text{ N/mm}^2 \text{ ja } E_{0,05} = 10200 \text{ N/mm}^2.$$

Taivutustesteissä saadut kimmomoduulien arvot ylittävät standardissa liimapuun lujuusluokille GL24h ja GL28c annetut vaatimukset.

Tiheydet

Taulukko 4.9. Tiheyksien keskiarvot, lamellisuus ja sormijatkaminen [kg/m^3].

Lamellisuus	Täyspitkä C24	Sormijatk. C24	Ka C24	Täyspitkä C30	Sormijatk. C30	Ka C30
1-lamellinen	424,6	446,6	435,6	431,4	422,3	426,8
2-lamellinen	457,3	469,8	463,5	454,8	457,8	456,3
3-lamellinen	461,8	414,5	438,1	468,3	469,4	468,8
Ka			445,7			450,6

Lujuusluokan C24 palkkien ominaistiheydeksi korjauskertoimella $k_s = 1,88$ saatiin

$$\rho_{g,k} = 383,8 \text{ kg/m}^3.$$

Tämä arvo on suurempi kuin standardin lujuusluokan C24 arvo 350 kg/m^3 ja suurempi kuin lujuusluokan GL24h arvo 380 kg/m^3 .

Lujuusluokan C30 palkkien ominaistiheydeksi korjauskertoimella $k_s = 1,87$ saatiin

$$\rho_{g,k} = 391,0 \text{ kg/m}^3.$$

Tämä arvo on suurempi kuin standardin lujuusluokkien C30 ja GL28c arvo 380 kg/m^3 , mutta se ei täytä lujuusluokan GL28h vaatimusta 410 kg/m^3 .

Tässä tutkimuksessa saadut tiheyksien keskiarvot vastaavat hyvin Metsäntutkimuslaitos Metlan tuloksia (Verkasalo ym. 2007). Tutkijat ovat saaneet kuusisahatavaran tiheyksien keskiarvoksi Länsi-Suomessa $441 \text{ kg/m}^3 \pm 30 \text{ kg/m}^3$, kun puutavaran kosteus on ollut 12 %.

Taipumat

Taulukossa 4.10 on esitetty yhteenveto palkkiryhmiä murtohetken keskiarvotaipumista täyspitkille ja sormijatketuille palkeille molemmissa lujuusluokissa sekä taipumien rajat $w_{\text{net, fin}} = l/300$.

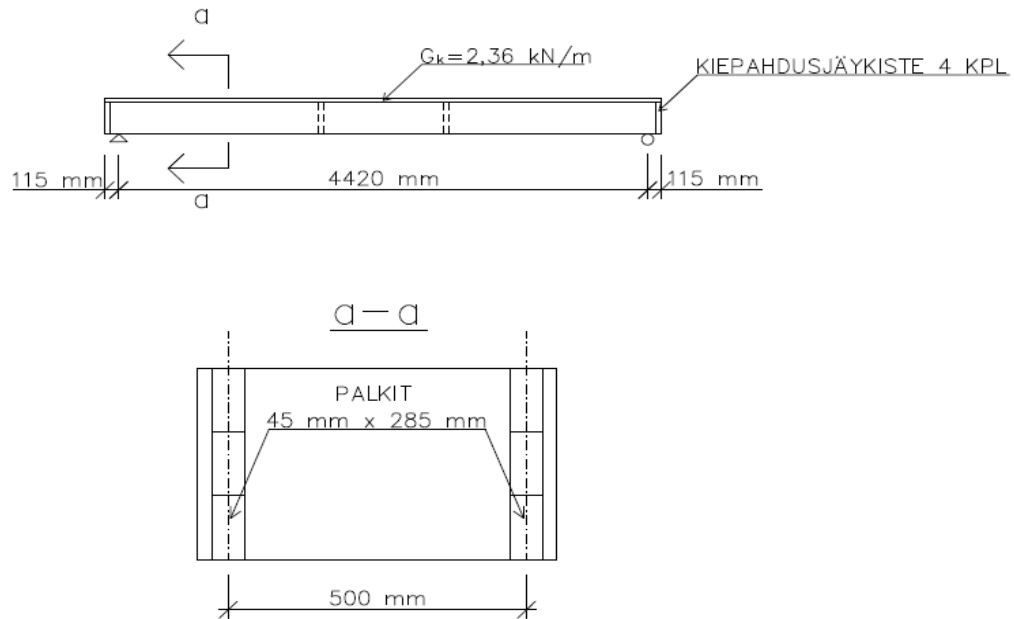
Taulukko 4.10. Palkkien taipumien w keskiarvot ryhmittäin sekä taipumien rajat $l/300$ (mm).

hxb	190 x 48	285 x 48		190 x 48	285 x 48
C24	w	w	C30	w	w
Täyspitkä	60,0–63,4	61,4		55,0–85,3	63,8
Sormijatkettu	39,4–49,4	47		41,0–49,9	60,0
$l/300$	11,4	14,25		11,4	14,25

Taulukon mukaan täyspitkien palkkien taipumat murtohetkellä olivat 2-lamellisten palkkien osalta 15 mm – 25 mm ja 3-lamellisten palkkien osalta 5 mm – 15 mm suuremmat kuin sormijatkettujen palkkien taipumat.

Sormijatkettujen palkkien taipumat olivat murtohetkellä noin nelinkertaiset standardin hyväksymiin lopputaipumiin $l/300$ verrattuina. Lujuusluokan C30 sormijatkettu palkki taipui 6 % vähemmän murrossa kuin täyspitkä palkki. Lujuusluokassa C24 ero oli 23,4 %.

4.4 Pitkäaikaiskokeet



Kuva 4.23. Pitkäaikaiskokeiden koejärjestelyt.

Pitkäaikaiskokeita varten tehtiin kaksi samanlaista koekappaletta (kuva 4.23). Kaksi 3-lamellista palkkia liitettiin yhteen neljällä kiepahdussiteellä kuvan mukaisesti. Sahatavaran lujuusluokka on C30 ja poikkileikkauskoko 285 mm x 45 mm. Liimana on käytetty samaa 1-komponenttista polyuretaaniliimaa kuin muissakin koepalkeissa. Palkit eivät ole sormijatkettuja. Toista koekappaletta säilytettiin laboratorioissa, jossa RH on $65\% \pm 5\%$ ja ilman lämpötila $+20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ (kuva 4.24 ja kuva 4.28). Toista koekappaletta säilytettiin ulkona katetussa tilassa, joka on yhdeltä sivulta avoin (kuva 4.27). Ulkoilman suhteellinen kosteus vaihteli mittaushetkillä 32,5 %:sta 88,4 %:iin ja lämpötila $+25,4\text{ °C}$:sta $-18,7\text{ °C}$:een (kuva 4.25 ja kuva 4.27). Puun kosteus on laboratorioissa vaihdellut 12,3–13,7 % normaalilämpötilassa ja ulkona säilytetyn koekappaleen kosteus 13,5–17,2 %. Tammikuun puolivälissä 40 koekuormitusviikon jälkeen ilman kostuttaminen laboratorioissa lopetettiin. Puun kuivumisen vaikutus näkyy virumaluvun kasvuna 0,5:stä 0,7:ään. Virumaluku saavutti tällöin saman tason kuin ulkona oleva koekuormituspalkki.

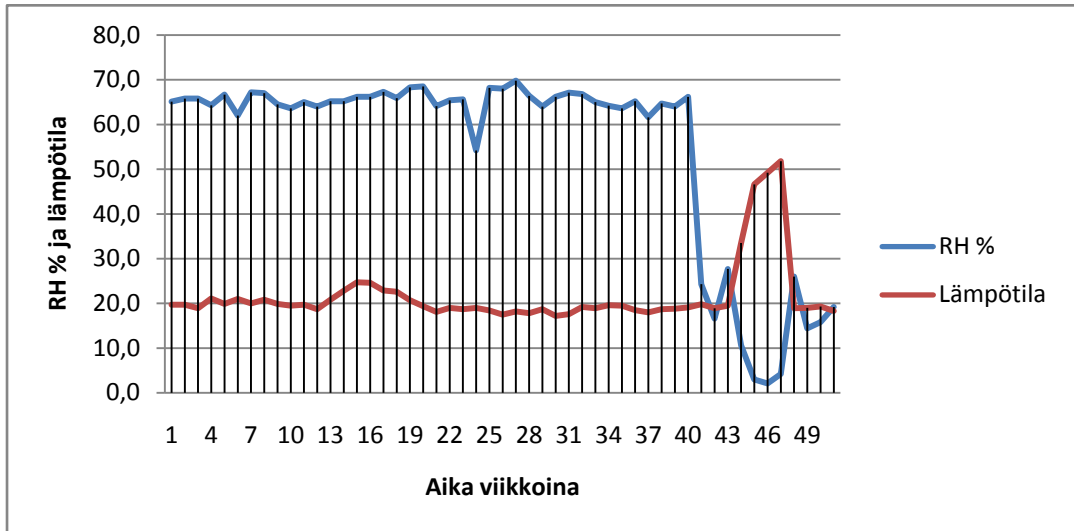
Liiman lämpötilankestävyuden koestamiseksi laboratorioissa oleva koekappale lämpöeristettiin kokeen loppuvaiheessa (ks. kuva 4.29), ja alle valettiin 20 mm:n paksuinen betonilaatta, johon sijoitettiin sähköllä lämmitettävä lämpömatto Devimat 100. Lämmönsäätö hoidettiin Devireg-lattialämmitystermostaatilla. Lämpötila nostettiin kahdessa viikossa noin 50 °C :een, ja lämpötila pidettiin noin 2 viikkoa. Koestustilan suhteellinen kosteus putosi samaan aikaan 2 %:iin ja puun kosteus noin 5 %:iin. Virumaluku kasvoi lämpötilan noston aikana 0,7:stä 1,26:een. Kasvu jatkui vielä seuraavan viikon aikana

1,29:ään, mutta viimeisessä mittauksessa luku oli pudonnut 1,27:ään. Liimasaumoissa ei ollut havaittavissa muutoksia. Palkin korkeus pieneni 5 mm alkuperäisestä 285 mm:stä.

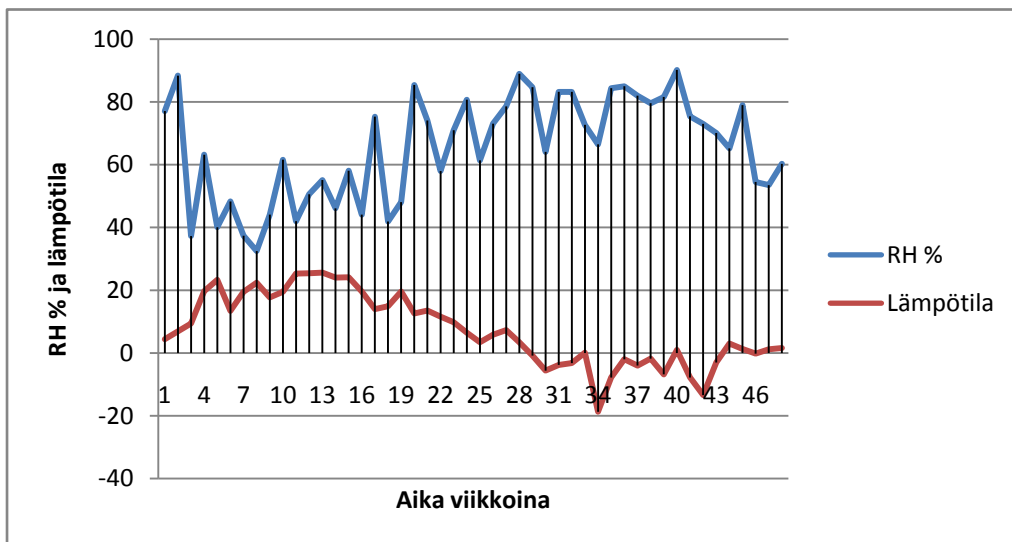
Palkkien taipumaa mitattiin mittakelloilla Mitutoyo ID-C150B, joiden mittausalue on 0–50,8 mm, luentatarkkuus 0,001 mm ja mittaustarkkuus 0,006 mm. Mittakellot olivat palkkien alapuolella jännevälien keskellä. Ilman suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mitattiin laitteella Vaisala HM141 Humidity and Temperature Indicator ja Vaisala HMP42 -anturilla. Mittaustarkkuudeksi on ilmoitettu suhteellisen kosteuden osalta 3 % ja lämpötilan osalta $\pm 0,3$ °C. Laboratoriossa olevien palkkien tulosten kirjaaminen aloitettiin 1.4.2010 ja ulkona olevien palkkien 22.4.2010. Kirjauksia tehtiin 26.5. asti päivittäin ja 3.6. alkaen kerran viikossa.

Palkkeja kuormitettiin teräslevyillä, joiden paino $G_k = 2,4$ kN/m vastaa kahdelle palkille 1,2 m:n leveydeltä tulevaa hyötykuormaa $2,0$ kN/m². Liitteessä 6 on esitetty numeerisesti pitkäaikaiskokeissa mitatut taipumat ja olosuhteet. Liitteessä 7 on esitetty kuormitusajasta riippuvan taipuman w_t ja alkutaipuman w_{inst} suhde. Suhde kuvaa koepalkkien ajasta riippuvaa taipuman lisäystä.

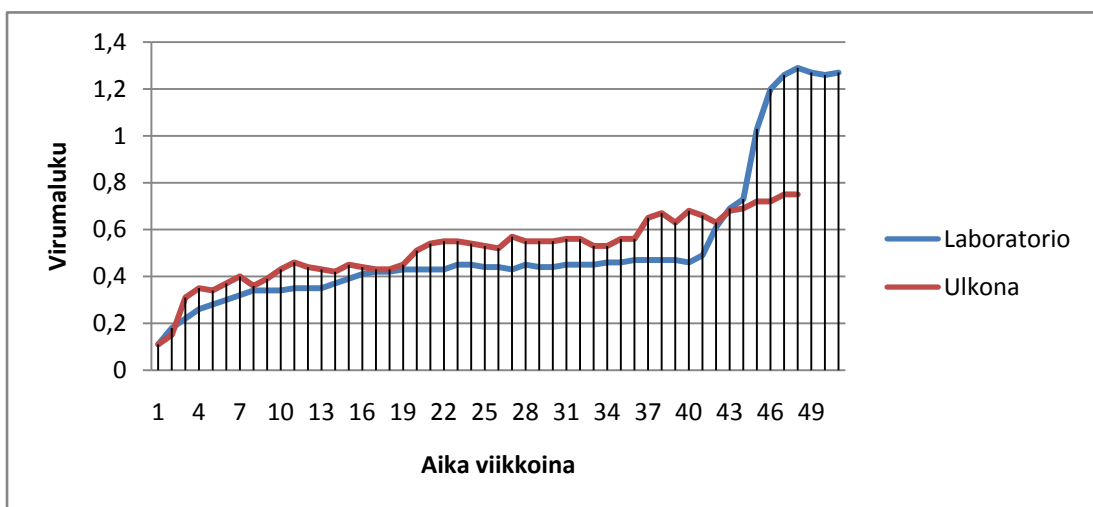
Pitkäaikaiskokeiden kuormitusolosuhteet laboratoriossa on esitetty kuvassa 4.24 ja ulkona kuvassa 4.25. Samaan aikaan tapahtuneet virumalukujen muutokset on esitetty kuvassa 4.26.



Kuva 4.24. Kuormitusolosuhteet laboratoriossa pitkäaikaiskokeen aikana.



Kuva 4.25. Kuormitusolosuhteet ulkona pitkäaikaiskokeen aikana.



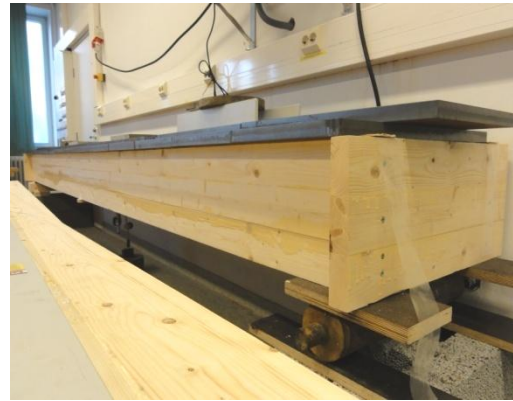
Kuva 4.26. Virumaluvun ja kuormitusajan välinen riippuvuus.

Suhteen w_t/w_{inst} avulla voidaan laskea koepalkkien virumaluku kaavasta $k_{def} = w_t/w_{inst} - 1$. Kuvassa 4.26 on esitetty virumaluvun k_{def} -arvot kuormitusajan funktiona. Kuvasta nähdään, että 41 viikon jälkeen virumaluku on saavuttanut arvon $k_{def} = 0,49$ laboratoriossa ja ulkona 45 viikon jälkeen arvon $k_{def} = 0,72$. SFS-EN 14081-1 - ja SFS-EN 14080 -standardin mukaan sahatavaran ja liimapuun virumaluku käyttöluokassa 2 on $k_{def} = 0,8$. Tutkimuksen kestoaikana normaalilämpötilassa virumaluku pysyi tämän arvon alapuolella. Radovicin ym. (2003) mukaan liimapuupalkkien taipumat ovat saavuttaneet maksimiarvonsa 3 vuodessa. Suurin osa taipumista tapahtuu ensimmäisen vuoden aikana. Syrjältään liimattu sahatavara-palkki näyttää taipuvan hieman enemmän kuin liimapalkki.

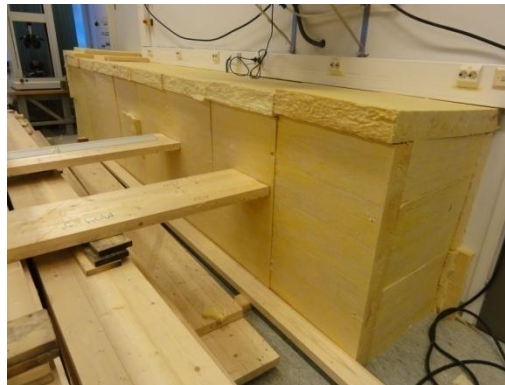
Kokeen loppuvaiheessa liiman kestävyyttä selvitettiin nostamalla laboratoriokoe-kappaleen lämpötilaa 50 °C:een. Koekappaleella oli sama pysyvä kuorma kuin kokeen alussa. Suhteellinen kosteus putosi pienimmillään koetilassa 2,1 %:iin ja puun kosteus 4,9 %:iin. Virumaluku saavutti arvon $k_{def} = 1,29$ kahdessa viikossa. Tämä vastaa suunnitellun palkin sallittua lopputaipumaa. Liimasaumassa ei tapahtunut silmin havaittavaa liukumista.



Kuva 4.27. Pitkäaikaiskoe ulkona.



Kuva 4.28. Pitkäaikaiskoe laboratoriossa.



Kuva 4.29. Laboratoriokokeen loppuvaiheessa koekappale lämpöeristettiin.

5 Tutkimushypoteesien tarkastelu

Palkin muotovirheet saadaan hallintaan lamellien oikealla asettelulla

Muotovirhekokeet toteutettiin käyttämällä neljää erilaista poikkileikkaustyyppiä. Ryhmissä M04, M06 ja M08 lamellit oli asennettu vuosirenkaat vuorotellen vastakkaisiin suuntiin. Ryhmässä M06 oli käytetty lisäksi ponttia saumojen välillä. Ryhmän M08 keskilamelli oli reunalamelleja leveämpi.

Palkeista mitattiin muotovirheet yhteensä neljä kertaa noin puolen vuoden aikana. Muotovirheitä verrattiin kantavissa rakenteissa käytettävän sahatavaran euronormeissa annettuihin maksimiarvoihin. Ryhmän M04 lamellien muodonmuutokset osoittivat, että sahauskassa puun sydän ei saa jäädä näkyviin, koska kieroutuminen on silloin voimakasta. Ryhmän koekappaleissa esiintyi sydänpuukeskisyyttä eniten. Sydänpuukeskisyyys aiheutti koekappaleissa kieroutumisen lisäksi pintahalkeamia.

Myös ryhmän M06 koekappaleissa 1 ja 2 esiintyi ydinkeskisyyttä ja kieroutuminen ylitti maksimiarvon. Ryhmän M06 pontillisuus ei tuonut lisäarvoja muodonmuutosten hallintaan.

Ryhmän M05 tulokset osoittavat, että liimaamalla lamellien vuosirenkaat samaan suuntaan lisättiin kuperuutta. Samalla kieroutuminen oli vähäistä. Kuperuutta pyrittiin kuitenkin välttämään, koska sen esiintyminen aiheuttaa ongelmia liitosratkaisuissa.

Ryhmän M08 kieroutuminen oli pienempää kuin ryhmissä M04 ja M06. Koekappale M08-1 oli toteutettu kääntämällä keskimmäiseksi tuleva lamelli alkuperäisestä sahausasennosta ympäri vastakkaiseen suuntaan. Keskimmäisen lamellin tyvipää osoitti tällöin samaan suuntaan kuin reunalamellien latvapäät, jolloin kiertymiset pakotettiin vaikuttamaan toisiaan vastaan ja samalla saatiin vähennettyä muodonmuutoksia. Kieroutuminen pieneni selvästi toisen kuukauden aikana.

Muodonmuutuskokeet osoittivat, että lamellien sahaustavalla ja asettelulla on merkitystä muotovirheisiin. Asettamalla lamellien vuosirenkaat vastakkaisiin suuntiin ja pakottamalla kieroutumisesta syntyneet voimat vaikuttamaan vastakkaisiin suuntiin pystytään vähentämään kieroutumista.

Mittaukset ovat muodonmuutuskokeita varten tehtyjen palkkien osalta luotettavia. Mittauksen suorittamistavassa on kuitenkin kehitettävää. Muotovirheiden mittaamiseksi koekappaleet pitää tukea nurkistaan irti vaakasuorasta pinnasta, jotta koekappaleet eivät kosketa alustaa.

Taivutuskokeita varten valmistetut 2- ja 3-lamelliset palkit tehtiin asettamalla sydänkuviot vuorotellen vastakkaisiin suuntiin eli ryhmien M04 ja M08 palkkien mukaisesti. Nämä kaikki 45 taivutuskoe kappaletta olivat silmämääräisesti arvioituina suorina (kuva 4.8).

1-komponenttinen polyuretaaniliima sopii lamellien liimaamiseen

Leikkauskoe kappalet (12 kpl) oli valmistettu liimaamalla yhteen kolme samanpituista lamellia, joista keskimäinen oli 50 mm muita korkeammalla. Liimoina käytettiin 2-komponenttista MUF-liimaa ja 1-komponenttista PUR-liimaa. Saumat olivat molemmille liimoille sekä suorina että ponttisaumoja.

Leikkauskokeissa keskimäistä lamellia puristettiin, ja koekappaleiden puristumista ja puristavan voiman kasvamista seurattiin. Murto tapahtui 75-prosenttisesti puun puristumurtona. Kolmessa koekappaleessa tapahtui puun leikkausmurto liimasauman vierestä. Yhdessäkään tapauksessa lamellit eivät irronneet liimasaumasta. Osatekijänä puristusmurtoon oli suhteellisen korkea koekappaleiden kosteuspitoisuus.

Leikkauskokeessa murtohetkellä esiintyneiden puristusjännitysten ominaisarvo $f_{c,0,g,k} = 21,96 \text{ N/mm}^2$ ylittää sahatavaran lujuusluokan C24 puristuslujuuden ominaisarvon, mutta alittaa lujuusluokan C30 ja liimapuun lujuusluokkien GL24 puristuslujuuksien ominaisarvot.

Murtotilannetta vastaavaksi ominaisleikkauslujuudeksi saatiin $f_{vk} = 4,08 \text{ N/mm}^2$, mikä ylittää sahatavaran lujuusluokan C30 ja liimapuupalkin lujuusluokan GL28c ominaisleikkauslujuudet.

Taivutusmurron aikaansaaneet suurimmat puristavat voimat olivat 2-lamellisella palkilla T06 C30-1 26,3 kN ja 3-lamellisella palkilla T10 C30-1 58,6 kN. Voimasta 26,3 kN aiheutuu saumaan pituussuuntainen leikkausjännitys $2,27 \text{ N/mm}^2$ ja jälkimmäisestä $3,03 \text{ N/mm}^2$. Leikkauskokeista saatu leikkausjännitysten ominaisarvo $4,08 \text{ N/mm}^2$ ylittää edellä olevat jännitykset. Tämä merkitsee, että taivutustesteissä murto ei ole alkanut leikkausmurtona.

Taivutuskokeissa kohdassa 4.3.4 esitetyillä palkki- ja kuormitusoletuksilla saadaan murtotilassa saumassa esiintyvä leikkausjännitys kaavalla

$$\tau = \frac{QS}{bI} = 0,53 \text{ N/mm}^2, \quad (12)$$

missä

Q on leikkausvoima tuella,

S on liimasauman ulkopuolisen osan staattinen momentti poikkileikkauksen painopiste akselin suhteen,

b on poikkileikkauksen leveys ja

I on poikkileikkauksen jäyhyysmomentti painopiste akselin suhteen.

Tämä merkitsee, että leikkauslujuuden ominaisarvo on 7,7-kertainen normaalikuormituksesta murtotilassa aiheutuviin jännityksiin nähden.

Liimasauman vaatimukseksi oli asetettu, että sen on oltava lujempi kuin puuosien leikkauskestävyys. Näiden kuormituskokeiden perusteella voidaan todeta, että molemmilla käytetyillä liimoilla ja molemmilla saumatyypeillä sekä käytetyllä liimausmenetelmällä saadaan aikaan riittävän luja liitos niin, että liimattu sahatavarapalkki toimii yhtenäisenä liittorakenteena. 1-komponenttisen polyuretaaniliiman etu on sen yksikomponenttisuus. Puristusaika polyuretaaniliimalla on 1,5-2 tuntia. 2-komponenttisilla melamiiniureaformaldehydiliimoilla puristusaika on 6 tuntia, kun kovettajan osuus on 20 % liimasta.

Leikkauskokeiden tuloksena tuotannolliset näkökannat huomioon ottaen päädyttiin käyttämään suoraa saumaa ja liimana 1-komponenttista polyuretaaniliimaa.

Liiman valmistajan tuoteselosteen mukaan valittu polyuretaaniliima sopii asuinrakentamisen kantavien rakenteiden liimaamiseen. Tässä tutkimuksessa on tyydytty näiltä osin liiman valmistajan ilmoitukseen. Vuonna 2013 tulee tuotteen kelvollisuus osoittaa CE-merkinnällä. Liiman valmistaja ei ole vielä hankkinut tuotteelleen SFS-EN 14080 -standardin hyväksyntää, mikä on edellytys CE-merkinnälle. NTI:n hyväksytyjen tuotteiden liimalistalla on saksalaisia 1-komponenttisia polyuretaaniliimoja, joita voi käyttää, mikäli tutkitun suomalaisen liiman ei katsota olevan kelvollinen suunniteltuun käyttötarkoitukseen. Leikkauskokeet osoittivat, että molemmilla testatuilla liimoilla saatiin syntymään liitos, joka kesti puristavasta voimasta aiheutuneen sauman leikkausjännityksen. Tulokset osoittivat myös, että liitos oli riittävän luja ilman ponttisaumaa, minkä vuoksi ponttisaumasta luovuttiin. Valittu polyuretaaniliima täyttää SFS-EN 301:n ja 302:n vaatimukset, ja se on hyväksytty käytettäväksi kantavien puurakenteiden liimaamiseen. Kestopur 1030 täyttää myös standardin SFS-EN 204 D4-rasitusryhmän vedenkestovaatimukset. D4-rasitusryhmä vastaa palkin ajateltua käyttömahdollisuutta vesikatton kannattajana ilman kosteudelle alttiina, yläreunan tuuletusvälissä, mutta vesikatteen suojaamana sateelta.

Tämän tutkimuksen molemmat pitkäaikaiskokeet osoittivat noin 10 kuukauden jälkeen, että virumaluku pysyi standardin antaman arvon $k_{def} = 0,8$ alapuolella sekä ulkona että laboratorioissa normaaliolosuhteissa. Pitkäaikaiskoe ulkona osoitti myös, että palkkeja voi käyttää katosten kantavina vaakarakenteina sekä asuinrakennusten yläpohjapalkkeina, jolloin niistä on yläosa alttiina ulkoilman kosteudelle ja lämpötilavaihteluille. Laboratorioissa säilytettävän koekappaleen lämpötilan nostamisella haluttiin selvittää liiman kestävyyttä 50 °C:n lämpötilassa. Kokeella tavoiteltiin rakenteen käyttöolosuhteita vesikatton alla kuumana kesäpäivänä. Virumaluku k_{def} kasvoi 1,29:ään. Kokeessa kuorma pidettiin vakiona, mikä ei vastaa todellista tilannetta kesällä. Liimasaumassa ei ollut havaittavissa muutoksia. Loppuvaiheen taipuman kasvu johtui palkin kuivumisesta 5 %:n kosteuteen. Samalla poikkileikkausmitat ja poikkileikkauksen jäykkyys pienenevät. Käytännössä yläpohjapalkilla voi esiintyä korkeita lämpötiloja kesäisin, jolloin kuormituksena on vain rakenteen oma paino. Kuorman olisi voinut poistaa loppuvaiheessa kokonaan.

Leikkauskokeista saadut ominaislujuuksien arvot olivat riittäviä. Sauman paksuus oli puristettu minimiin 0,1 mm:iin. Liimaa oli pursunnut runsaasti kaikissa koekappaleissa ulos saumasta. Ennen tuotannollisen toiminnan aloittamista on syytä tehdä testejä pienemmällä puristusaineella kuin näissä kokeissa. Sauman paksuutta voi kasvattaa jopa kolminkertaiseksi.

Sormijatkaminen on mahdollista syrjältään liimatuissa sahatavarapalkeissa

Sormijatkamisen käyttökelpoisuus tutkittiin perusteellisesti 1-, 2- ja 3-lamellisille palkeille. Palkkien valmistamiseen käytetty sahatavara oli lujuusluokkien C24 ja C30 mukaista. Sormijatkoksissa käytettiin samaa polyuretaaniliimaa kuin lamellien liimaamiseen. NTI suosittelee sormijatkosliimaksi esimerkiksi Kiilto Oy:n 2-komponenttista Kestokol WR11 -liimaa emulsiopolymeeri-isosyanidia (EPI).

Sormijatketuista lujuusluokan C24 koekappaleista (15 kpl) taivutusmurto tapahtui oksan kohdalta 9 kertaa ja 5 kertaa sormijatkoksen kohdalta. Yksi koekappale hylättiin. Lujuusluokan C30 sormijatketuilla koekappaleilla (16 kpl) murto tapahtui oksan kohdalta 6 kertaa ja sormijatkoksen kohdalta 9 kertaa. Yksi koekappale hylättiin.

1-lamellisten palkkien ominaistaivutuslujuudet sormijatkettuina olivat suurempia kuin standardin sahatavaran ja liimapuun vastaaville lujuusluokille. Tämä osoittaa, että sormijatkaminen on mahdollista syrjältään liimatuissa sahatavarapalkeissa.

3-lamellisissa sormijatketuissa palkeissa ominaislujuudet olivat suurempia kuin standardin vaatimukset sekä sahatavaran että liimapuun vastaavissa lujuusluokissa. Myös 2-lamellisissa sormijatketuissa lujuusluokan C24 palkeissa ominaislujuudet olivat standardin vaatimuksia suuremmat.

2-lamellisten lujuusluokan C30 palkkien koestuksen tuloksena saatu ominaislujuus alittaa täyspitkien palkkien osalta 4,3 % ja sormijatkettujen palkkien osalta 26,7 % standardin lujuusluokan C30 vaatimuksen sekä 21,4 % lujuusluokan GL28 vaatimuksen. Tuloksen alitus johtunee ryhmien koekappaleiden pienestä lukumäärästä 5, josta aiheutui suuri korjauskerroin $k_s = 2,46$. Molemmassa ryhmässä hajontaa lisäsi paitsi kaksi alhaista murtolujuutta myös parin koekappaleen murtolujuuden korkeat arvot.

Taivutuskokeista lasketut kimmomoduulien ominaisarvot $E_{0,mean}$ ja $E_{0,05}$ ylittivät SFS-EN 338 -standardin vaatimukset sahatavaran lujuusluokissa C24 ja C30 sekä vastaavasti standardin SFS-EN 1194 liimapuupalkin lujuusluokissa GL24h ja GL28c.

Kaikkien lujuusluokan C24 puutavarasta valmistettujen palkkien tiheyksien ominaisarvoksi saatiin $383,8 \text{ kg/m}^3$, mikä on enemmän kuin euronormien mukainen liimapuupalkin GL24h ominaistiheyden arvo 380 kg/m^3 . Lujuusluokan C30 puutavarasta valmistettujen palkkien tiheyksien ominaisarvoksi saatiin $391,0 \text{ kg/m}^3$, mikä on enemmän kuin sahatavaran lujuusluokan C30 ja liimapuun lujuusluokan GL28c ominaistiheysvaatimus 380 kg/m^3 . Liimapuupalkin GL28h ominaistiheysvaatimus 410 kg/m^3 alittui 1,4 %:lla ja liimapuupalkin GL32c tiheyden ominaisarvo 4,6 %:lla.

Sormijatkettujen palkkien taipumat olivat murtohetkellä 15 mm – 20 mm pienempiä kuin täyspitkien palkkien taipumat. Palkit taipuivat ennen murtoa riittävästi. Taipumat olivat tällöin nelinkertaiset standardin hyväksymiin lopputaipumiin verrattuna. Erot lujuusluokkien välillä murtohetken taipumien osalta olivat pienehköjä.

Sormijatkosten tekeminen syrjältään liimattuihin sahatavarapalkkeihin on mahdollista. Ne pudottavat taivutuslujuuksia jonkin verran, mutta lujuudet pysyvät euronormien vaatimusten yläpuolella. Liimapuupalkkien lujuuksia käytettäessä sopivat lujuusluokat ovat GL24h ja GL28c.

Syrjältään liimattujen sahatavarapalkkien mitoitus voidaan tehdä soveltamalla mitoittamiseen euronormeja

Tämän tutkimuksen mukaan lujuusluokkien C24 ja C30 mukaisesta sahatavarasta valmistetut 3-lamelliset palkit täyttivät vastaavien euronormien sahatavaralujuuksia koskevat vaatimukset tiheyden, kimmomoduulin ja taivutuslujuuden ominaisarvojen suhteen. Näin ollen euronormien SFS-EN 338:n mukaisia mitoitusarvoja voidaan käyttää. Pystylamellipalkkien valmistuksessa tulee noudattaa liimapuustandardeissa SFS-EN 386 ja 387 esitettyjä vaatimuksia. Sormijatkokset on tehtävä standardin SFS-EN 385 mukaisesti.

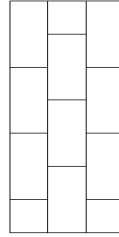
2-lamellisten palkkien osalta lujuusluokan C30 ominaistaivutuslujuus vaatimukset eivät täytyneet, mikä johtui koetulosten suuresta hajonnasta.

Syrjältään liimatulle sahatavarapalkille ei löydy euronormeista omaa standardia. Standardissa SFS-EN 386 on esitetty perinteisen liimapuupalkin lisäksi tapaus, jossa lamellit on käännetty pystyasentoon (ks. kuva 5.1). Standardin palkissa pystylamellit on liimattu leveämmiltä sivuiltaan toisiinsa. Viereisten lamellien syrjäsaumat on porrastettu pystysuunnassa. Pystysuuntaisia liimapuulamelleja on liimattu kolme rinnakkain, joista kaikki ovat 4-lamellisia.

Standardin mukaan liimapuulamellin paksuus saa olla enintään 45 mm liimauksen puristussuunnassa. Tämä vaatimus täyttyy eli kysymyksessä on liimapuupalkki.

Tässä tutkimuksessa on vain yksi lamelli vaakasuunnassa, ja kuormitussuunnassa lamellien korkeus ylittää liimapuupalkin lamellipaksuuden rajan 45 mm, eli kysymyksessä on syrjältään liimattu sahatavarapalkki.

Tämän tutkimuksen perusteella syrjältään liimatun, sormijatketun sahatavaran mitoituksessa voidaan käyttää standardin SFS-EN 1194 liimapuupalkkien lujuuksia GL24h ja GL28c. Edellisen lujuusluokan palkit valmistetaan sahatavarasta C24 ja jälkimmäisen sahatavarasta C30.



Kuva 5.1. Pystylamellinen liimapuupalkki (SFS-EN 386).

Syrjältään liimatun, sormijatketun sahatavarapalkin valmistuksessa tulee noudattaa liimapuun ja sormijatkosten valmistamiseen tarkoitettuja euronormeja. Myös laadunvarmistuksen ja -valvonnan täytyy olla euronormien mukaisesti toteutettuja. Vuodesta 2013 alkaen tuotantolaitoksella tulee olla käytössä sertifioitu laatujärjestelmä, joka osoittaa tuotteen kelvolliseksi.

Poikkileikkaukset voi toteuttaa sormijatkettuina. Vaikka sormijatkaminen tekee poikkileikkauksesta hauraasti käyttäytyvän syrjäöksien tapaan, valmistajan on toisaalta samalla mahdollista nostaa taivutuslujuutta poistamalla suurimmat syrjäöksät ja muut mahdolliset viat. Valmistajan on hankintatoimessa kiinnitettävä erityistä huomiota kuusimateriaalin tasalaatuisuuteen.

6 Tutkimuksen arviointi

6.1 Tutkimuksen luotettavuus

Muotovirhemittaukset

Tutkimuksessa ei kiinnitetty riittävästi huomiota koekappaleiden valmistukseen. Kaikki koekappaleet eivät vastanneet suunnitellun palkin mukaista ratkaisua. Eräässä lamellissa esiintyi sydänpuukeskeisyyttä molemmissa päissä, mikä merkitsee, että lamellia ei ollut sahattu suunnitelmien mukaan. Toisessa koekappaleessa sydänkuviota näkyi toisessa päässä mutta vastakkaisessa ei. Tämä koekappale oli tehty liian väärästä tukista.

Pieni hammastus joidenkin lamellien välillä osoitti, että puristusaine ei ole ollut sivusuunnassa riittävä eikä puhtaaksihöyläystä ollut tehty. Toisaalta pystysuunnassa puristus oli ollut ilmeisesti tarpeettoman voimakas, koska liimaa oli pursunnut runsaasti saumojen ulkopuolelle.

Koekappaleiden mittausjärjestely saattoi antaa liian pieniä muotovirheiden arvoja eräissä tapauksissa. Koekappaleet lepäsivät suoraan vaakasuoran alustan päällä. Luotettavampia arvoja olisi saatu, jos koekappaleiden nurkkien alle olisi asennettu korokepalat niin, että ne olisivat olleet pääosin irti tasosta.

Leikkauskokeet

Tutkimuksen leikkauskokeilla pyrittiin selvittämään, kestäkö liimasauma syrjältään liimattuun sahatavarapalkkiin murtotilanteessa syntyvät jännitykset. Leikkauskokeilla selvitettiin lisäksi ponttisauman tarpeellisuutta. Tarkoituksena oli selvittää myös 1-komponenttisen polyuretaaniliiman käyttökelpoisuus. Vertailuliimaksi valittiin liimapuuvalmistajien yleisesti käyttämä 2-komponenttinen melamiiniureaformaldehydi-liima.

Valittu koejärjestely johtui järeästä, ohjelmoitavissa olevasta puristuslaitteistosta. Koekappaleiden kosteuspuutisuudet ja tiheydet määritettiin standardin SFS-EN 13183-1 mukaan. Kosteusmittaukset osoittivat, että koekappaleiden kosteus oli hieman korkea tuotteen käyttöolosuhteisiin verrattuna. Korkeahko kosteus johti myös yleisesti puun puristumukseen. Liimasaumassa käyttötilassa esiintyviin jännityksiin verrattuna liimasauma kesti vähintään 7–8-kertaisen rasituksen. Laitetoimittajien ilmoittamien mittauksien tarkkuudet riittävät johtopäätösten tekoon.

Leikkauskokeet olisi voitu tehdä myös lujuusluokan C30 sahatavaralle.

Taivutuskokeet

Tutkimuksen taivutuskokeet suoritettiin standardien SFS-EN 380 ja 408 mukaisesti. Kosteuspitoisuudet määritettiin standardin SFS-EN 13183-1 mukaisesti. Hajonta koekappaleiden välillä oli joissakin ryhmissä suuri. Hajontaan saattoivat vaikuttaa valmistuksessa tapahtuneet muutamat virheet. Eräässä ryhmän palkissa mitattiin keskellä aukkoa 18 mm leveä 1 metrin pituinen liimaton alue. Sormijatkos oli eräässä koekappaleessa tehty keskelle oksaa. Muutamat koekappaleet jouduttiin hylkäämään murtuneiden sormijatkosten vuoksi. Testausten tulokset ovat kuitenkin laitetoimittajien ja kalibroijien ilmoittamien tarkkuuksien mukaisia.

Taivutuskokeista laskettujen kimmomoduulien, tiheyksien ja taivutuslujuuksien ominaisarvoja verrattiin standardien vastaaviin ominaisarvoihin. Koekappaleita olisi pitänyt olla enemmän kunkin ominaisuuden tutkimiseen. Tutkimuksia on syytä jatkaa.

Liimasauman paksuus oli yleisesti 0,1 mm, mikä on polyuretaaniliimaa käytettäessä sauman paksuuden alaraja. Sauman paksuuden yläraja on kolminkertainen eli 0,3 mm. Tämä mahdollistaa puristuspuheen pienentämisen.

Tutkimuksessa käytetyt lamellit oli sahattu pieniläpimittaisesta kuusesta. Paksujen tukkien ulkoreunalta voisi löytyä ratkaisu korkeampien lujuusluokkien kimmomoduuli- ja tiheysvaatimukseen.

Tuotannon aloittaminen vaatii tuotantolaitokselta sertifioitua laatujärjestelmän noudattamista. Tuotantotilojen on vastattava euronormien vaatimuksia, ja henkilöstö on koulutettava prosessien hallintaan.

6.2 Tutkimuksen uutuusarvo

Syrjältään liimattuja sahatavarapalkkeja ei liene aiemmin koestettu tässä laajuudessa ainakaan Suomessa. Palkki ei ole tuotteena tunnettu, vaikka liimatun rakennesahatavaran käsite esiintyy Liimapuu-käsikirjassa (Carling 2003). Yleensä sahatavaramellit on liimattu lappeeltaan. Liimapuuvalmistajat ovat valmistaneet vastaavaa tuotetta haluaisemalla 90 mm leveän lappeeltaan liimatun liimapuupalkin kahteen osaan.

Tutkimuksen ensimmäisessä osiossa selvitettiin lamellien asettelun merkitystä poikkeileikkauksen muotovirheisiin. Mittaustulosten perusteella päädyttiin asettelemaan lamellien vuosirenkaat vuorotellen vastakkaisiin suuntiin kieroutumisen pienentämiseksi. Ongelma ja sen ratkaisu on ollut puusepille tuttu, mutta tässä yhteydessä ratkaisua testattiin rakennepuutavaralle.

Koekappale M08-1 paljasti, että liimaamalla lamellit toisiinsa niin, että muodonmuutokset pakotetaan vaikuttamaan toisiaan vastaan, pienennetään muodonmuutoksia. Tähän tilanteeseen päästään kääntämällä keskimmäiseksi tuleva lamelli alkuperäisestä sahausasennosta ympäri vastakkaiseen suuntaan. Kieroutuminen pieneni selvästi ensimmäisessä

mäisen kuukauden jälkeen. Kokeita, joissa palkin päässä vuorottelevat latva-, tyvi- ja latvapää, pitäisi toteuttaa lisää.

Lamellien ja sormijatkosliitosten liimaamiseen käytettiin 1-komponenttista polyuretaaniliimaa, jota ei yleisesti ole käytetty Suomessa liimapuupalkkien valmistamisessa. Tulokset olivat kuitenkin hyviä, ja testitulosten mukaan päätettiin liimata lamellit 1-komponenttisella polyuretaaniliimalla. 1-komponenttisuus helpottaa liimaustyötä eikä liimassa ole formaldehydiä. 1-komponenttisen liiman puristusaika on kolmasosa yleisesti käytettäviin 2-komponenttiliimoihin nähden, minkä pitäisi näkyä tuotannon tehottomisena.

Taivutuskoekappaleet tehtiin sormijatkettuina 1-, 2- ja 3-lamellisille palkeille molemmista sahatavaran lujuusluokista. Taivutuskokeiden tulokset osoittivat, että sormijatkosten tekeminen palkkeihin on mahdollista. Taivutuslujuudet olivat 1- ja 3-lamellisissa palkeissa riittäviä, vaikka palkkien käyttäytyminen muuttui hauraaksi. Sormijatkokset toimivat syrjäöksien tapaan. Sormijatkoksien tekemisessä on noudatettava niitä koskevia euronormeja. Laadunvalvonnan on oltava yrityksessä kunnossa.

Syrjältään liimatulta rakennesahatavaralta ovat puuttuneet suunnitteluohjeet. Tässä tutkimuksessa on ehdotettu käytettäväksi euronormeja, joista löytyy jo piirros pystyasentoon asetetusta lamellin poikkileikkauksesta. Kysymys on kuitenkin liimapuupalkista, koska liimaus on suoritettu lappeittain, ja puristussuunnassa lamellin paksuus on liimapuurajausten mukainen. Tässä tutkimuksessa on koestettu yhteen riviin asennettuja syrjältään liimattuja lamelleja. Lamellien korkeudet ylittävät puristussuunnassa liimapuupalkkien lamellien paksuudet. Kysymyksessä ovat siis syrjältään liimatut sahatavarapalkit.

Tutkimuksen tuloksena esitetään syrjältään liimatulle sahatavaralle käytettäväksi sekä suunnittelussa että valmistuksessa euronormien SFS-EN 1194 mukaisia liimapuupalkkien lujuusarvoja lujuusluokkien GL24h ja GL28c mukaisesti. Vaihtoehtoisesti mitoituksessa voidaan käyttää sahatavaran lujuusluokkien C24 ja C30 ominaisarvoja euronormeista SFS-EN 338.

7 Johtopäätökset

7.1 Tutkimuksen merkitys ja sovellettavuus

Tutkimuksen tuloksena syntyy markkinoille uusi tuote, syrjältään liimattu sahatavara-palkki. Palkki tulee markkinoilla kilpailemaan halkaistun liimapuupalkin ja kertopuupalkin kanssa sekä kerros- että pientalojen ala-, väli- ja yläpohjien kannattajana sekä 2-lamellisena ulkoseinien runkorakenteena.

Tutkimus antaa suosituksen syrjältään liimatun sahatavarapalkin mitoittamiseksi euro-normien mukaan joko sahatavarana tai liimapuupalkkina.

Tutkimustulokset osoittavat, että 1-komponenttisen polyuretaaniliiman käyttö on mahdollista liimapuurakenteissa. Tutkimuksen perusteella sormijatkosten käyttö on mahdollista pystylamellipalkeissa.

Liimaamalla syrjiltään toisiinsa kolme höylättyä soiroa päästään poikkileikkauskokoon, joka kattaa puurunkorakentamisen poikkileikkaustarpeet normaalikuormitukselle. Samalla saumojen lukumäärä pienenee puolesta neljanteen osaan riippuen liimapuupalkin lamellien paksuudesta ja toisaalta liimatun sahatavarapalkin lamellin korkeudesta.

1-komponenttisen liiman perinteisiä liimapuuliimoja merkittävästi lyhyempi puristusai-ka tehostaa tuotantoa. Liiman 1-komponenttisuus helpottaa liimausta. Puristuslaitteiston tuottamaksi paineeksi riittää $0,5 \text{ N/mm}^2$.

Lamellit liimataan toisiinsa niin, että muodonmuutokset pakotetaan vaikuttamaan toisi-aan vastaan. Tähän asentoon päästään kääntämällä keskimmäiseksi tuleva lamelli alku-peräisestä sahausasennosta ympäri vastakkaiseen suuntaan. Asettelussa palkin päässä vuorottelevat latva, tyvi ja latva.

Syrjältään liimatun sahatavarapalkin vedetyksi tarkoitettu reuna on leimattava.

7.2 Jatkotutkimukset

Kuusi on materiaali, jota liimapuupalkkien ja ristikoiden valmistajat käyttävät sen sit-keyden vuoksi. Männyn mahdollisuudet lamellipalkkien valmistuksessa voisivat olla kuitenkin tutkimisen arvoisia. Männyn tiheys on kuusen tiheyttä suurempi, mutta perus-teita kuusen käytölle ei tässä tutkimuksessa selvitetty.

Palkin sovelluksena tullaan testaamaan ylösalainen T-muotoinen poikkileikkaus, jossa alin lamelli on liimattu poikittain. Tätä vaihtoehtoa on ajateltu käytettäväksi ala- ja välipohjissa, jolloin muiden rakenteiden asennus voi tapahtua yläpuolelta.

Lujuusluokan C30 2-lamellisia sormijatkettuja palkkeja voisi tutkia lisää, koska tämän ryhmän ominaislujuus alitti standardin vaatimuksen. Ryhmän taivutuslujuuksien keskiarvo kuitenkin ylittyi. Syynä ominaislujuuden alittumiseen voi pitää suurehkoa hajontaa ja pientä koekappaleiden määrää.

Välipohjiksi tarkoitettujen kotelopalkki- ja ripalaattaelementtien testaaminen on välttämätöntä, koska suurimmat esteet puukerrostalorakentamiselle ovat poistuneet. Elementit voisi valmistaa tehtaalla syrjältään liimatuista sahatavarapalkeista kiinnittämällä niihin kansilevyiksi liiman ja ruuvien avulla vanerilevyt. Tällöin voidaan tutkia lisäksi värähtelyn vaikutusta elementin mitoitukseen.

Syrjältään liimatulle palkille on ennen tuotannollisen toiminnan aloittamista syytä tehdä lisää koestuksia sopivan liimamäärän, puristuspaineen ja -ajan määrittämiseksi.

Tutkitut palkit täyttivät euronormien vaatimukset. Esteitä tuotannon aloittamiselle ei löytynyt. Tuotteen valmistuksen aloittavan tuotantolaitoksen on syytä ottaa huomioon ympäristöministeriön vaatimus todennäköisesti vuonna 2013 pakolliseksi tulevasta rakennustuotteiden kelvollisuuden osoittamisesta CE-merkinnällä (Ympäristöministeriö 2010). CE-merkintä edellyttää sitä, että yrityksen toiminta perustuu sertifioituun laatu-järjestelmään (Inspecta 2011).

Lähteet

- Carling, O. 2003. Liimapuu. Käsikirja. Helsinki: Wood Focus Oy / Suomen Liimapuu-yhdistys ry.
- Christiansen, A. W.; Vick, C. B. & Okkonen, E. A. 1999. Enhanced Durability of One-Part Polyurethane Bonds to Wood Due to the Use of HMR Primer. FPS 1999 Annual Meeting.
- Eriksson, J.; Ormarsson, S. & Petersson, H. 2001. Datorsimulering och experimentella studier av formstabilitet hos virke och sammalimmade träämnen. Department of Structural Engineering. Göteborg: Chalmers University of Technology.
- Eriksson, J.; Ormarsson, S. & Petersson, H. 2004. An experimental study of shape stability in glued boards. European Journal of Wood and Wood Products. Vol. 62, No. 3, 225–232.
- Eriksson, J.; Ormarsson, S. & Petersson, H. 2005. An experimental and numerical study of shape stability in laminated timber columns. European Journal of Wood and Wood Products. Vol. 63, No. 6, 423–429.
- Housh, R. 1985. Liimasaumojen tutkiminen. Liimat. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.
- Inspecta 2011. Sertifiointi. Viitattu 15.6.2011 <http://www.inspecta.com/fi/Palvelut/Sertifiointi/Tuotesertifiointi/Rakennustuotteiden%20ce-merkintä>.
- Kairi, M. 2002. Glued/Screwed Joints/Screw Glued Wooden Structures. Cost Action E13. Wood Adhesion and Glued Products. State of the Art – Report, 115–119.
- Kiilto Oy 2011. Kestopur 1050. Rakenneluokiteltu polyuretaaniliima. Viitattu 15.6.2011 http://www.kiilto.com/attachments/1/1/white_papers/1050.pdf.
- Norsk Treteknisk Institutt NTI 2010. Lim testet og godkjent for produksjon av konstruksjonslimtre og fingerskott konstruksjonslast I Norge, Sverige, Finland og Danmark. Blindern: Norsk Treteknisk Institut.
- Oja, J. & Häggström, U. 2009. Inverkan från kvist i närheten av fingerskarvar. Slutrapport. Skellefteå: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.
- Ormarsson, S.; Cown, D. & Dahlblom, O. 2003. Finite Element Simulations of Moisture Related Distortion in Laminated Timber Products of Norway Spruce and radiata Pine. 8. International IUFRO Wood Drying Conference 2003, 27–33.
- Ormarsson, S. 1999. Numerical Analysis of Moisture Related Distortions in Sawn Timber. Department of Structural Engineering. Göteborg: Chalmers University of Technology.
- Ormarsson, S.; Petersson, H. & Dahlblom, O. 1998. Förbättrad formstabilitet för sammanlimmade träprodukter. Report TVSM, 0281-6679; 3032. Division of Structural Mechanics. Lund: Lund University.

Ormarsson, S.; Dahlblom, O. & Petersson, H. 1999. A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation. Part 2: Simulation of drying board. *Wood Science and Technology*. Vol. 33, No. 5, 420–423.

Ormarsson, S.; Dahlblom, O. & Petersson, H. 2000. A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation. Part 3: Influence of annual ring orientation. *Wood Science and Technology*. Vol. 34, No. 3, 207–219.

Palsgaard Trae A/S 2011. HQL. Viitattu 15.6.2011 <http://www.palsgaardtrae.dk/hql/>.

Pro Puu ry 2011. Sahaustavat. Viitattu 15.6.2011 <http://www.puuproffa.fi.422-423>.

Puuinfo Oy 2011. Rakentaminen. Viitattu 15.6.2011 <http://www.puuinfo.fi>.

Radovic, B. & Rothkopf, C. 2003. Eignung von 1K-PUR-Klebstoffen für den Holzbau unter Berücksichtigung von 10-jähriger Erfahrung. *Bauen mit Holz*. Issue 6/2003.

Regelsamling för konstruktion BKR 2010. Boverket.

RT 21-10978. 2009. Puutavara. Sahattu, höylätty ja jatkojalosteet. Helsinki: Rakennustieto.

SFS-EN 204:en. 2001. Classification of thermoplastic wood adhesives for non-structural applications. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 301:en. 2006. Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing structures. Classification and performance requirements. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 302. 2004. Adhesives for load-bearing structures. Test methods. Part 1 – Part 7. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 338:en. 2010. Structural timber. Strength classes. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 380:en. 1993. Timber structures. Test methods. Principles for static load testing. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 384:en. 2004. Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 385:en. 2001. Finger jointed structural timber. Performance requirements and minimum production requirements. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 386:en. 2001. Glued laminated timber. Performance requirements and minimum production requirements. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 387:en. 2001. Glued laminated timber. Large finger joints. Performance requirements and minimum production requirements. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 408:en. 2003. Timber Structures. Structural and glued laminated timber. Determination of some physical mechanical properties. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

- SFS-EN 1194. 1999. Timber Structures. Glued laminated timber. Strength classes and determination of characteristic values. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- SFS-EN 1310. 1997. Pyöreä sahatavara ja sahatavara. Menetelmä ominaisuuksien mittaamiseksi. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- SFS-EN 1995-1-1 + A1 + AC. 2008. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- SFS 5878 INSTA 142. 2000. Sahatavaran visuaalisen lujuuslajittelun pohjoismaiset säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- SFS-EN 13183-1 + AC. 2002. Moisture content of a piece of sawn timber. Part 1: Determination by oven dry method. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- SFS-EN 14080. 2005. Puurakenteet. Liimapuu. Vaatimukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- SFS-EN 14081-1. 2005. Puurakenteet. Lujuuslajiteltu poikkileikkaukseltaan suorakaitteen muotoinen rakennuspuutavara. Osa 1. Yleiset vaatimukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- SFS-EN 14358:en. 2007. Timber structures. Calculation of characteristic 5-percentile values and acceptance criteria for a sample. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- SFS-EN 15425:en. 2008. Adhesives. One component polyurethane for load bearing timber structures. Classification and performance requirements. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- Sterley, M.; Blümer, H. & Wålinder, M. E. P. 2004. Edge and face gluing of green timber using a one-component polyurethane adhesive. Stockholm: SP Swedish National Testing and Research Institute.
- Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL 2009. Puurakenteiden suunnitteluohje. Eurokoodi EN 1995-1-2. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto.
- Tarvainen, V. 2005. Menetelmiä sahatavaran suoruuden parantamiseksi. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.
- Tarvainen, V. & Hukka, A. 1997. Sahatavaran kierouden vähentäminen kuivauksen keinoin. Esiselvitys. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.
- Tratzmiller, M. 2009. Hochwertige Bauprodukte mit differenzierter Tragfähigkeit und Optik aus starkem Stammholz. *Zukunft Holz*, 371–375.
- TreFokus AS 2011. Gran. Viitattu 15.6.2011 <http://www.trefokus.no/fullstory.aspx?m=19&amid=8870>.
- Typgodkännandebevis 4772/92. Träkonstruktioner. Limmade träkonstruktioner. Boverket 1993-01-25.

Verkasalo, E.; Kilpeläinen, H.; Wall, T. & Hanhijärvi, A. 2007. Suomalaisen ja venäläisen mänty- ja kuusisahatavaran taivutusominaisuuksien vertailu. Joensuu: Metsäntutkimuslaitos.

Verkasalo, E.; Kilpeläinen, H.; Wall, T. & Kannisto, K. 2007. Venäjän tuontikuusen laatu ja arvo vaativissa rakennustuotteissa ja rakennuspuusepäntuotteissa – vertailukohdina suomalainen kuusi. Joensuu: Metsäntutkimuslaitos.

Vick, C. B. & Okkonen, E. A. 1998. Strength and durability of one-part polyurethane adhesive bonds to wood. Forest Products Journal. Vol. 48, No. 11/12, 71–76.

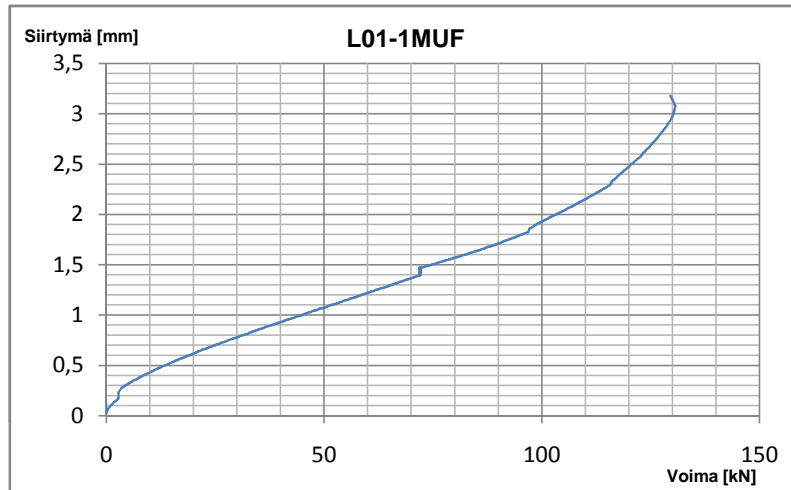
Vick, C. B. & Okkonen, E. A. 2000. Durability of one-part polyurethane bonds to wood improved by HMR coupling agent. Forest Products Journal. Vol. 1, No. 10, 69–75.

Wiegand, T. 2009 [Informationsbroschüre KVH[®], Duobalken[®], Triobalken](http://www.kvh.eu/en/duobalken-and-triobalken). Wuppertal, Germany. Viitattu 25.8.2011 <http://www.kvh.eu/en/duobalken-and-triobalken>.

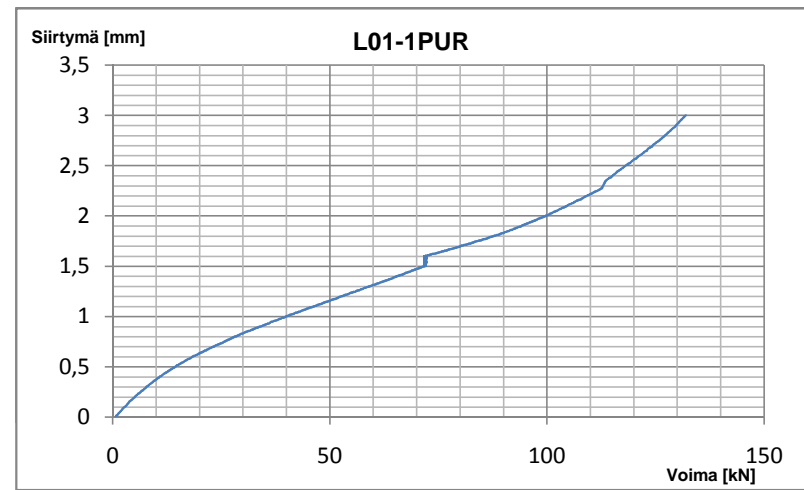
Ympäristöministeriö 2010. Puurakentamisen asema rakentamismääräyksissä. Työryhmän loppuraportti. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Leikkauskokeiden tulokset

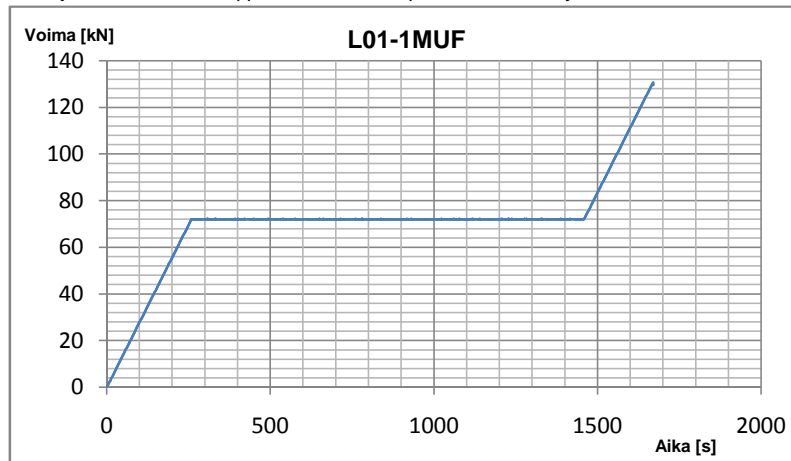
Tunnus	A_{sauma} [mm ²]	F_{max} [kN]	τ [N/mm ²]	σ_c [N/mm ²]	Murtotapa
L01-1 MUF	28200	130,7	4,6	24,8	leikkaantuminen liimasauman vierestä
L01-2 MUF	28294	131,1	4,6	24,9	leikkaantuminen liimasauman vierestä
L01-3 MUF	28200	133,3	4,7	25,3	puristusmurto ja leikkaantuminen koekappaleen keskeltä
L01-1 PUR	28200	145,2	5,2	26,9	puristusmurto oksan kohdalta
L01-2 PUR	28200	121,9	4,3	23,0	puristusmurto oksan kohdalta
L01-3 PUR	27600	151,2	5,5	29,1	leikkaantuminen liimasauman vierestä
L02-1 MUF	28200	123,8	4,4	23,3	puristusmurto yläosassa
L02-2 MUF	28896	143,5	5,0	26,2	puristusmurto yläosassa
L02-3 MUF	28992	151,5	5,2	27,7	puristusmurto yläosassa
L02-1 PUR	28800	163,0	5,7	29,8	halkeama kappaleen alaosaan + puristusmurto
L02-2 PUR	29040	135,2	4,7	24,7	puristusmurto oksan kohdalta, yläosassa
L02-3 PUR	29040	151,4	5,2	27,7	puristusmurto yläosassa
Keskiarvo	28471,8	140,2	4,9	26,1	
Keskihajonta	463,7	12,7	0,4	2,2	
A_{sauma} = liimasaumojen pinta-ala yhteensä F_{max} = murtokuorma τ = liimasaumassa esiintyvä leikkausjännitys murtohetkellä, $\tau = F_{max} / A_{sauma}$ σ_c = keskimmäiseen lamelliin muodostunut syysuuntainen puristusjännitys					



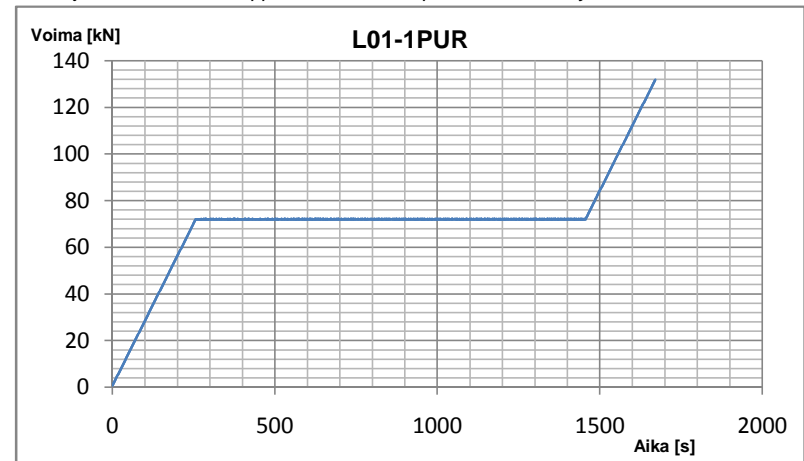
Kuvaaja 1.1.1 Koekappaleen L01-1MUF puristusvoima siirtymän funktiona.



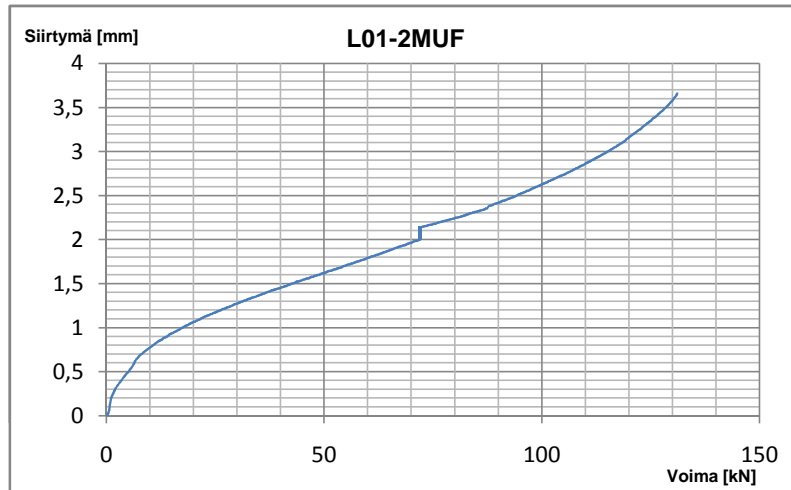
Kuvaaja 1.1.3 Koekappaleen L01-1PUR puristusvoima siirtymän funktiona.



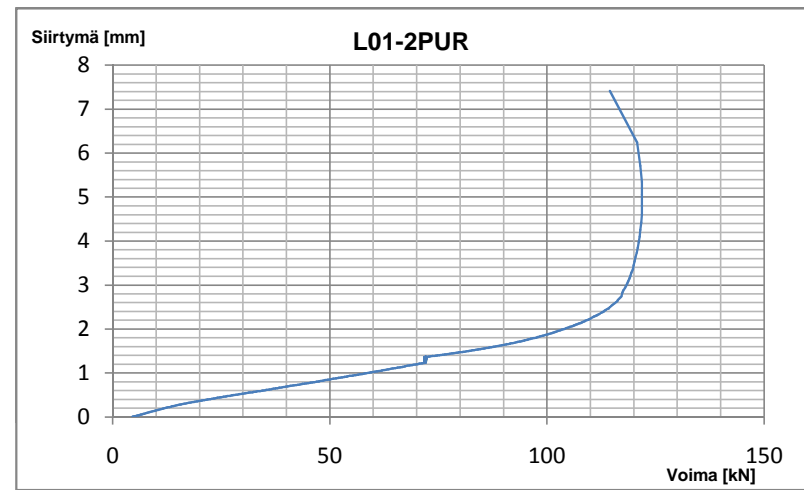
Kuvaaja 1.1.2 Koekappaleen L01-1MUF toteutunut kuormitusohjelma



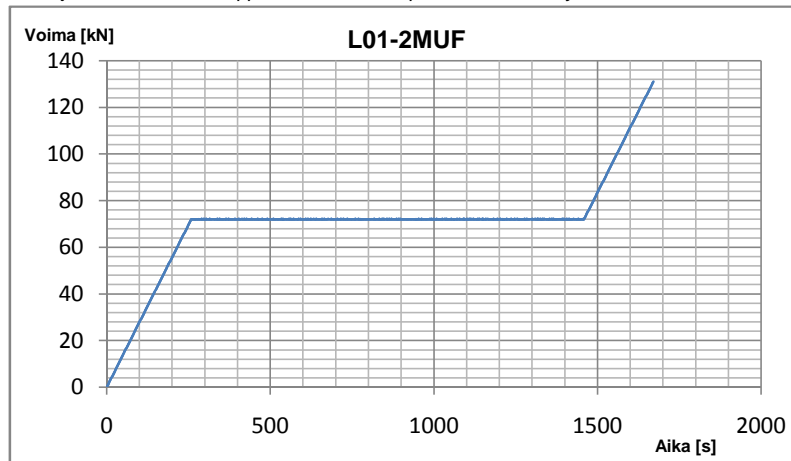
Kuvaaja 1.1.4 Koekappaleen L01-1PUR toteutunut kuormitusohjelma



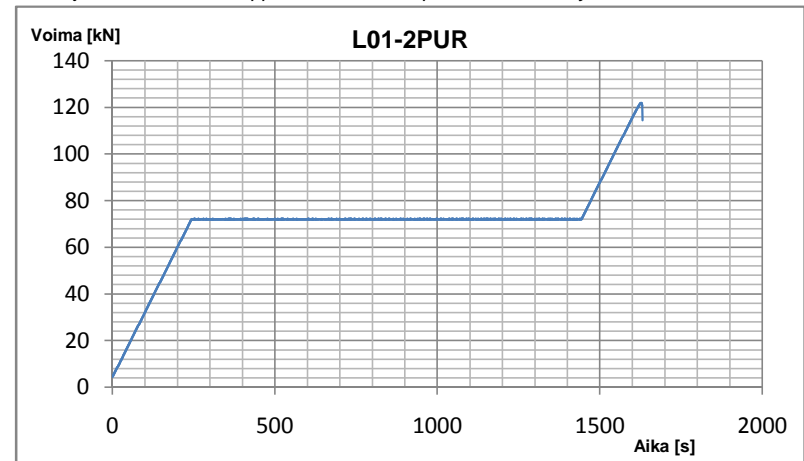
Kuvaaja 1.2.1 Koekappaleen L01-2MUF puristusvoima siirtymän funktiona.



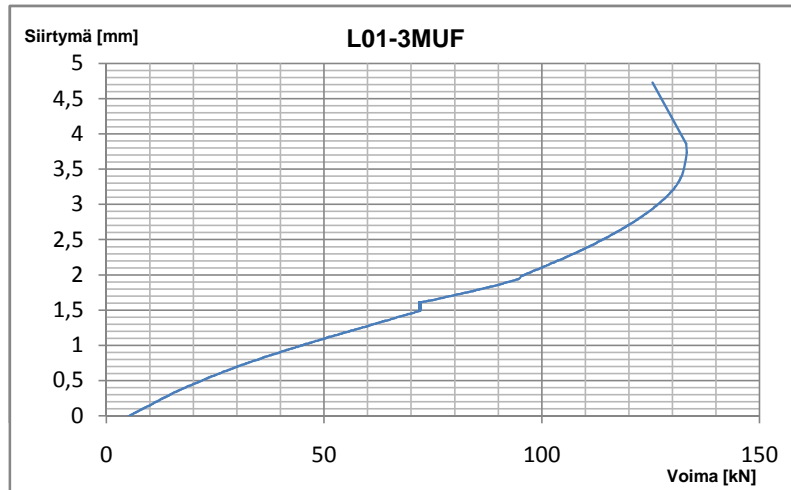
Kuvaaja 1.2.3 Koekappaleen L01-2PUR puristusvoima siirtymän funktiona.



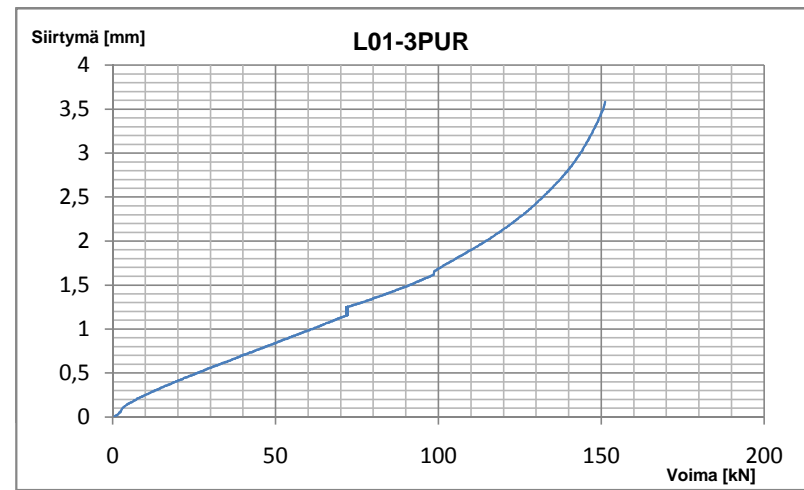
Kuvaaja 1.2.2 Koekappaleen L01-2MUF toteutunut kuormitusohjelma



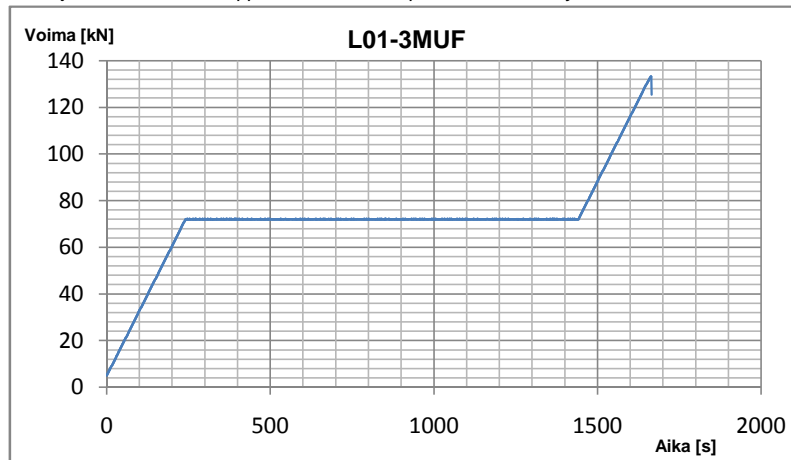
Kuvaaja 1.2.4 Koekappaleen L01-2PUR toteutunut kuormitusohjelma



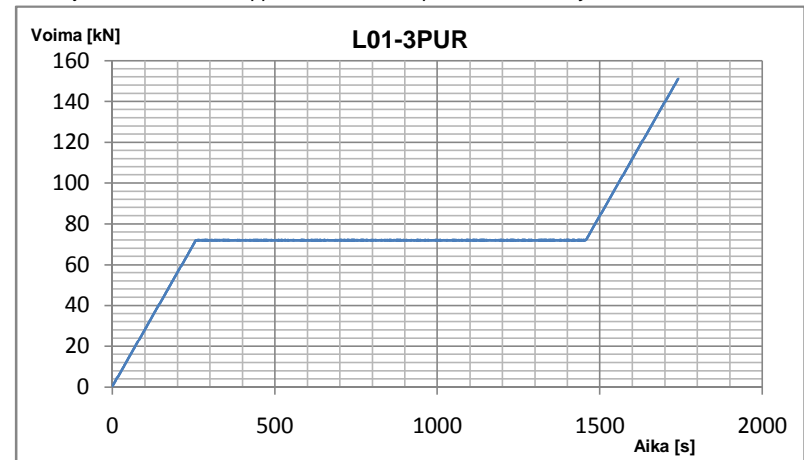
Kuvaaja 1.3.1 Koekappaleen L01-3MUF puristusvoima siirtymän funktiona.



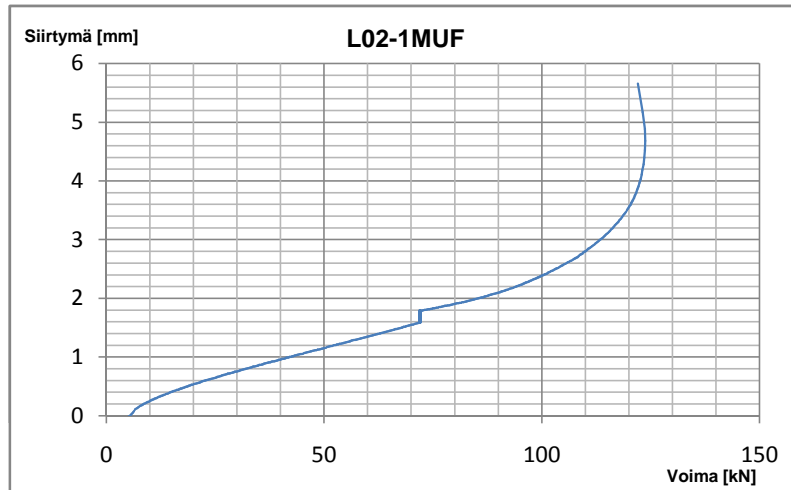
Kuvaaja 1.3.3 Koekappaleen L01-3PUR puristusvoima siirtymän funktiona.



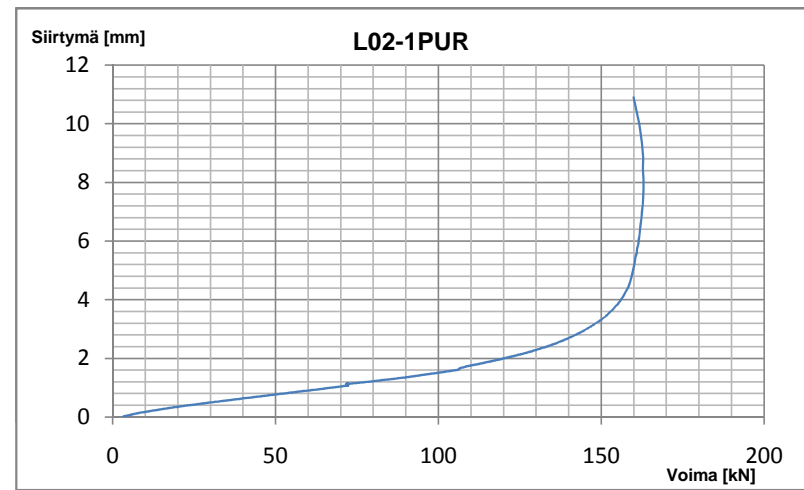
Kuvaaja 1.3.2 Koekappaleen L01-3MUF toteutunut kuormitusohjelma



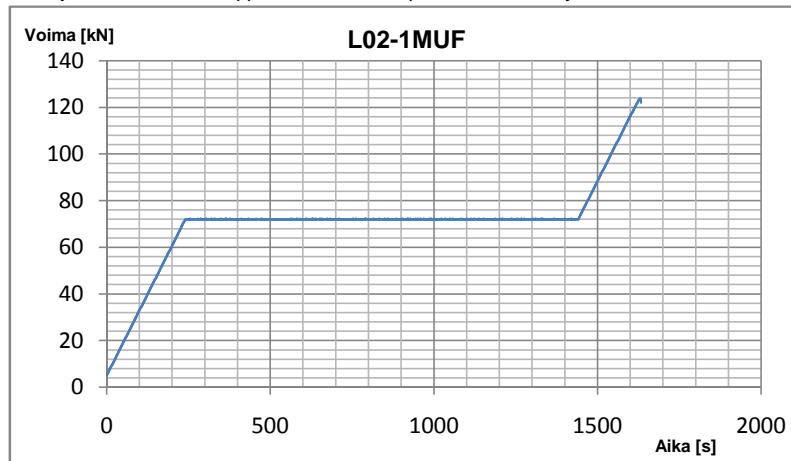
Kuvaaja 1.3.4 Koekappaleen L01-3PUR toteutunut kuormitusohjelma



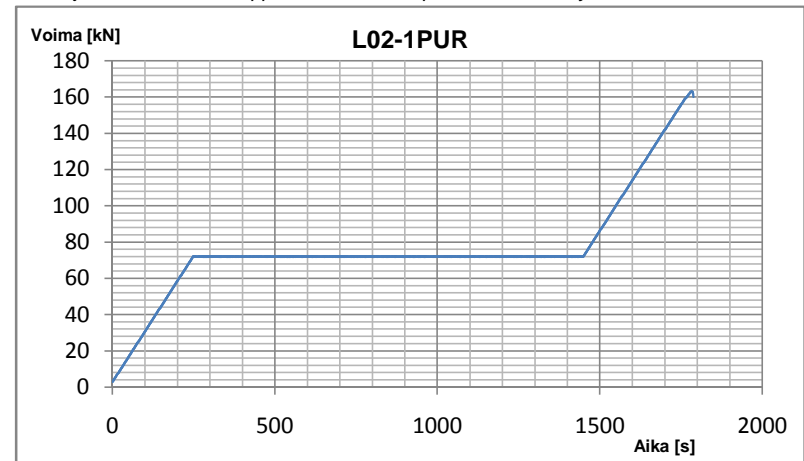
Kuvaaja 1.4.1 Koekappaleen L02-1MUF puristusvoima siirtymän funktiona.



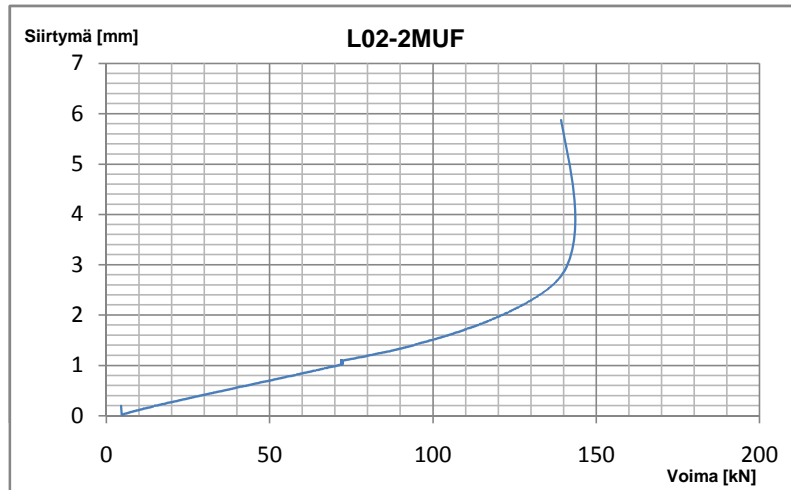
Kuvaaja 1.4.3 Koekappaleen L02-1PUR puristusvoima siirtymän funktiona.



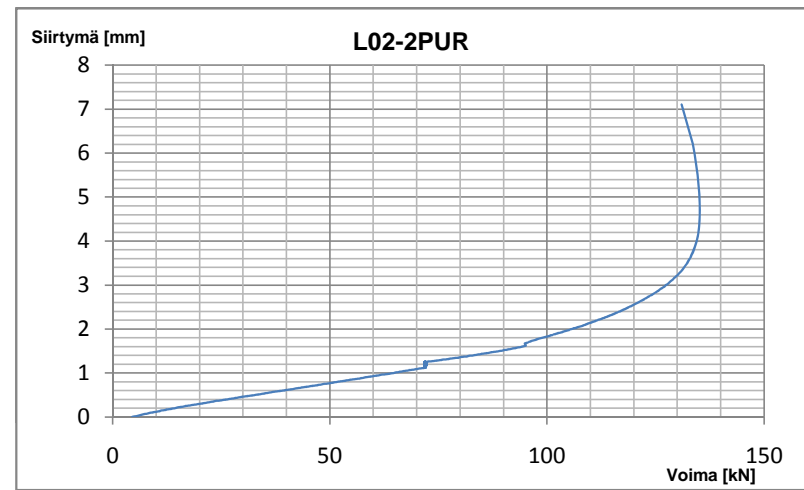
Kuvaaja 1.4.2 Koekappaleen L02-1MUF toteutunut kuormitusohjelma



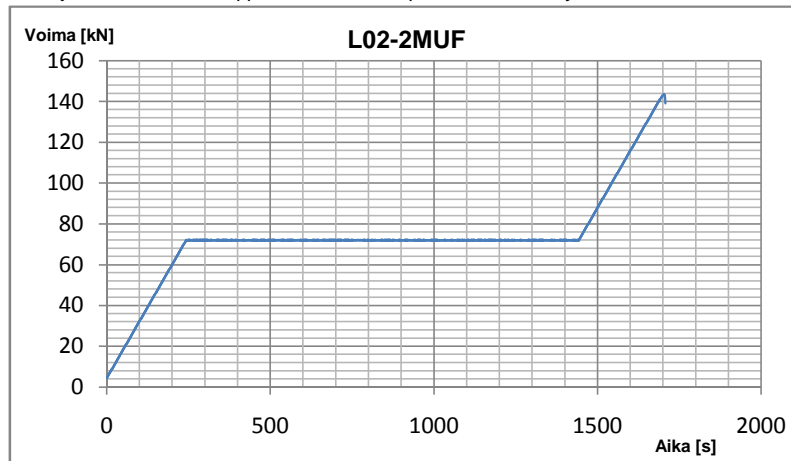
Kuvaaja 1.4.4 Koekappaleen L02-1PUR toteutunut kuormitusohjelma



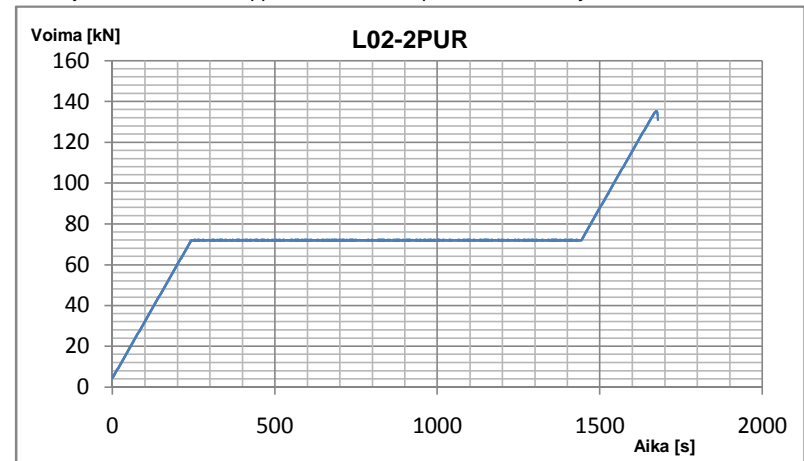
Kuvaaja 1.5.1 Koekappaleen L02-2MUF puristusvoima siirtymän funktiona.



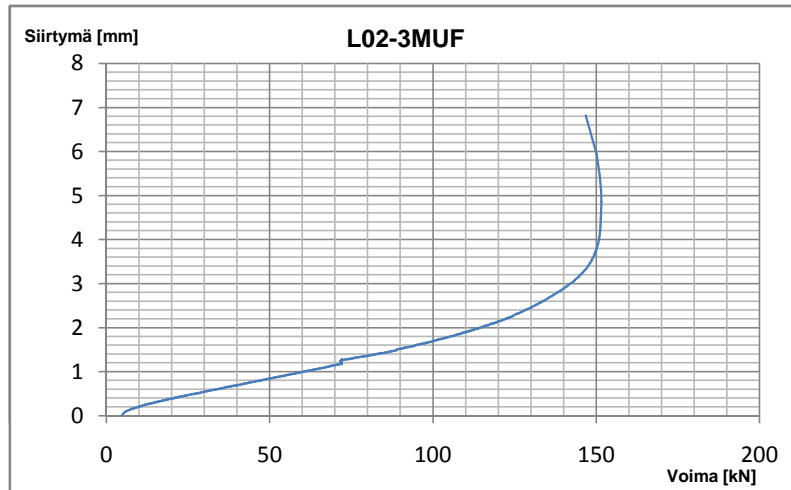
Kuvaaja 1.5.3 Koekappaleen L02-2PUR puristusvoima siirtymän funktiona.



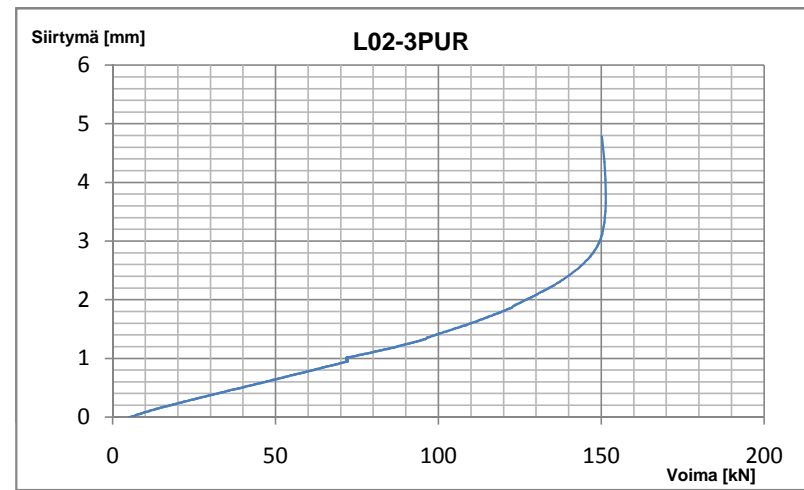
Kuvaaja 1.5.2 Koekappaleen L02-2MUF toteutunut kuormitusohjelma



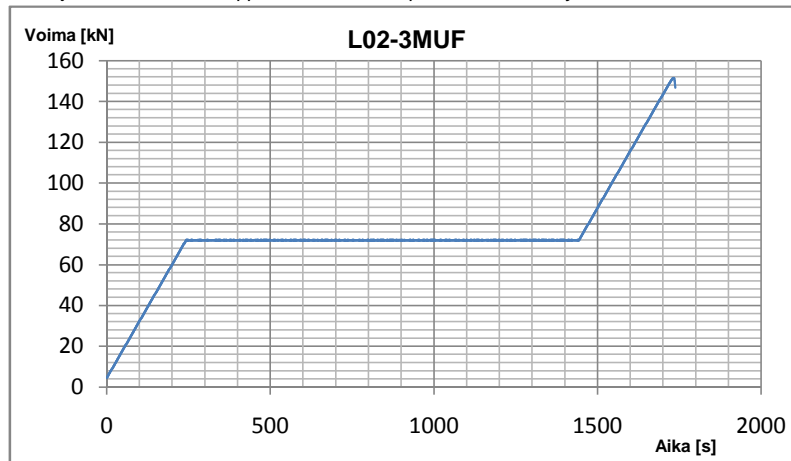
Kuvaaja 1.5.4 Koekappaleen L02-2PUR toteutunut kuormitusohjelma



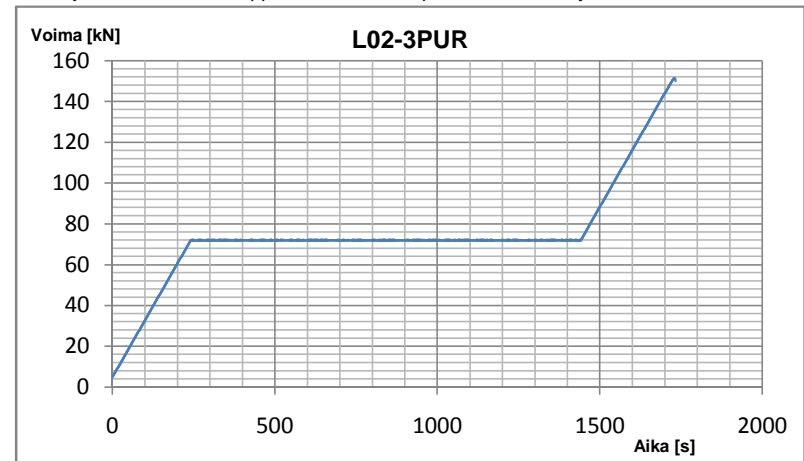
Kuvaaja 1.6.1 Koekappaleen L02-3MUF puristusvoima siirtymän funktiona.



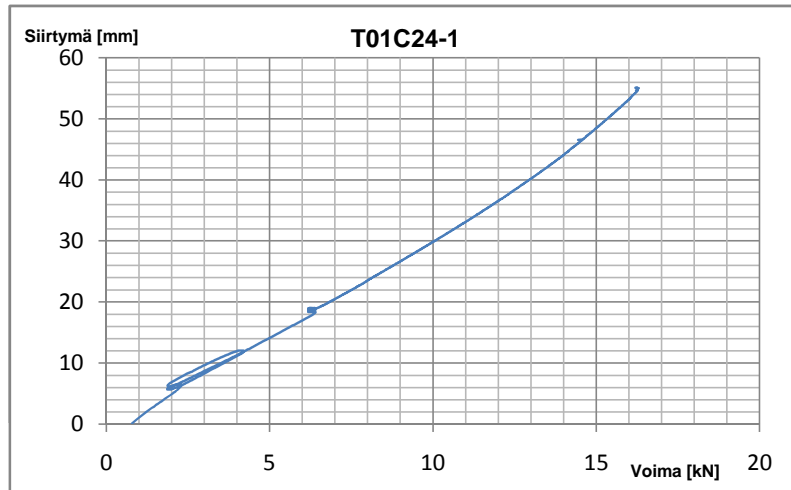
Kuvaaja 1.6.3 Koekappaleen L02-3PUR puristusvoima siirtymän funktiona.



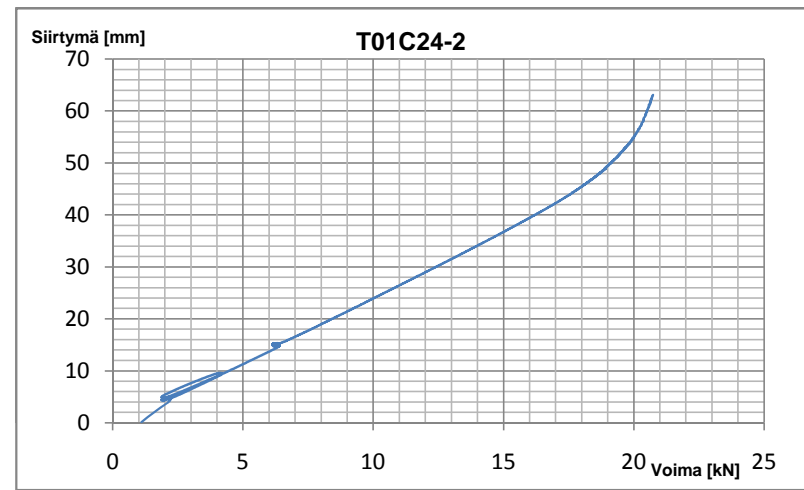
Kuvaaja 1.6.2 Koekappaleen L02-3MUF toteutunut kuormitusohjelma



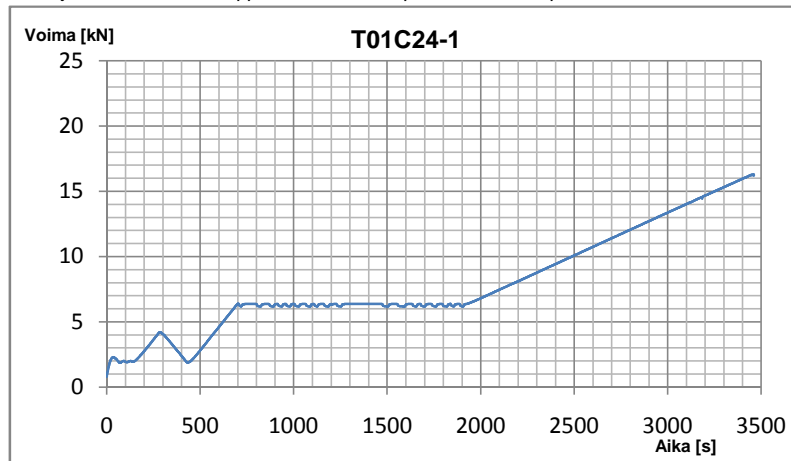
Kuvaaja 1.6.4 Koekappaleen L02-3PUR toteutunut kuormitusohjelma



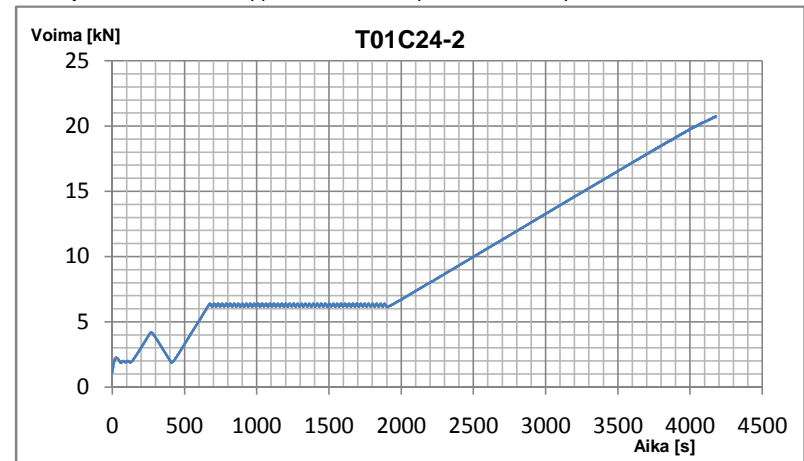
Kuvaaja 2.1.1 Koekappaleen T01C24-1 puristusvoima taipuman funktiona.



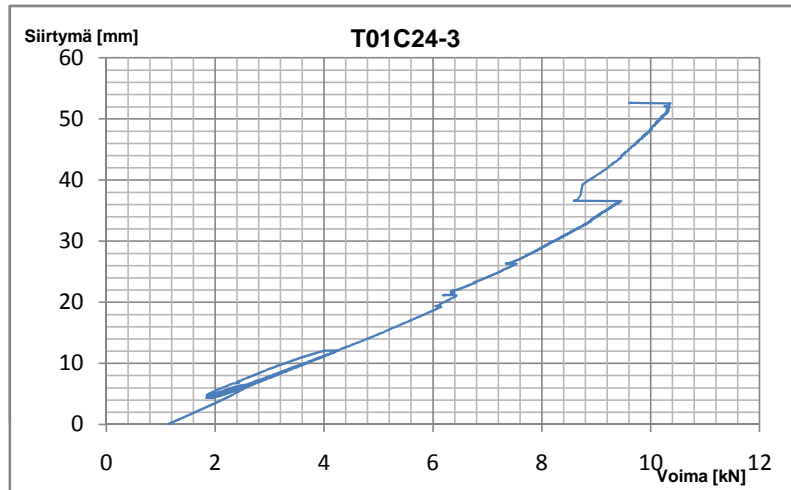
Kuvaaja 2.1.3 Koekappaleen T01C24-2 puristusvoima taipuman funktiona.



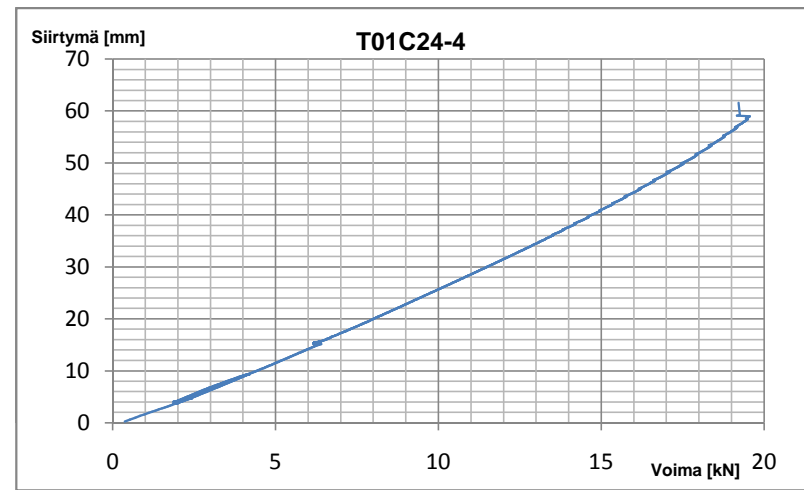
Kuvaaja 2.1.2 Koekappaleen T01C24-1 toteutunut kuormitusohjelma



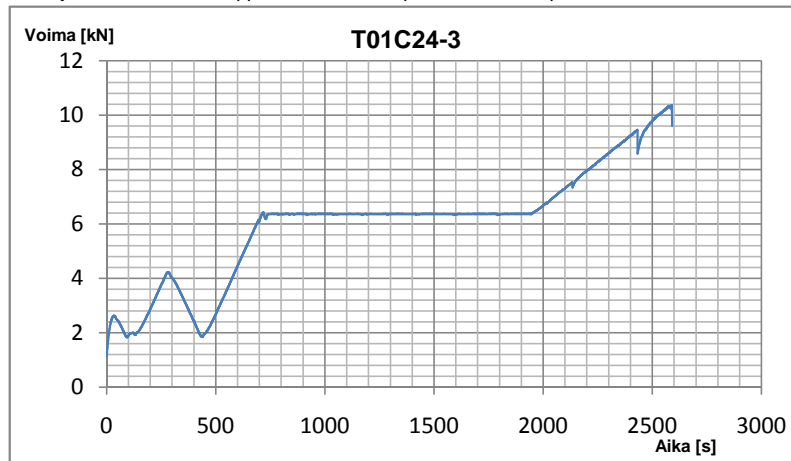
Kuvaaja 2.1.4 Koekappaleen T01C24-2 toteutunut kuormitusohjelma



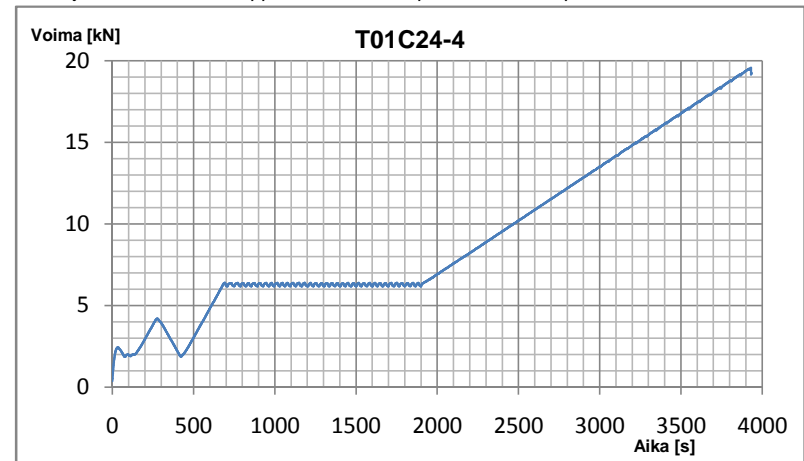
Kuvaaja 2.2.1 Koekappaleen T01C24-3 puristusvoima taipuman funktiona.



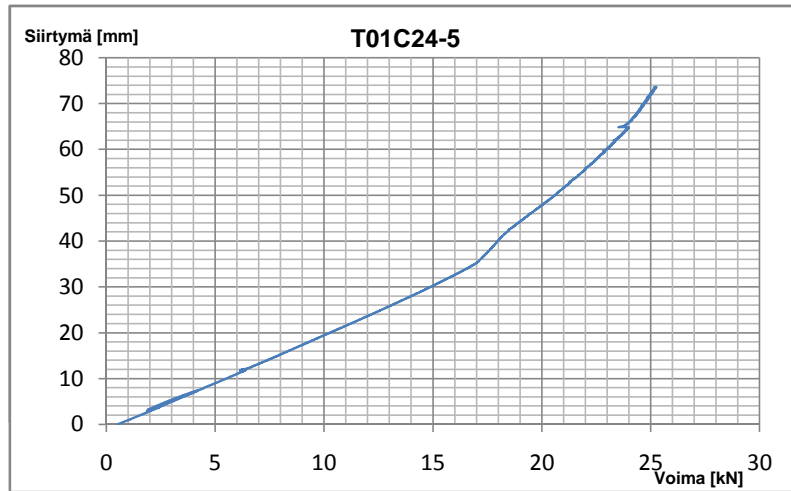
Kuvaaja 2.2.3 Koekappaleen T01C24-4 puristusvoima taipuman funktiona.



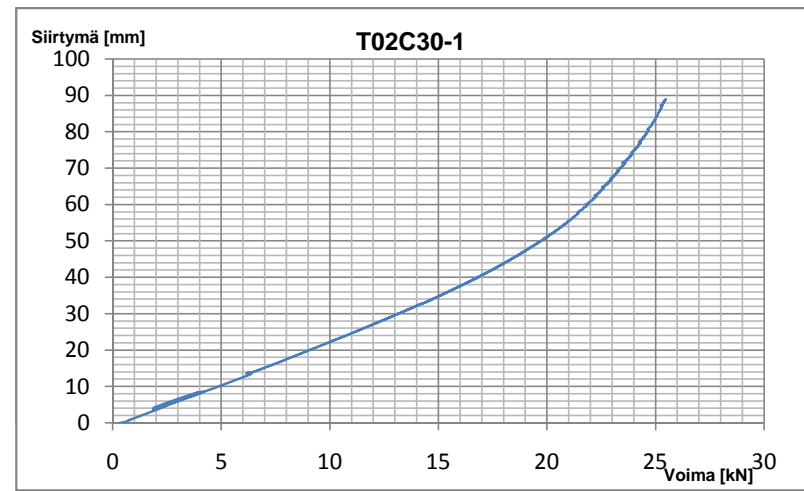
Kuvaaja 2.2.2 Koekappaleen T01C24-3 toteutunut kuormitusohjelma



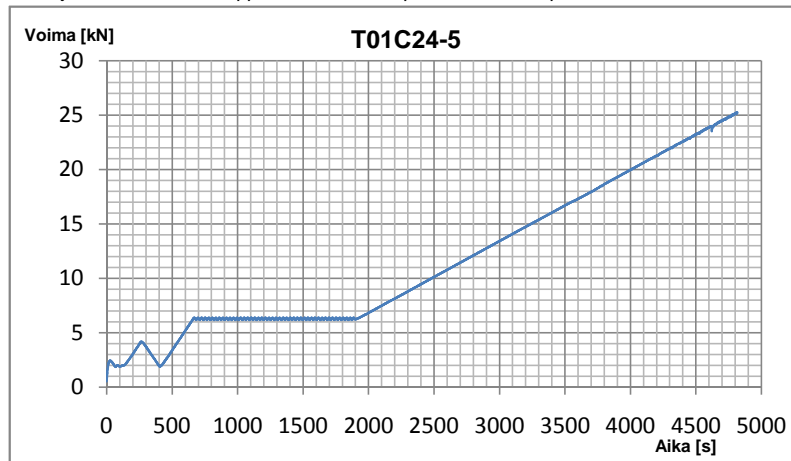
Kuvaaja 2.2.4 Koekappaleen T01C24-4 toteutunut kuormitusohjelma



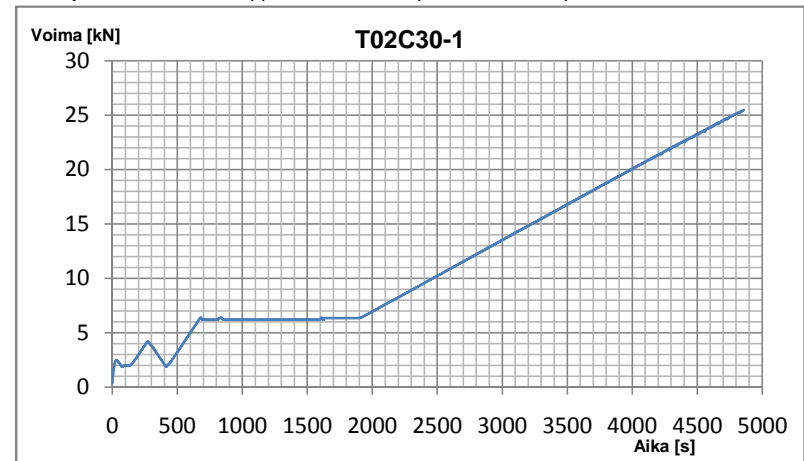
Kuvaaja 2.3.1 Koekappaleen T01C24-5 puristusvoima taipuman funktiona.



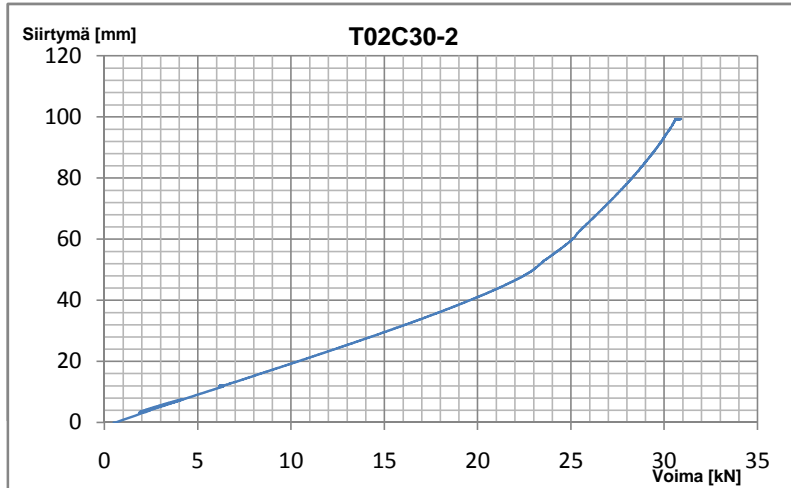
Kuvaaja 2.3.3 Koekappaleen T02C30-1 puristusvoima taipuman funktiona.



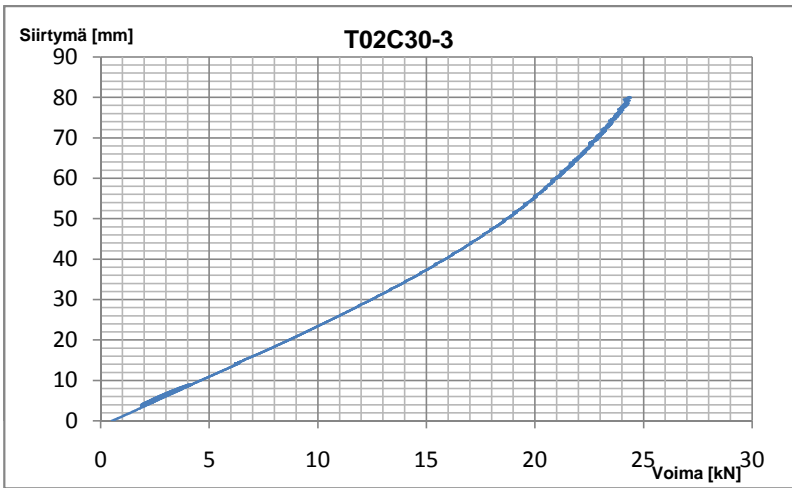
Kuvaaja 2.3.2 Koekappaleen T01C24-5 toteutunut kuormitusohjelma



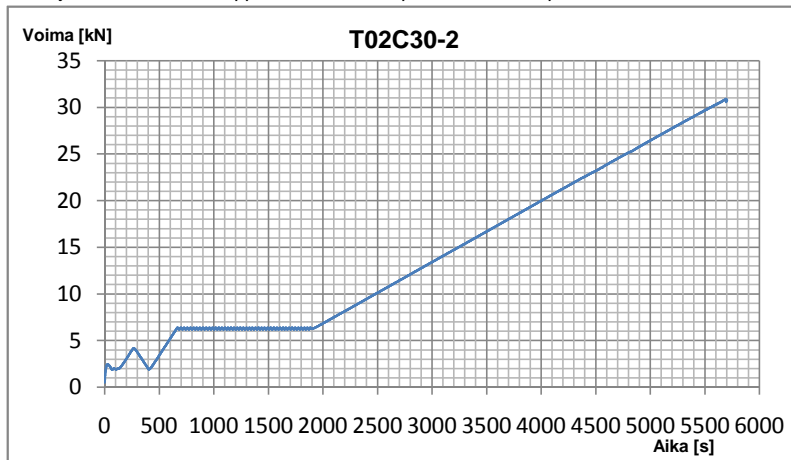
Kuvaaja 2.3.4 Koekappaleen T02C30-1 toteutunut kuormitusohjelma



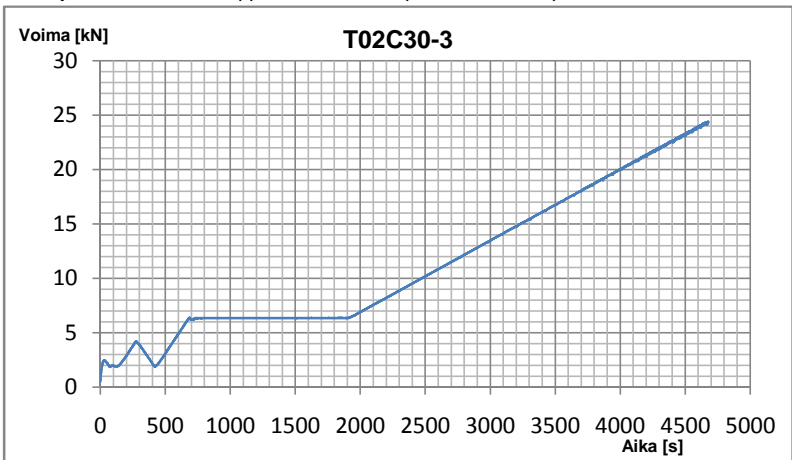
Kuvaaja 2.4.1 Koekappaleen T02C30-2 puristusvoima taipuman funktiona.



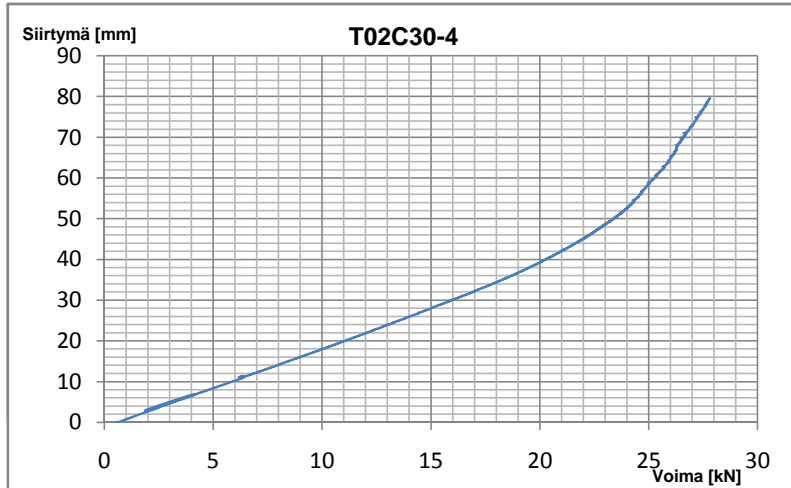
Kuvaaja 2.4.3 Koekappaleen T02C30-3 puristusvoima taipuman funktiona.



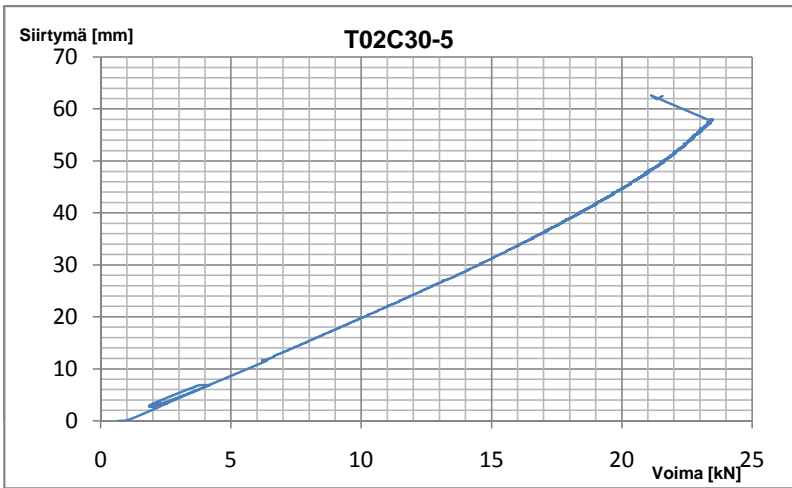
Kuvaaja 2.4.2 Koekappaleen T02C30-2 toteutunut kuormitusohjelma



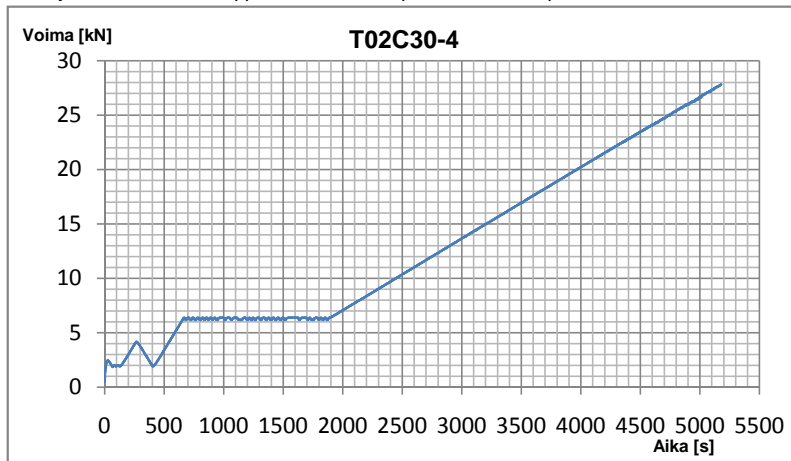
Kuvaaja 2.4.4 Koekappaleen T02C30-3 toteutunut kuormitusohjelma



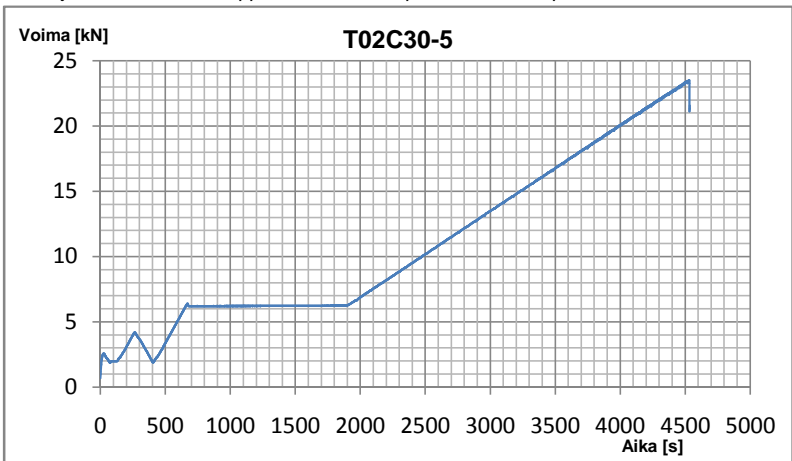
Kuvaaja 2.5.1 Koekappaleen T02C30-4 puristusvoima taipuman funktiona.



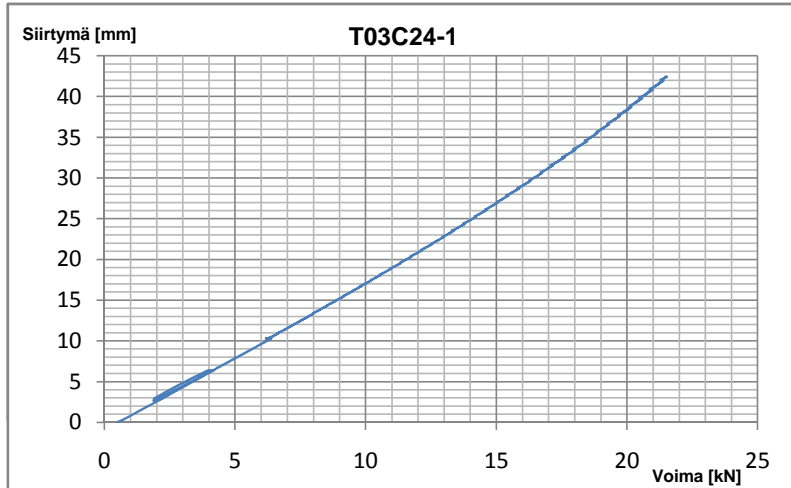
Kuvaaja 2.5.3 Koekappaleen T02C30-5 puristusvoima taipuman funktiona.



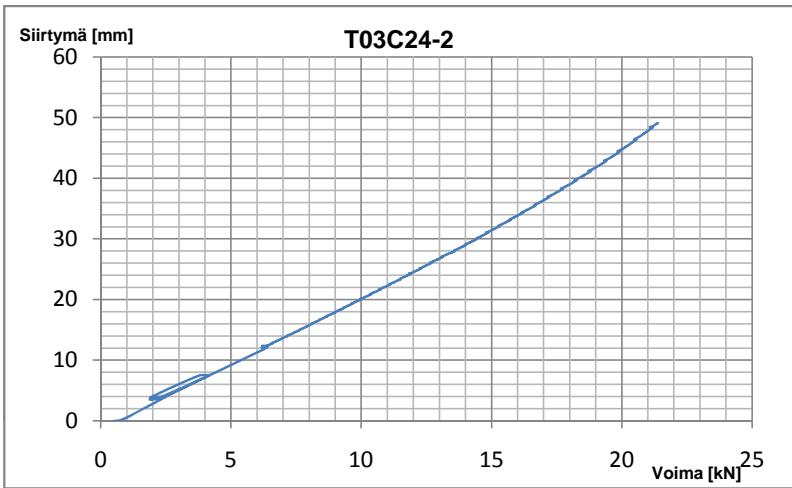
Kuvaaja 2.5.2 Koekappaleen T02C30-4 toteutunut kuormitusohjelma



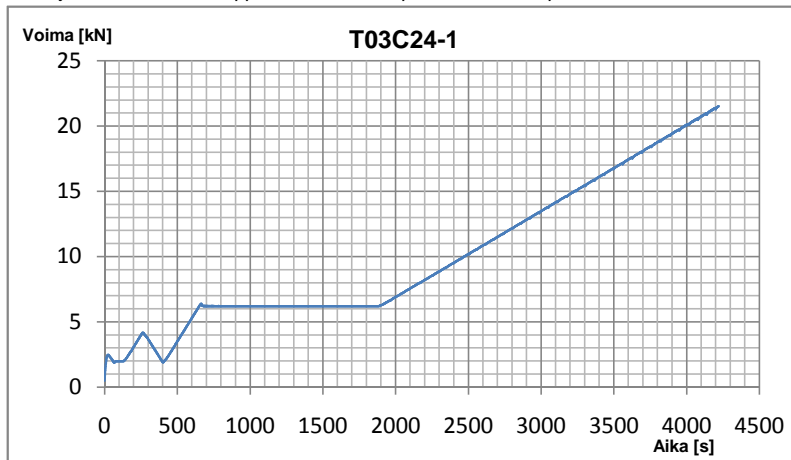
Kuvaaja 2.5.4 Koekappaleen T02C30-5 toteutunut kuormitusohjelma



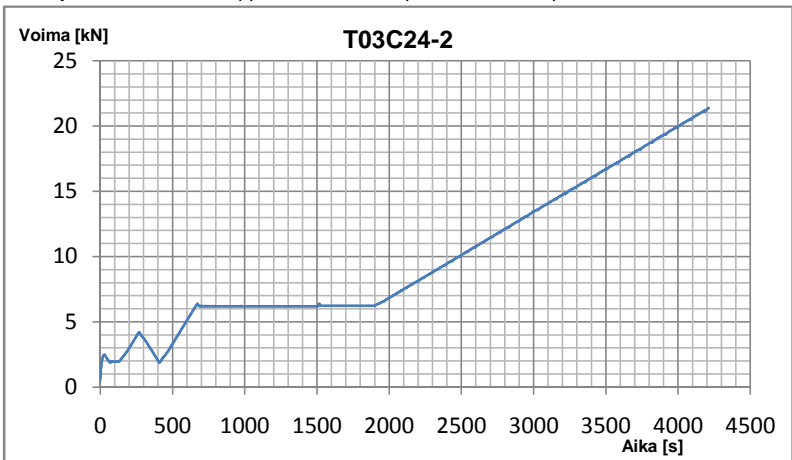
Kuvaaja 2.6.1 Koekappaleen T03C24-1 puristusvoima taipuman funktiona.



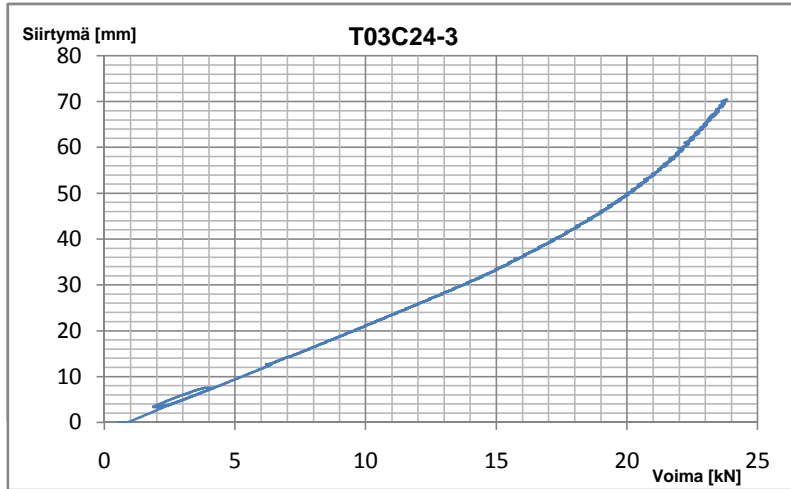
Kuvaaja 2.6.3 Koekappaleen T03C24-2 puristusvoima taipuman funktiona.



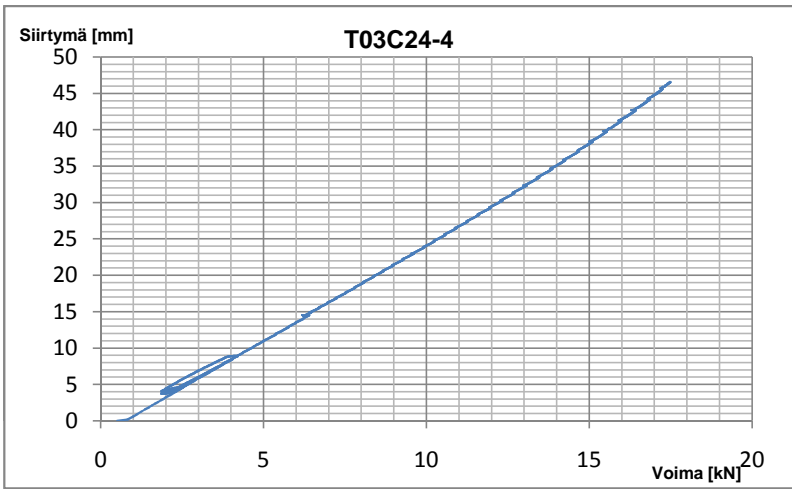
Kuvaaja 2.6.2 Koekappaleen T03C24-1 toteutunut kuormitusohjelma



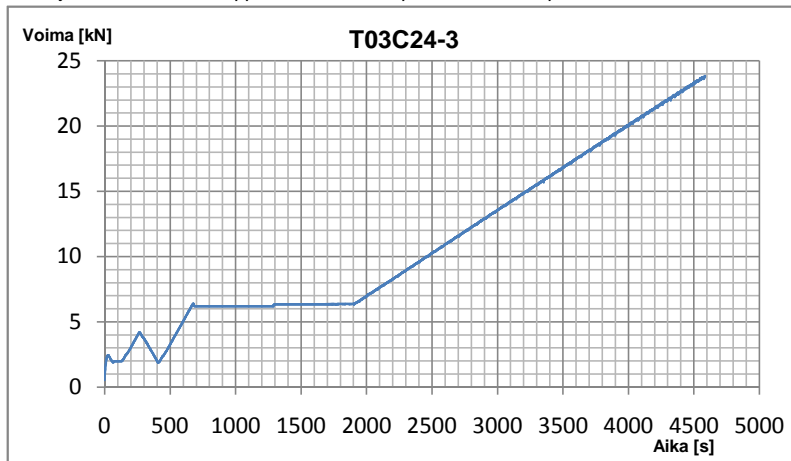
Kuvaaja 2.6.4 Koekappaleen T03C24-2 toteutunut kuormitusohjelma



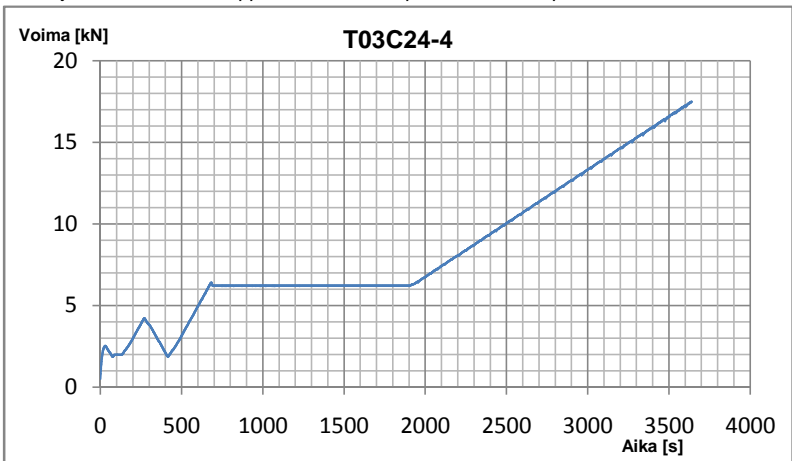
Kuvaaja 2.7.1 Koekappaleen T03C24-3 puristusvoima taipuman funktiona.



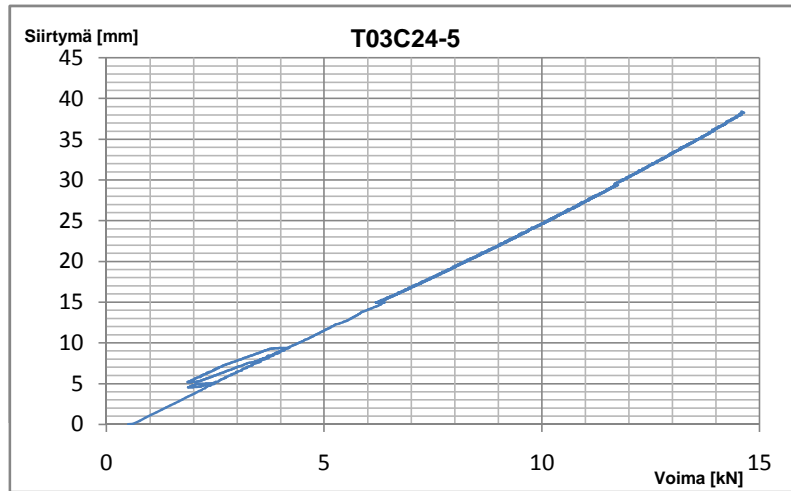
Kuvaaja 2.7.3 Koekappaleen T03C24-4 puristusvoima taipuman funktiona.



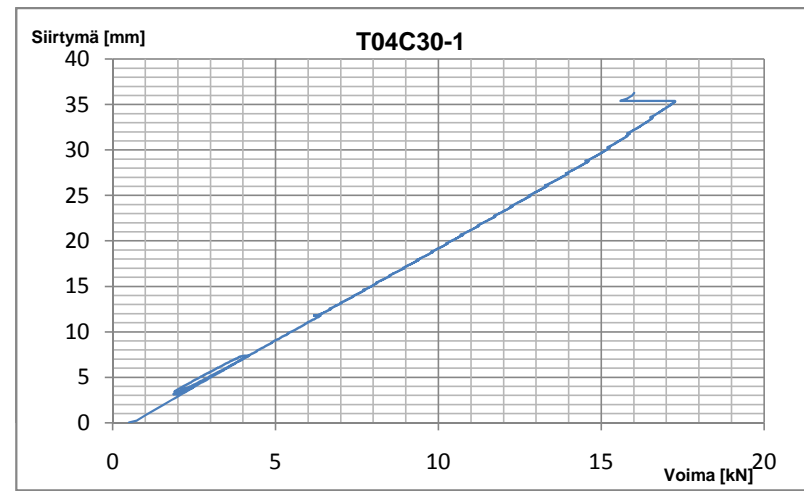
Kuvaaja 2.7.2 Koekappaleen T03C24-3 toteutunut kuormitusohjelma



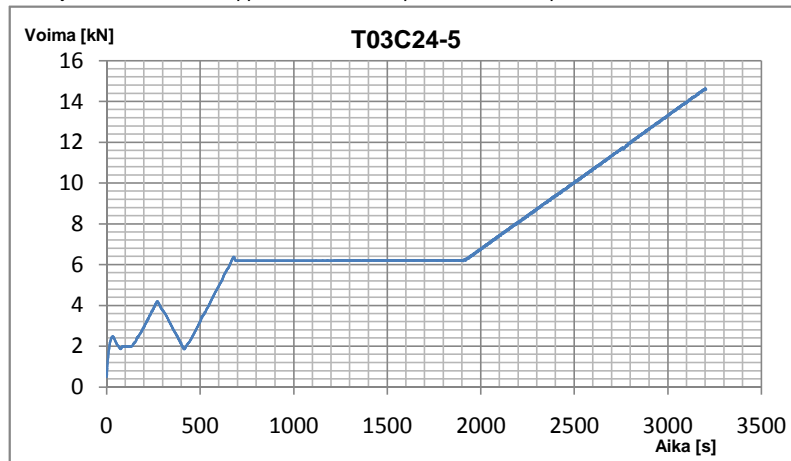
Kuvaaja 2.7.4 Koekappaleen T03C24-4 toteutunut kuormitusohjelma



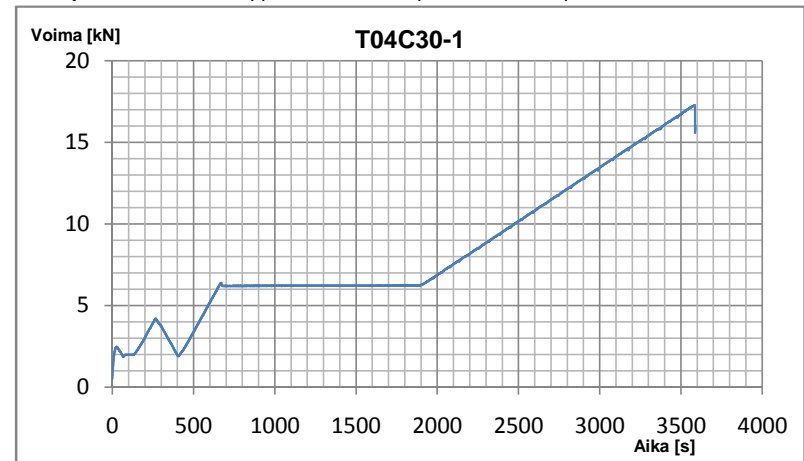
Kuvaaja 2.8.1 Koekappaleen T03C24-5 puristusvoima taipuman funktiona.



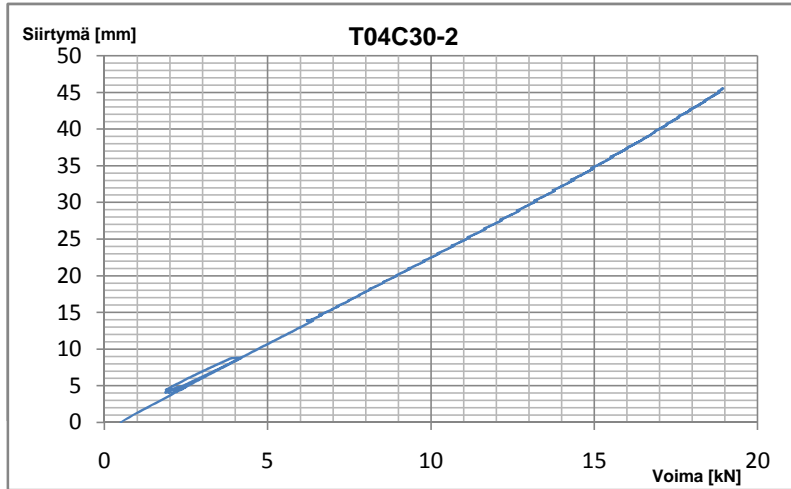
Kuvaaja 2.8.3 Koekappaleen T04C30-1 puristusvoima taipuman funktiona.



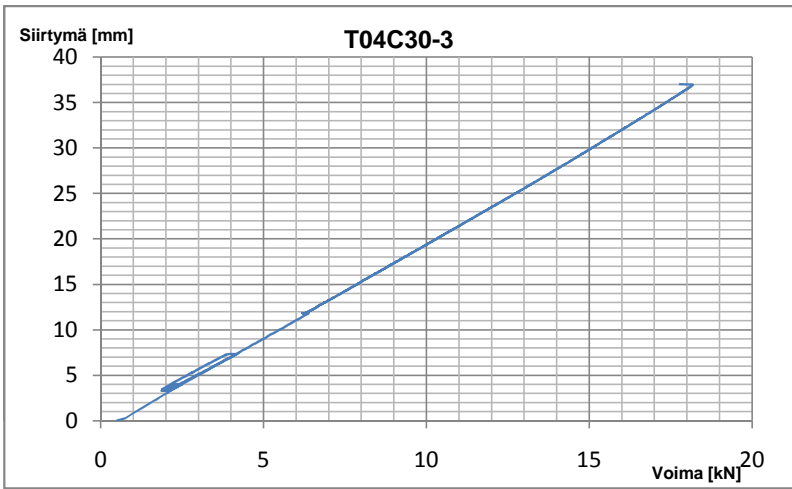
Kuvaaja 2.8.2 Koekappaleen T03C24-5 toteutunut kuormitusohjelma



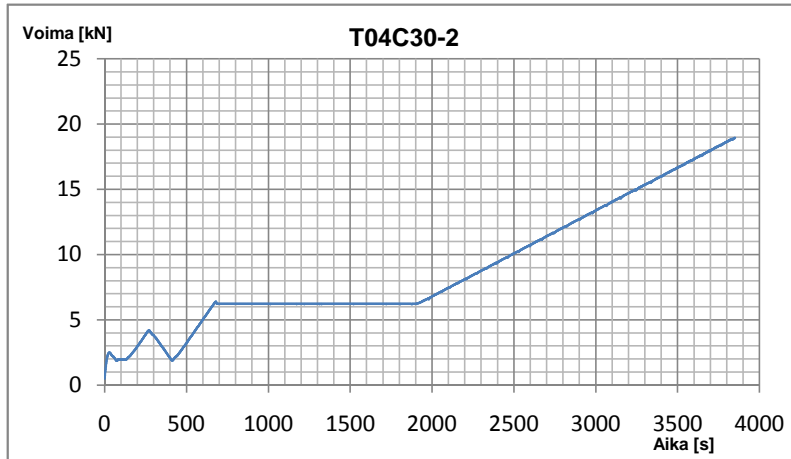
Kuvaaja 2.8.4 Koekappaleen T04C30-1 toteutunut kuormitusohjelma



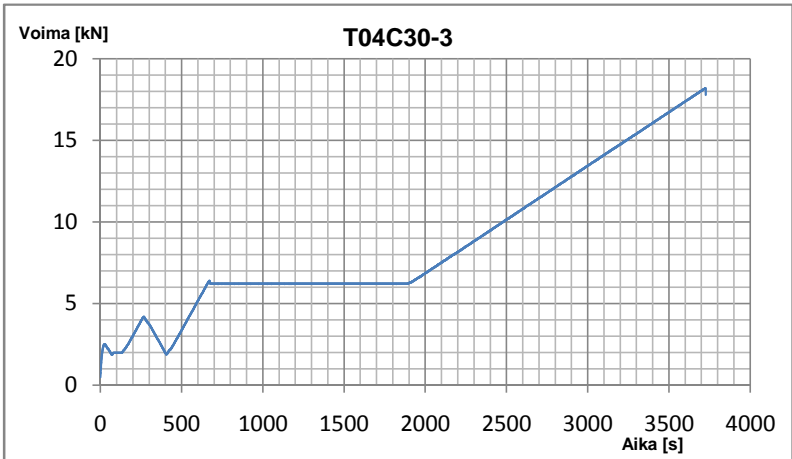
Kuvaaja 2.9.1 Koekappaleen T04C30-2 puristusvoima taipuman funktiona.



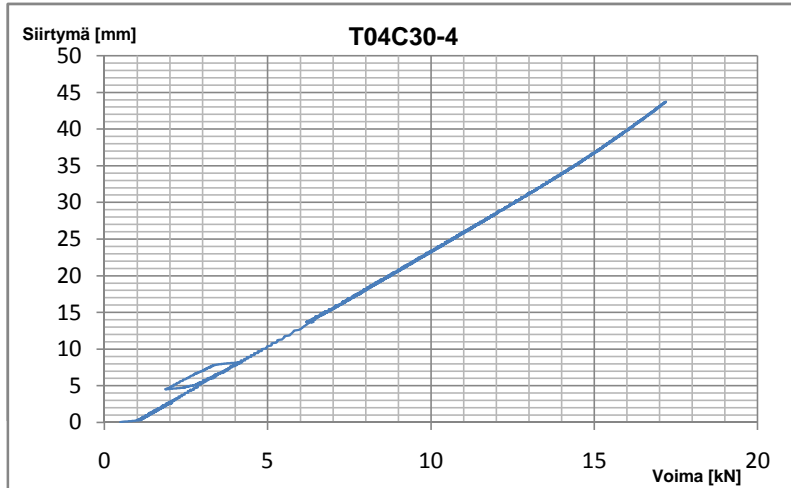
Kuvaaja 2.9.3 Koekappaleen T04C30-3 puristusvoima taipuman funktiona.



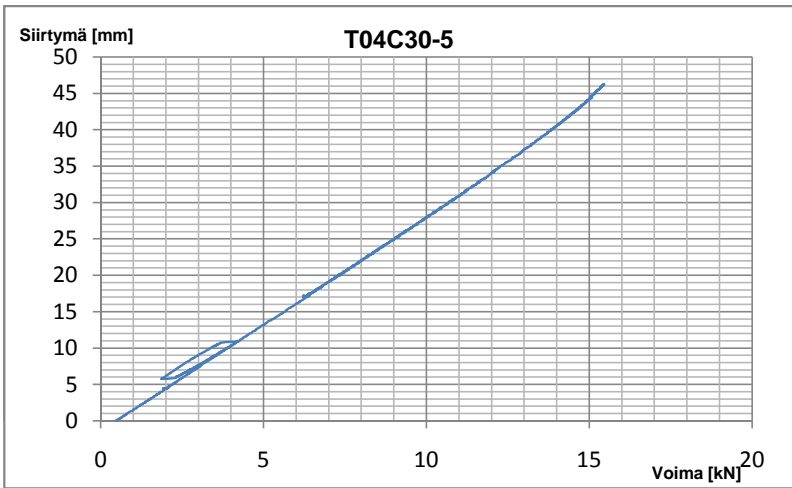
Kuvaaja 2.9.2 Koekappaleen T04C30-2 toteutunut kuormitusohjelma



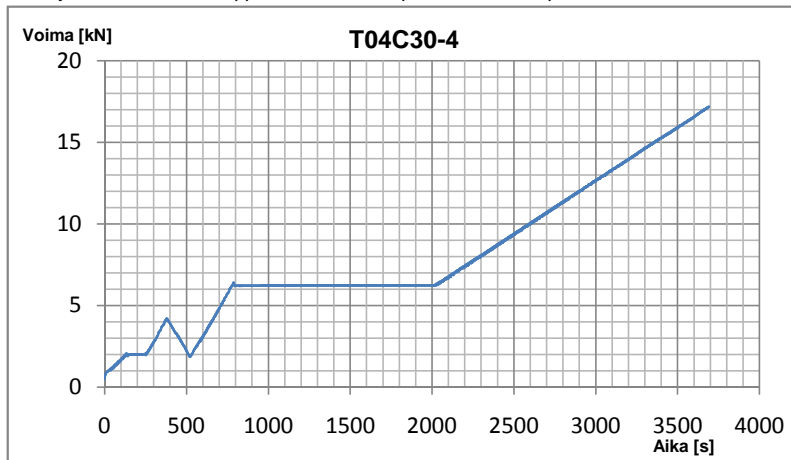
Kuvaaja 2.9.4 Koekappaleen T04C30-3 toteutunut kuormitusohjelma



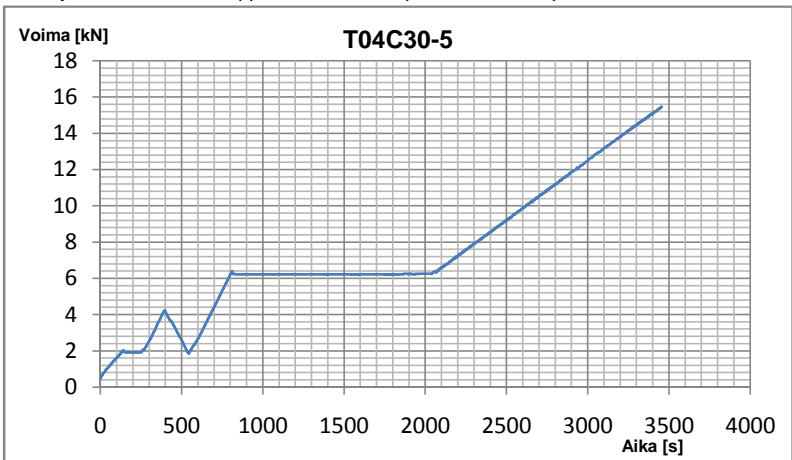
Kuvaaja 2.10.1 Koekappaleen T04C30-4 puristusvoima taipuman funktiona.



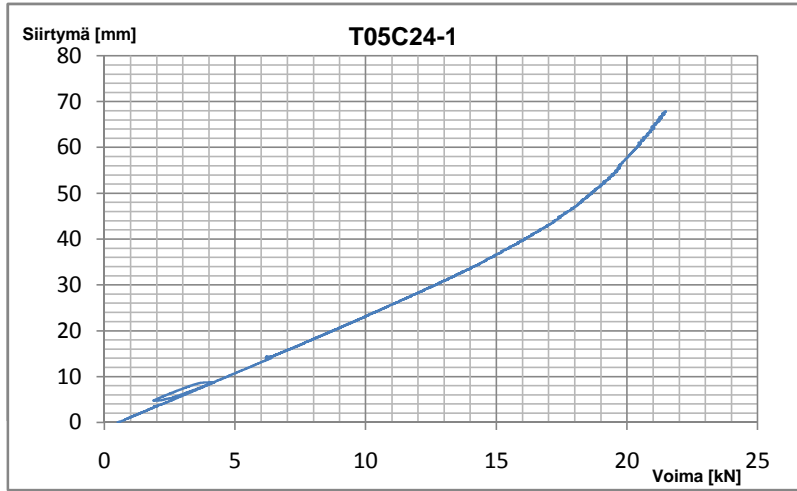
Kuvaaja 2.10.3 Koekappaleen T04C30-5 puristusvoima taipuman funktiona.



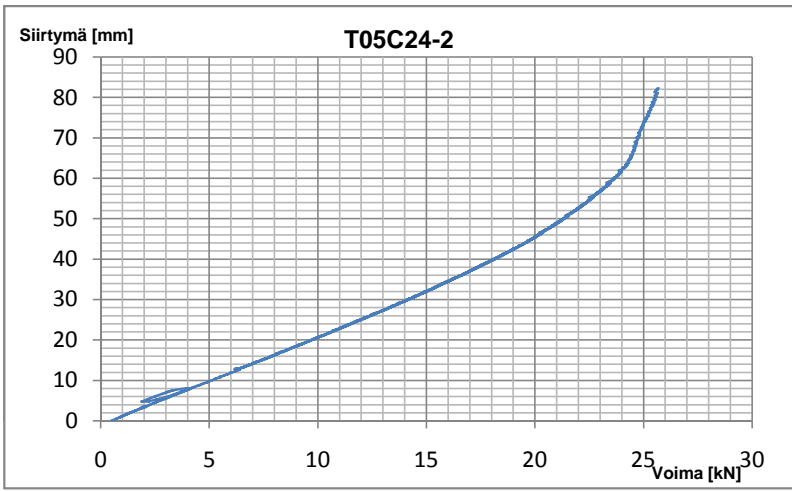
Kuvaaja 2.10.2 Koekappaleen T04C30-4 toteutunut kuormitusohjelma



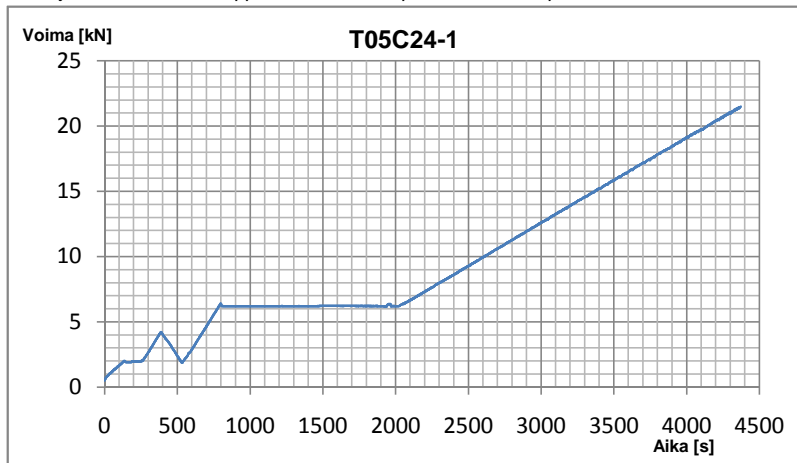
Kuvaaja 2.10.4 Koekappaleen T04C30-5 toteutunut kuormitusohjelma



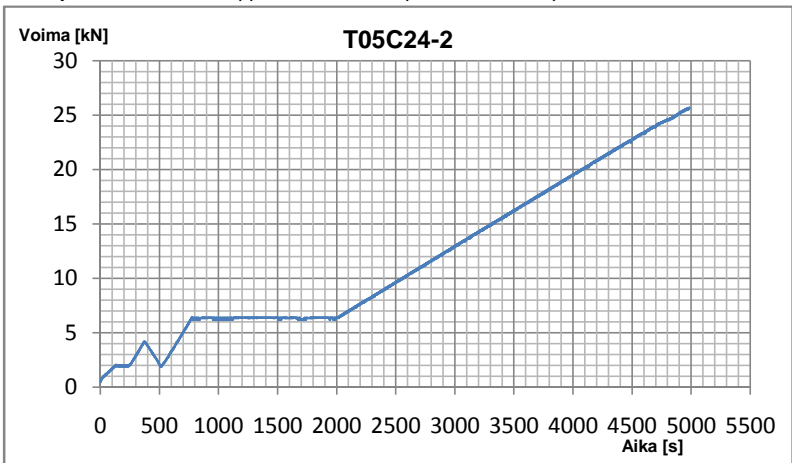
Kuvaaja 2.11.1 Koekappaleen T05C24-1 puristusvoima taipuman funktiona.



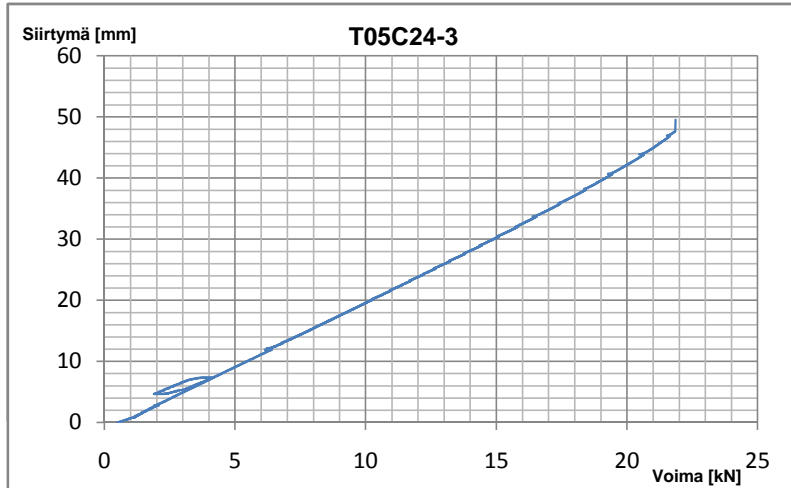
Kuvaaja 2.11.3 Koekappaleen T05C24-2 puristusvoima taipuman funktiona.



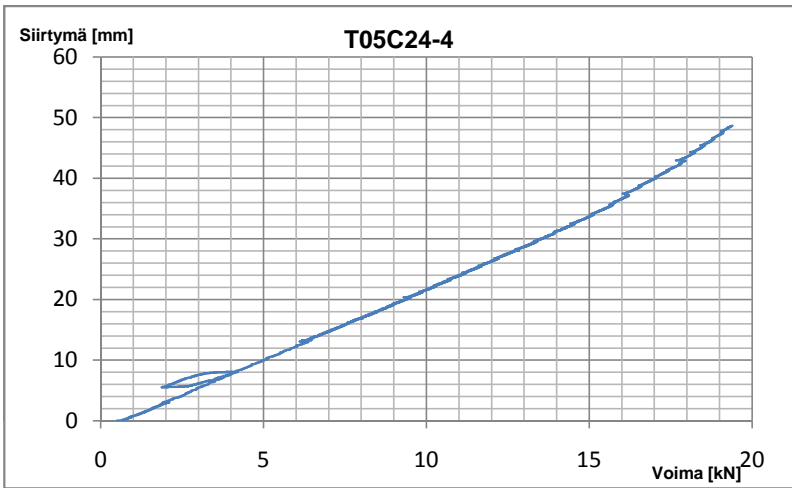
Kuvaaja 2.11.2 Koekappaleen T05C24-1 toteutunut kuormitusohjelma



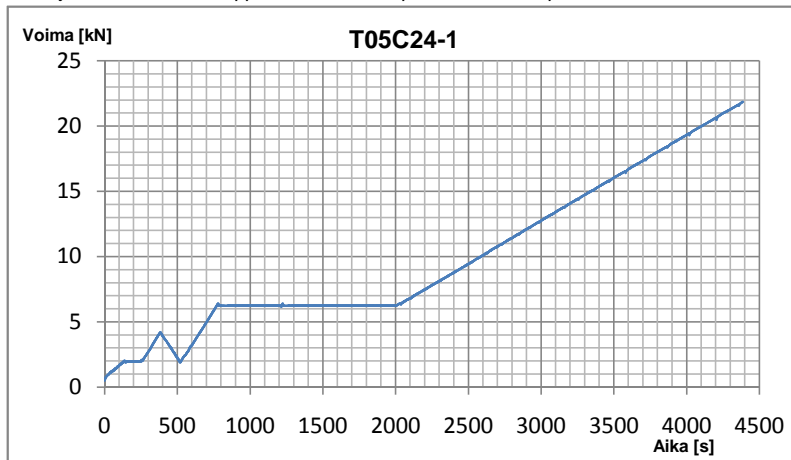
Kuvaaja 2.11.4 Koekappaleen T05C24-2 toteutunut kuormitusohjelma



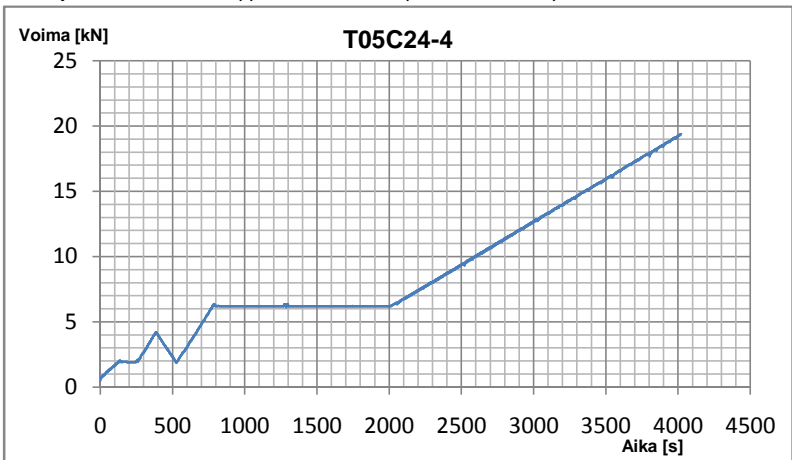
Kuvaaja 2.12.1 Koekappaleen T05C24-3 puristusvoima taipuman funktiona.



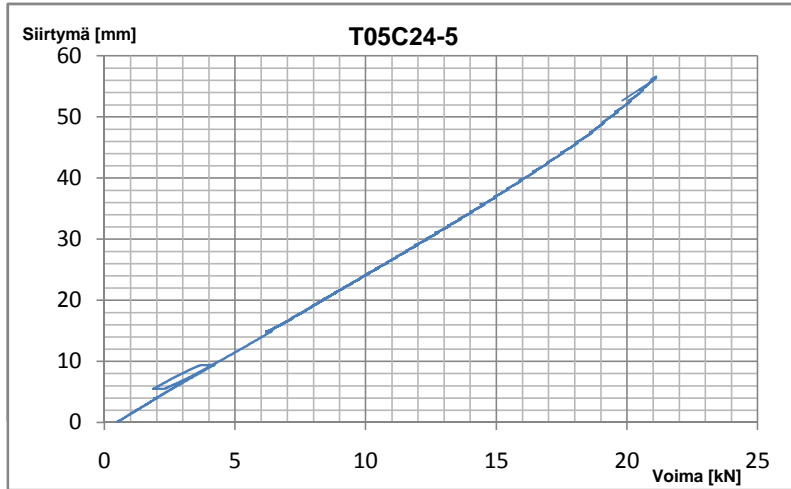
Kuvaaja 2.12.3 Koekappaleen T05C24-4 puristusvoima taipuman funktiona.



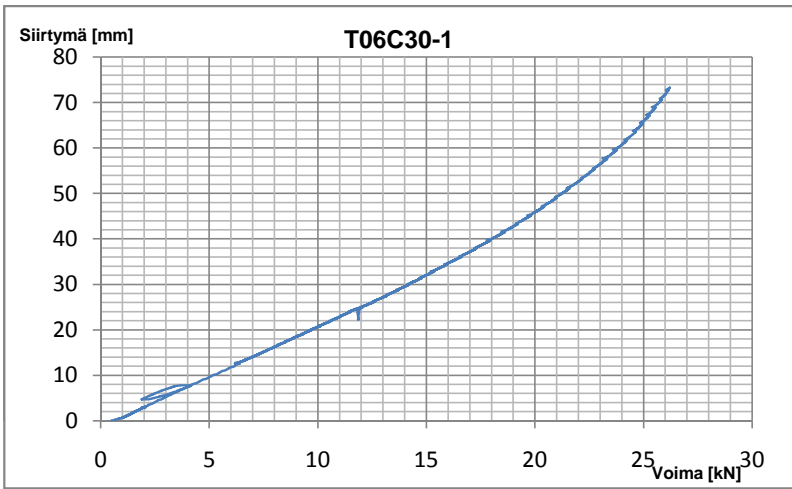
Kuvaaja 2.12.2 Koekappaleen T05C24-3 toteutunut kuormitusohjelma



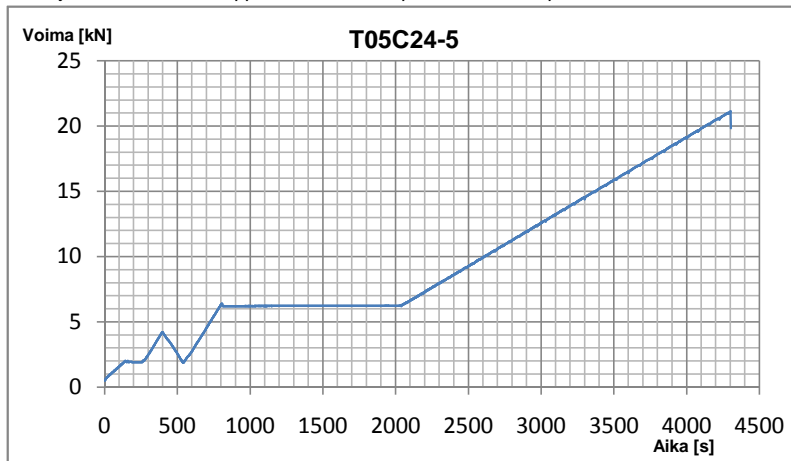
Kuvaaja 2.12.4 Koekappaleen T05C24-4 toteutunut kuormitusohjelma



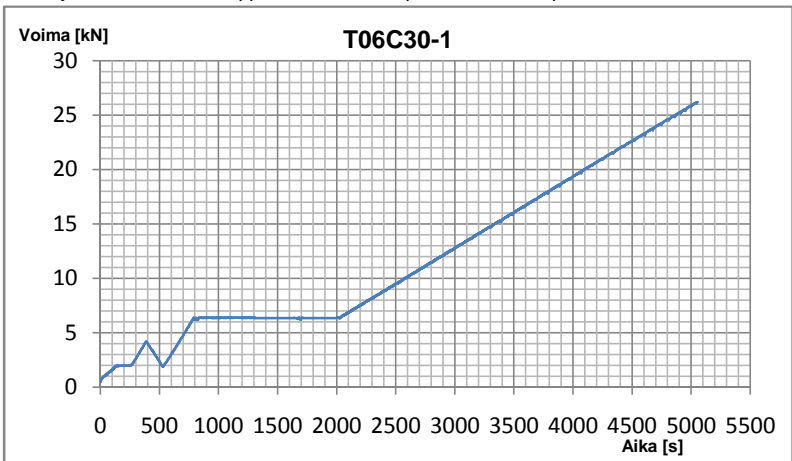
Kuvaaja 2.13.1 Koekappaleen T05C24-5 puristusvoima taipuman funktiona.



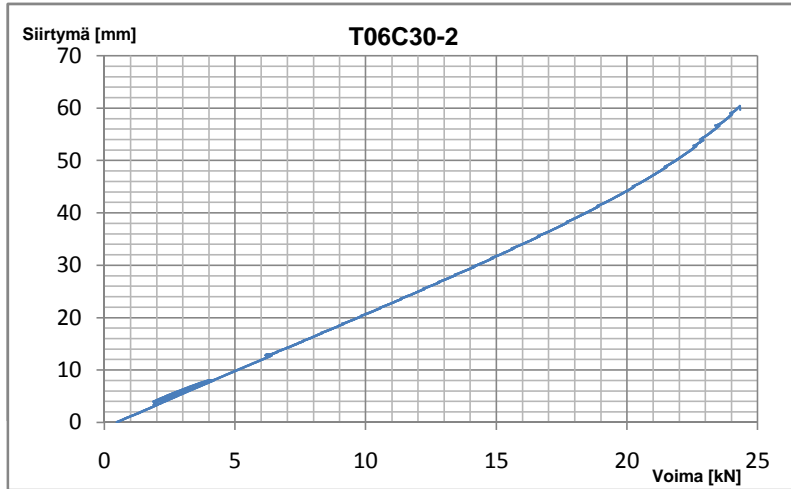
Kuvaaja 2.13.3 Koekappaleen T06C30-1 puristusvoima taipuman funktiona.



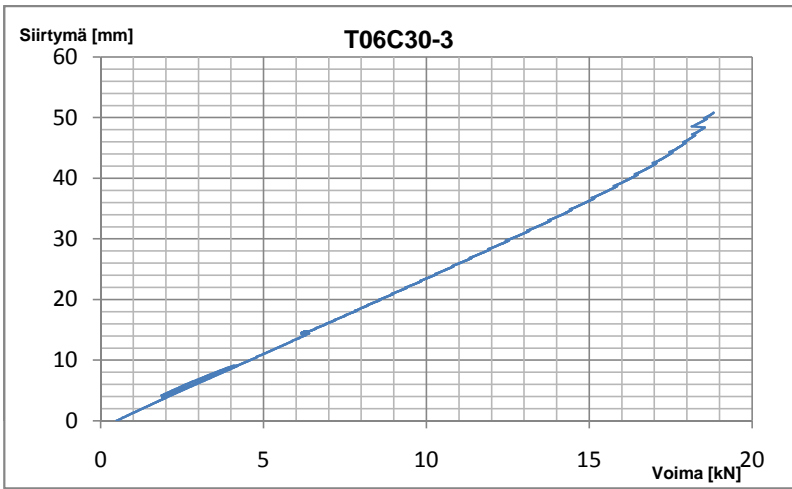
Kuvaaja 2.13.2 Koekappaleen T05C24-5 toteutunut kuormitusohjelma



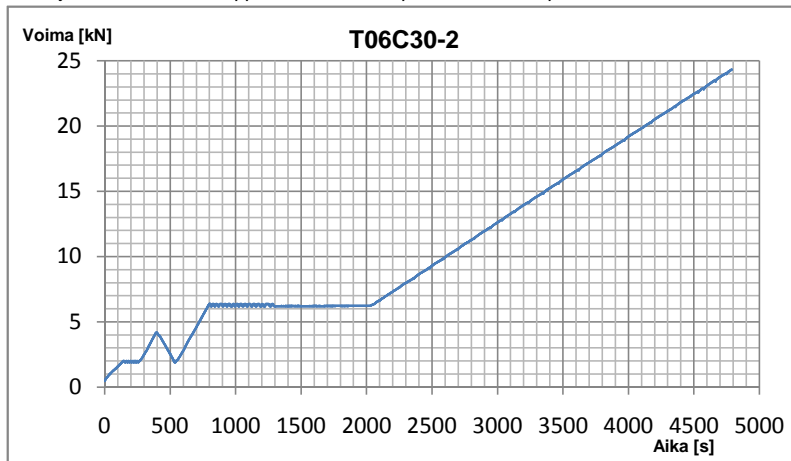
Kuvaaja 2.13.4 Koekappaleen T06C30-1 toteutunut kuormitusohjelma



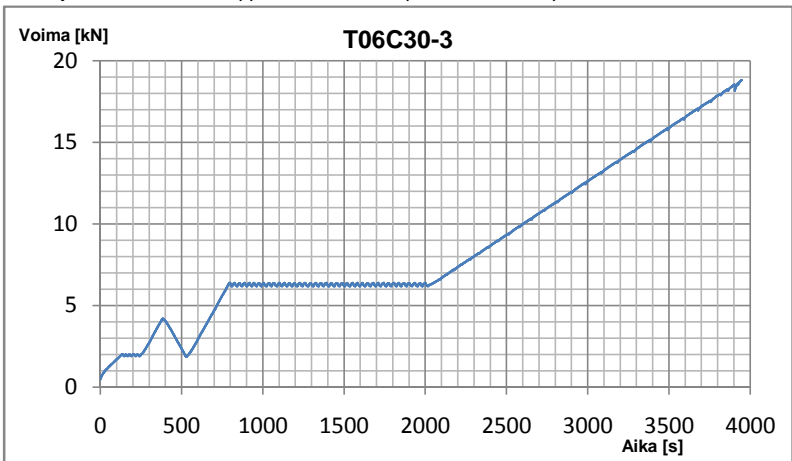
Kuvaaja 2.14.1 Koekappaleen T06C30-2 puristusvoima taipuman funktiona.



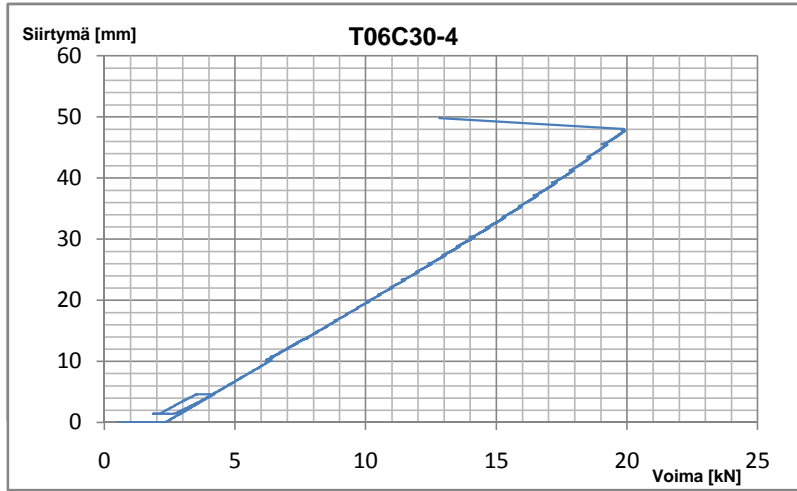
Kuvaaja 2.14.3 Koekappaleen T06C30-3 puristusvoima taipuman funktiona.



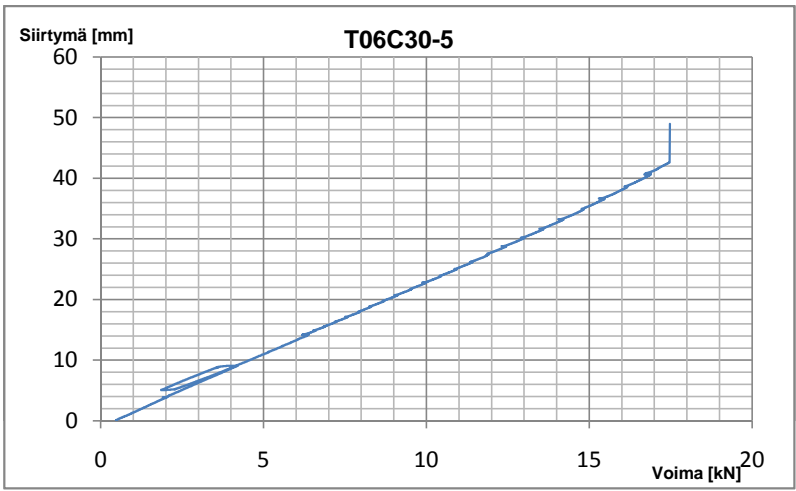
Kuvaaja 2.14.2 Koekappaleen T06C30-2 toteutunut kuormitusohjelma



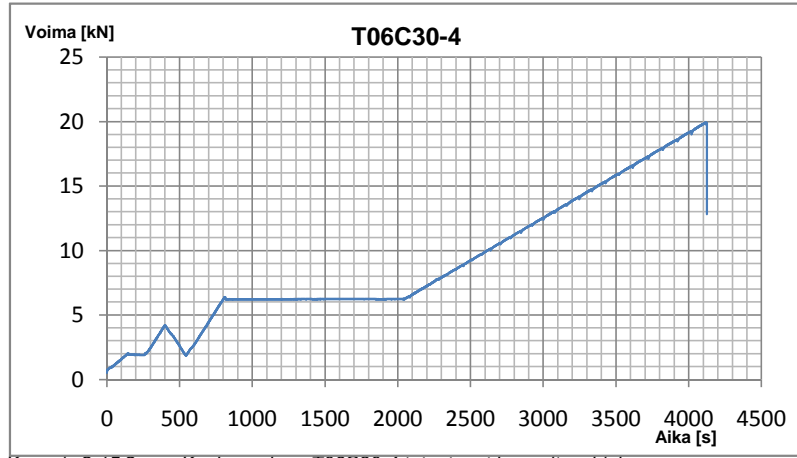
Kuvaaja 2.14.4 Koekappaleen T06C30-3 toteutunut kuormitusohjelma



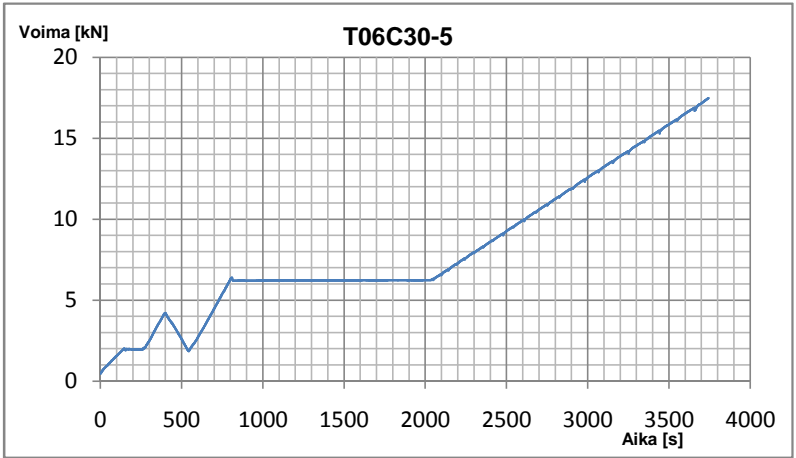
Kuvaaja 2.15.1 Koekappaleen T06C30-4 puristusvoima taipuman funktiona.



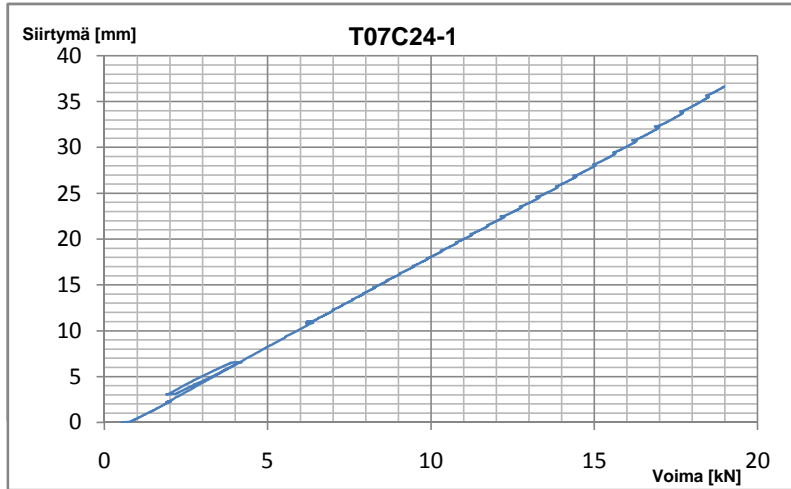
Kuvaaja 2.15.3 Koekappaleen T06C30-5 puristusvoima taipuman funktiona.



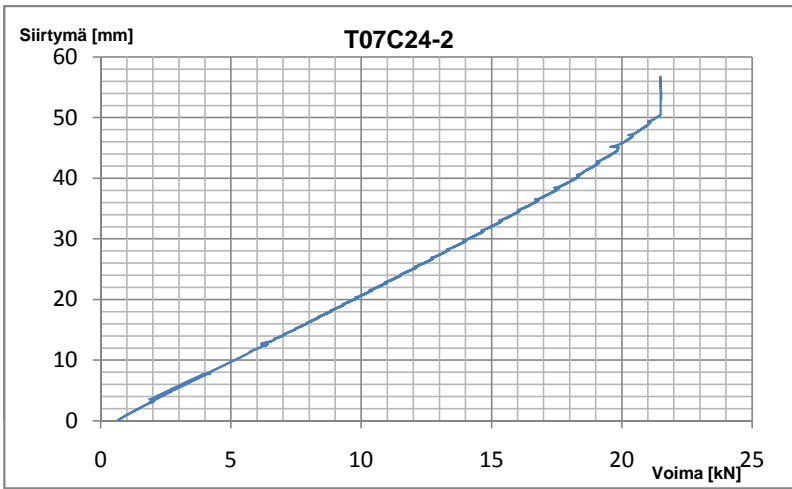
Kuvaaja 2.15.2 Koekappaleen T06C30-4 toteutunut kuormitusohjelma



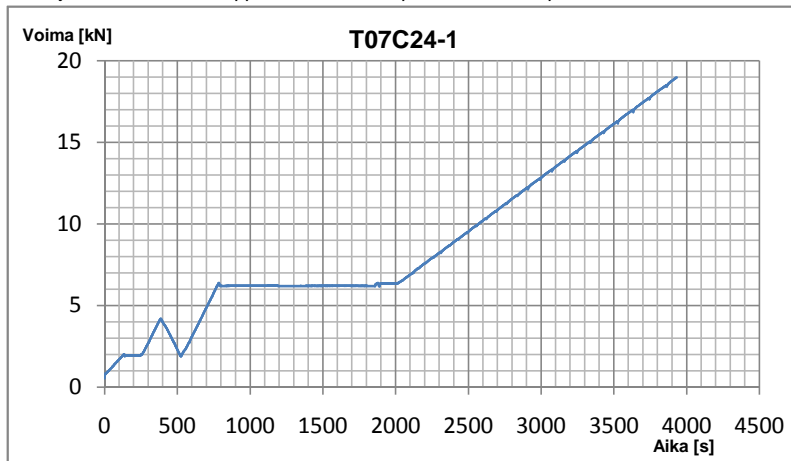
Kuvaaja 2.15.4 Koekappaleen T06C30-5 toteutunut kuormitusohjelma



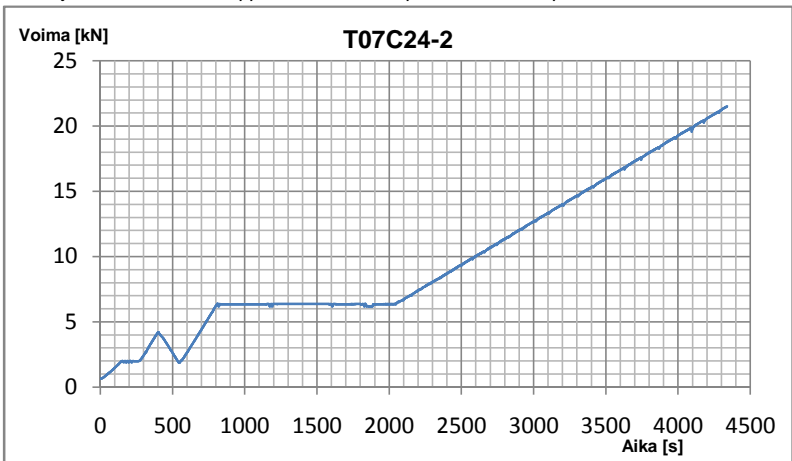
Kuvaaja 2.16.1 Koekappaleen T07C24-1 puristusvoima taipuman funktiona.



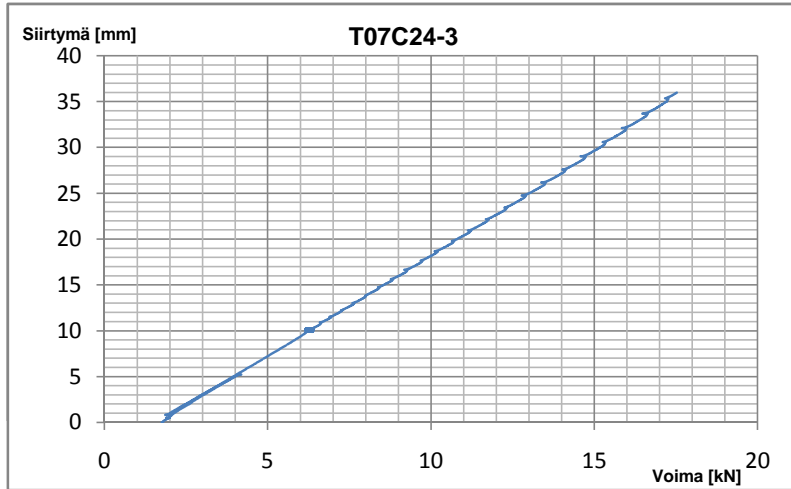
Kuvaaja 2.16.3 Koekappaleen T07C24-2 puristusvoima taipuman funktiona.



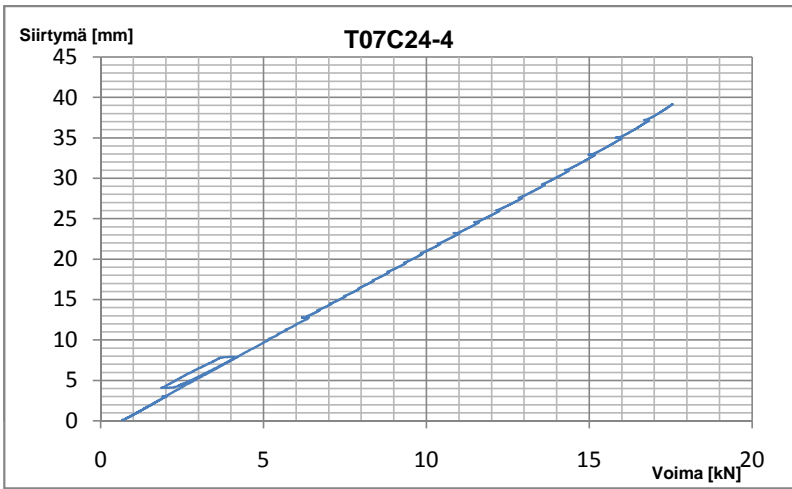
Kuvaaja 2.16.2 Koekappaleen T07C24-1 toteutunut kuormitusohjelma



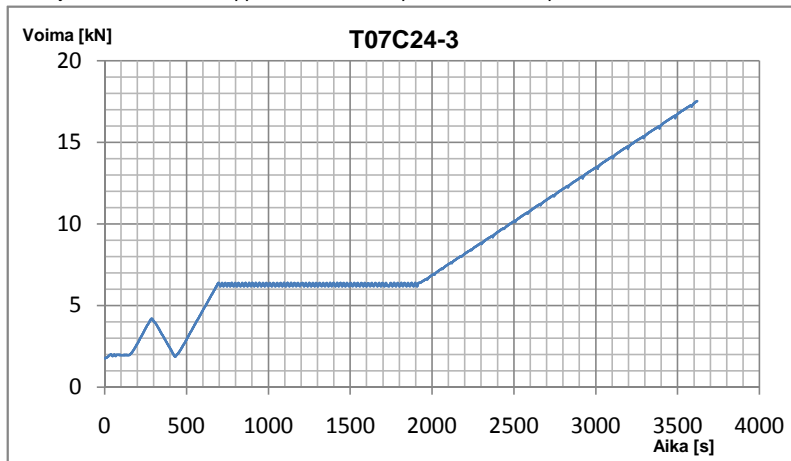
Kuvaaja 2.16.4 Koekappaleen T07C24-2 toteutunut kuormitusohjelma



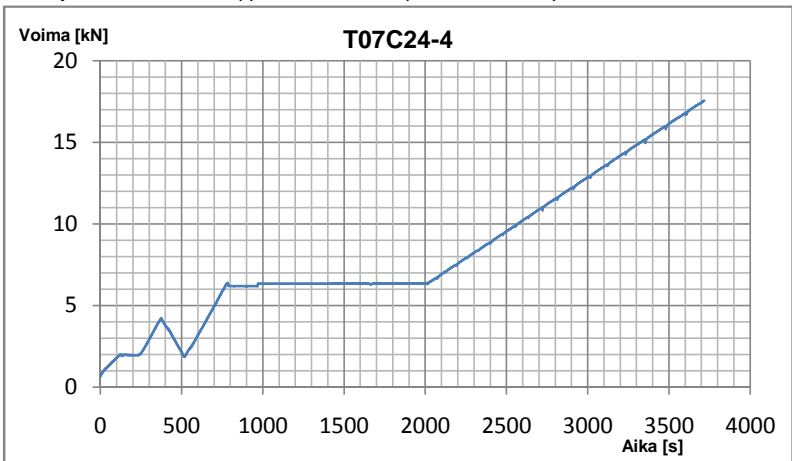
Kuvaaja 2.17.1 Koekappaleen T07C24-3 puristusvoima taipuman funktiona.



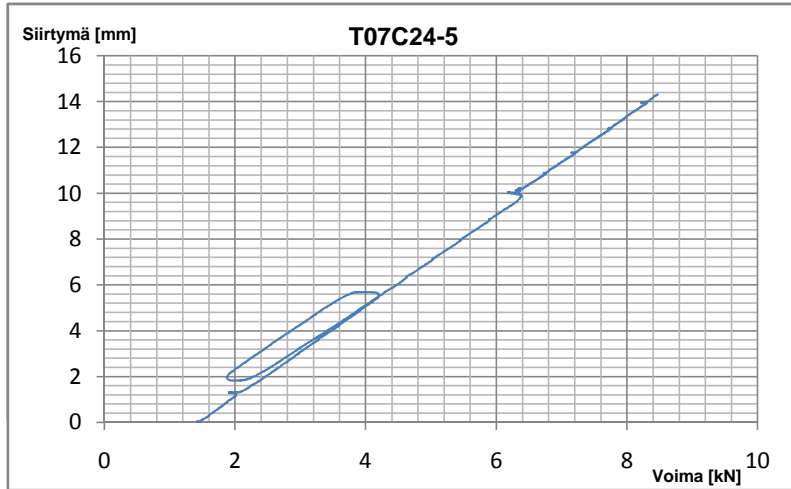
Kuvaaja 2.17.3 Koekappaleen T07C24-4 puristusvoima taipuman funktiona.



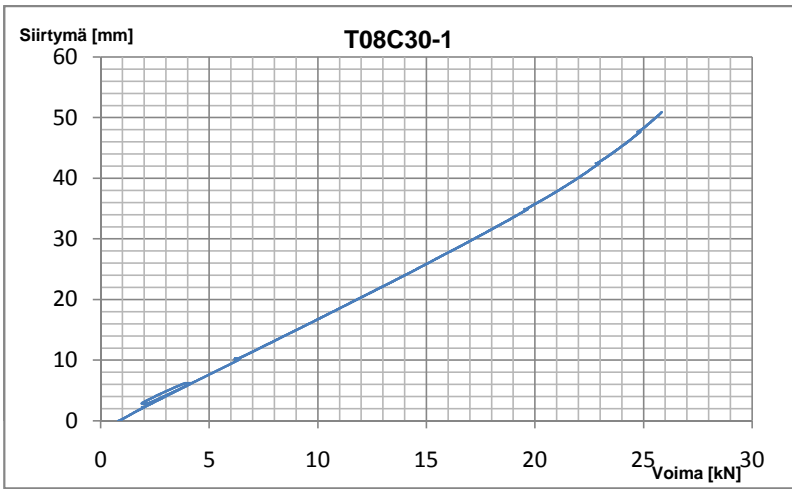
Kuvaaja 2.17.2 Koekappaleen T07C24-3 toteutunut kuormitusohjelma



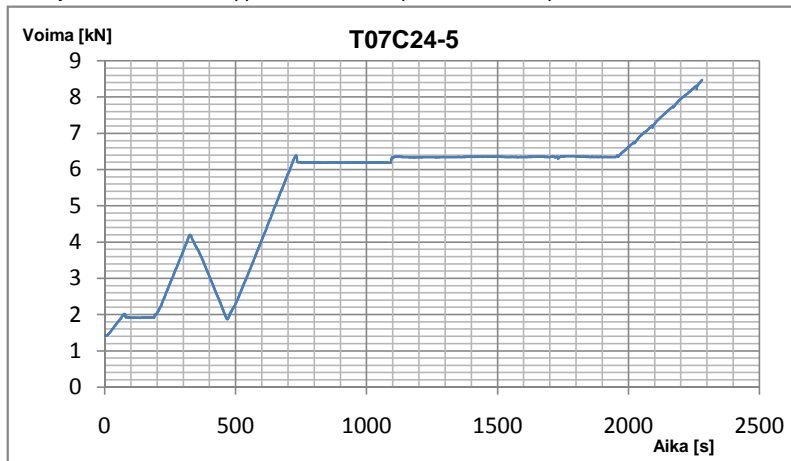
Kuvaaja 2.17.4 Koekappaleen T07C24-4 toteutunut kuormitusohjelma



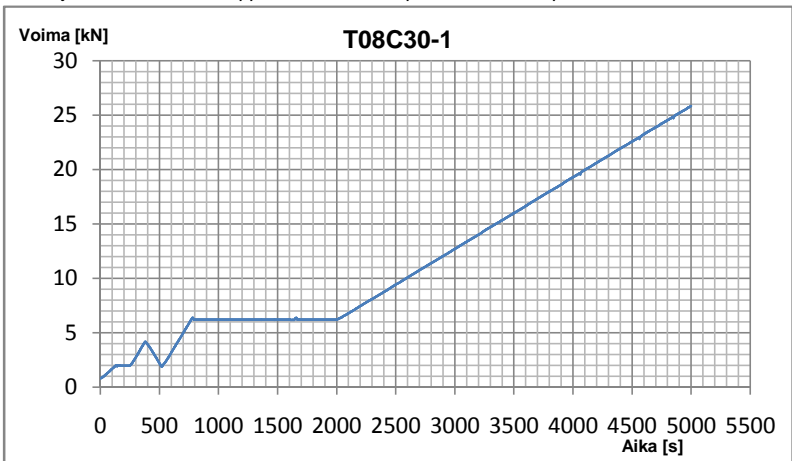
Kuvaaja 2.18.1 Koekappaleen T07C24-5 puristusvoima taipuman funktiona.



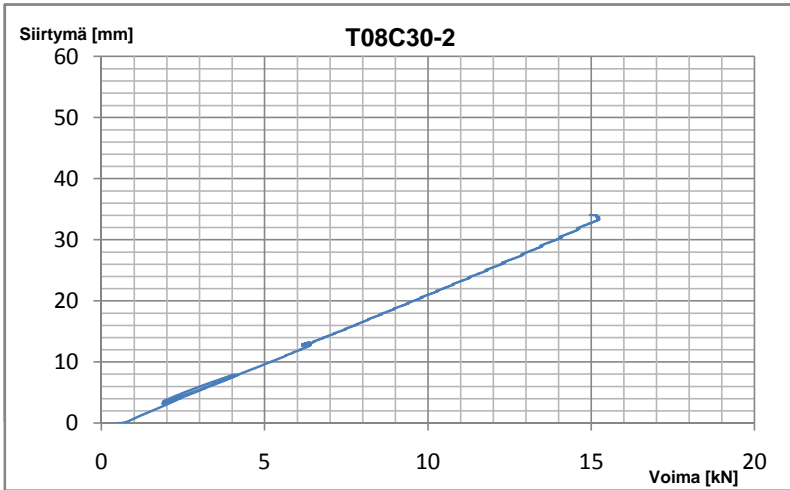
Kuvaaja 2.18.3 Koekappaleen T08C30-1 puristusvoima taipuman funktiona.



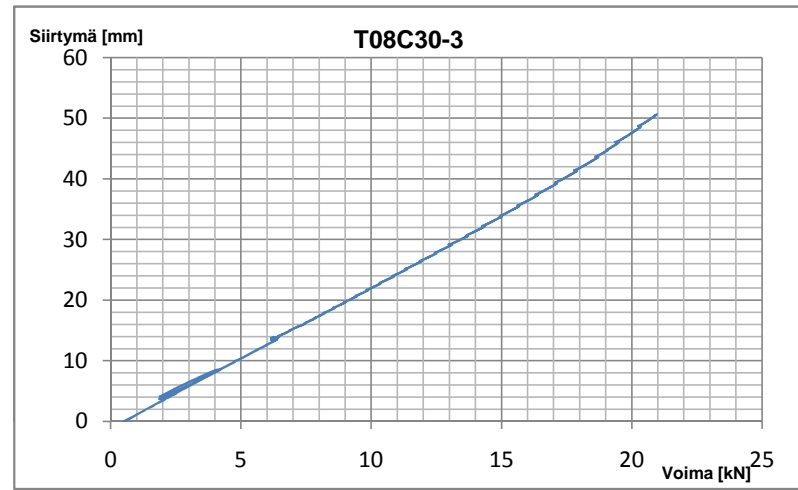
Kuvaaja 2.18.2 Koekappaleen T07C24-5 toteutunut kuormitusohjelma



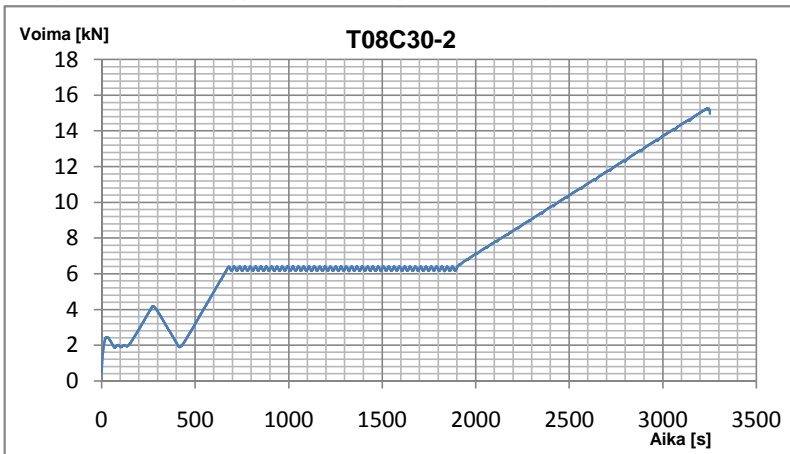
Kuvaaja 2.18.4 Koekappaleen T08C30-1 toteutunut kuormitusohjelma



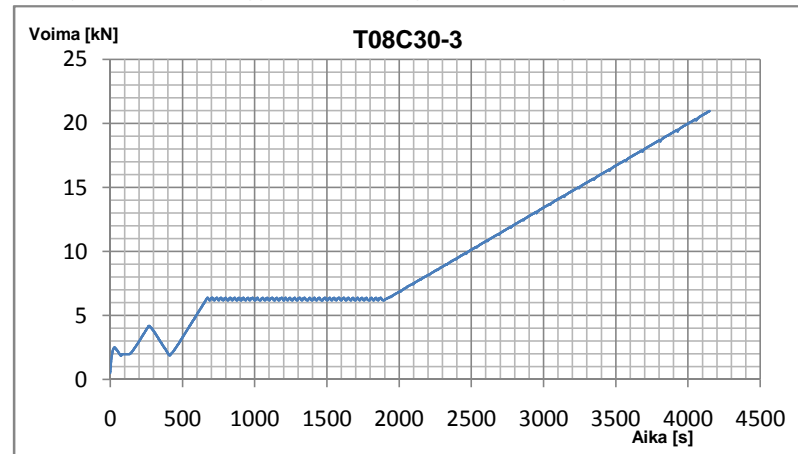
Kuvaaja 2.19.1 Koekappaleen T08C30-2 puristusvoima taipuman funktiona.



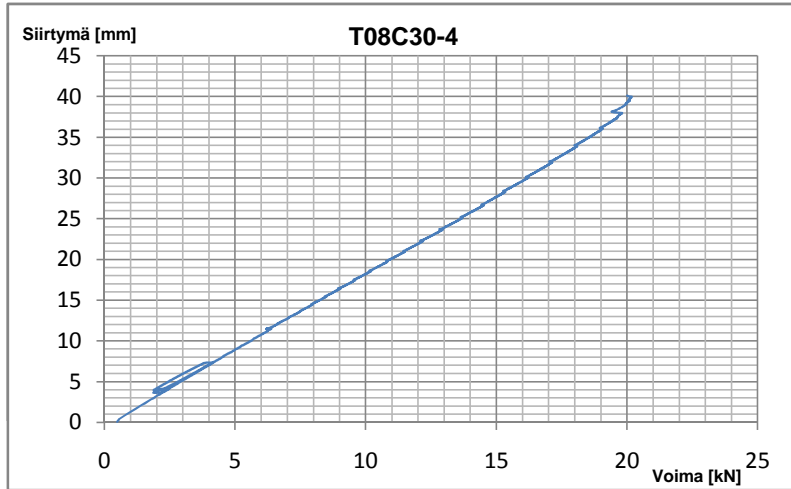
Kuvaaja 2.19.3 Koekappaleen T08C30-3 puristusvoima taipuman funktiona.



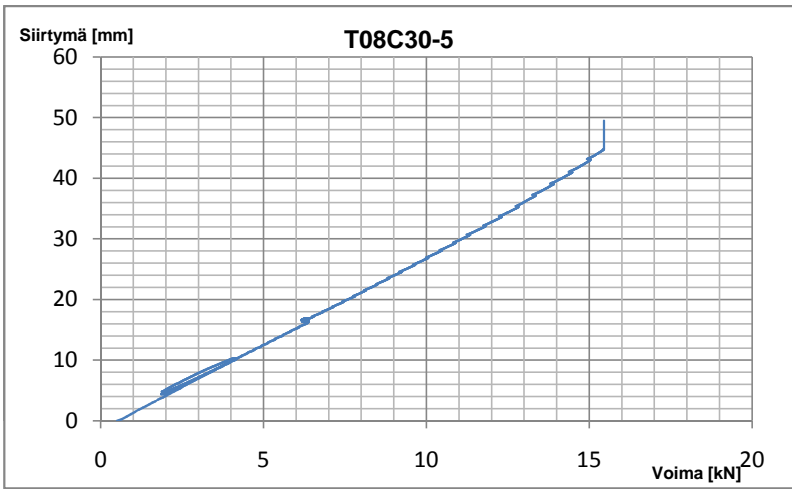
Kuvaaja 2.19.2 Koekappaleen T08C30-2 toteutunut kuormitusohjelma



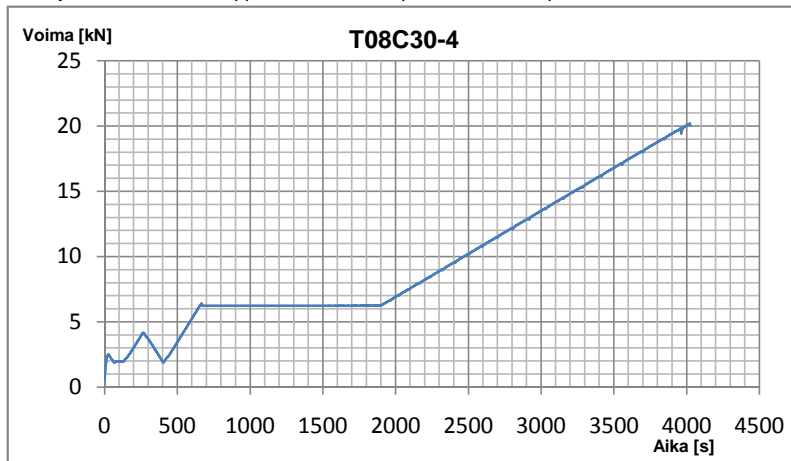
Kuvaaja 2.19.4 Koekappaleen T08C30-3 toteutunut kuormitusohjelma



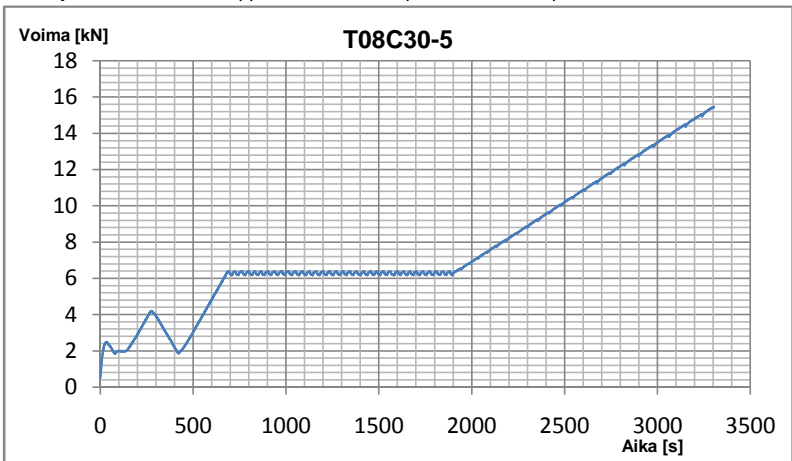
Kuvaaja 2.20.1 Koekappaleen T08C30-4 puristusvoima taipuman funktiona.



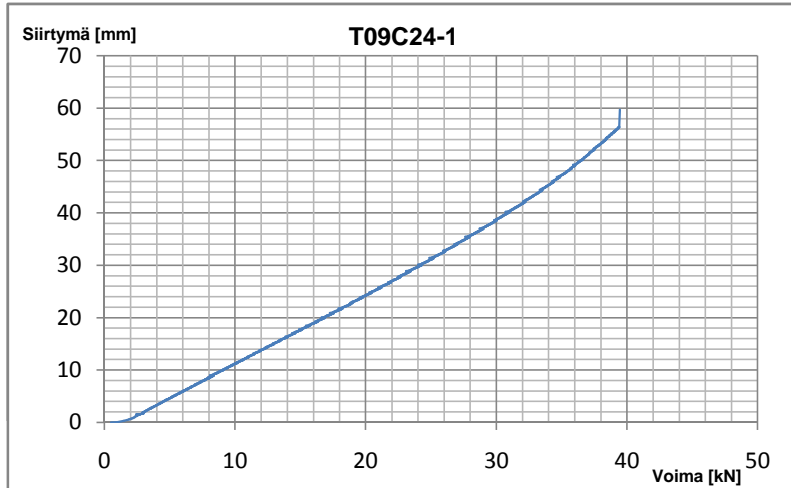
Kuvaaja 2.20.3 Koekappaleen T08C30-5 puristusvoima taipuman funktiona.



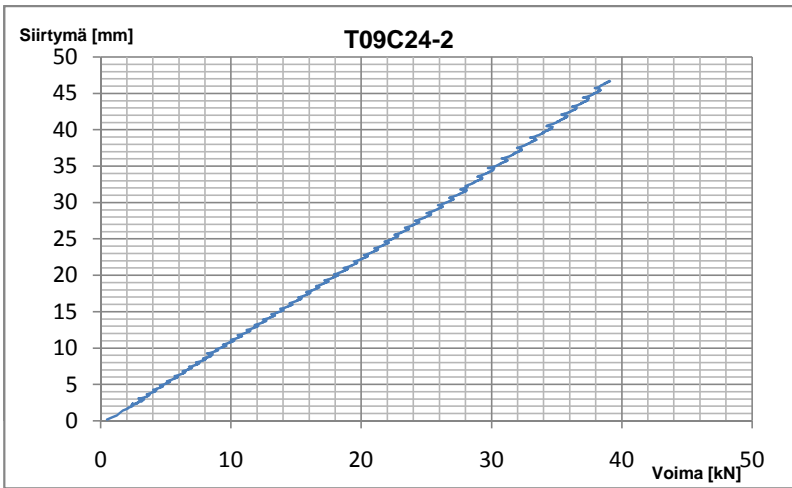
Kuvaaja 2.20.2 Koekappaleen T08C30-4 toteutunut kuormitusohjelma



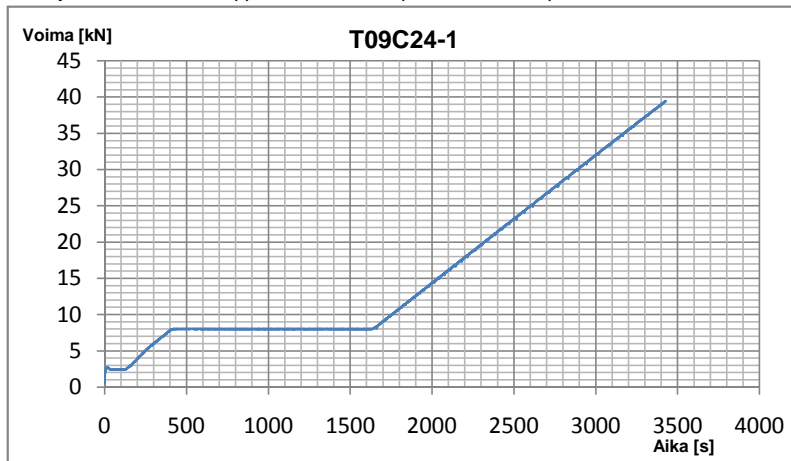
Kuvaaja 2.20.4 Koekappaleen T08C30-5 toteutunut kuormitusohjelma



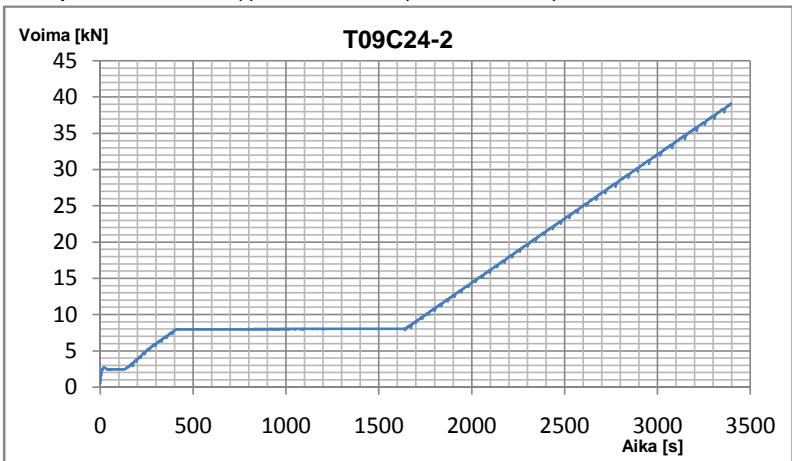
Kuvaaja 2.21.1 Koekappaleen T09C24-1 puristusvoima taipuman funktiona.



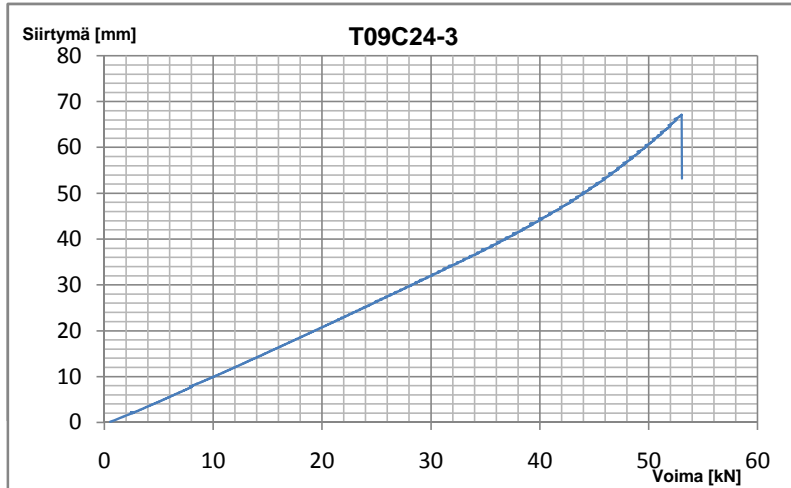
Kuvaaja 2.21.3 Koekappaleen T09C24-2 puristusvoima taipuman funktiona.



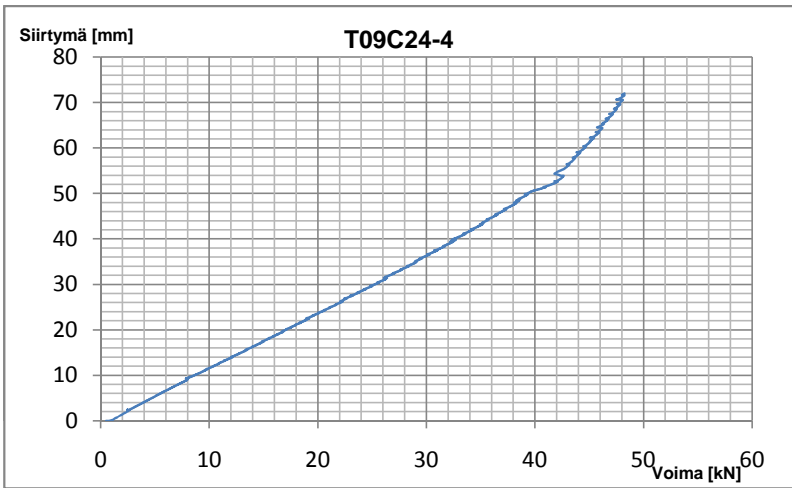
Kuvaaja 2.21.2 Koekappaleen T09C24-1 toteutunut kuormitusohjelma



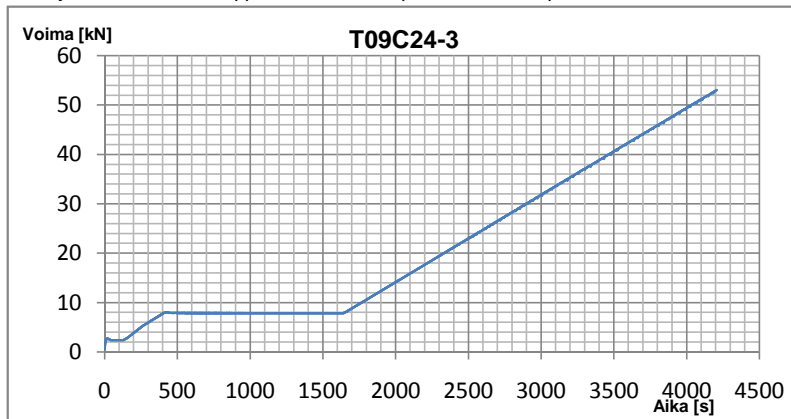
Kuvaaja 2.21.4 Koekappaleen T09C24-2 toteutunut kuormitusohjelma



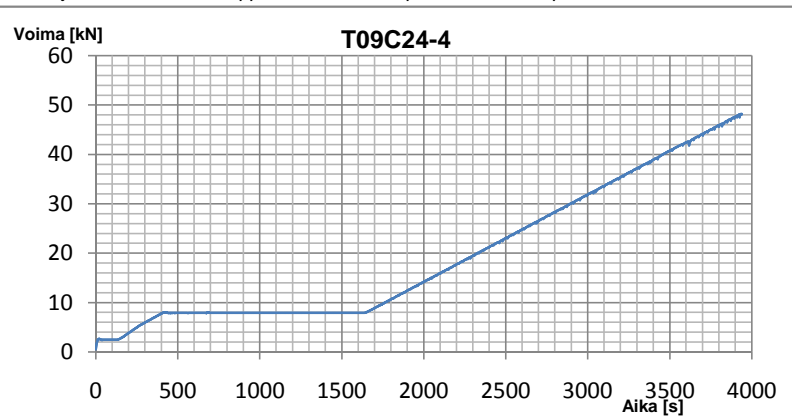
Kuvaaja 2.22.1 Koekappaleen T09C24-3 puristusvoima taipuman funktiona.



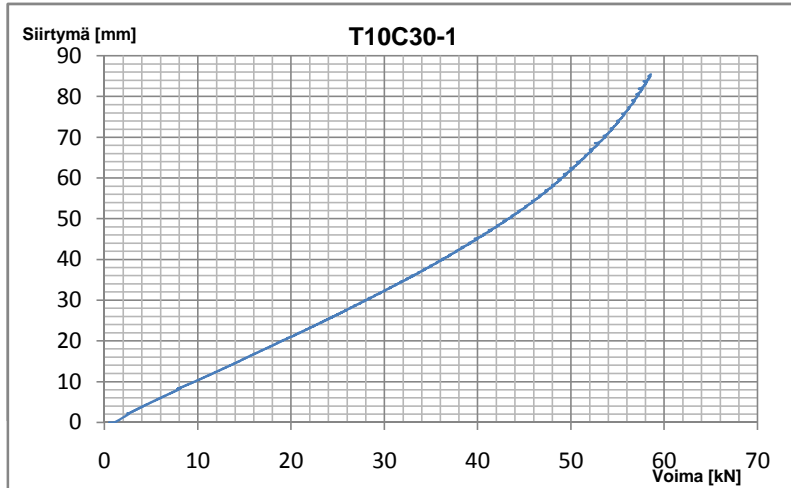
Kuvaaja 2.22.3 Koekappaleen T09C24-4 puristusvoima taipuman funktiona.



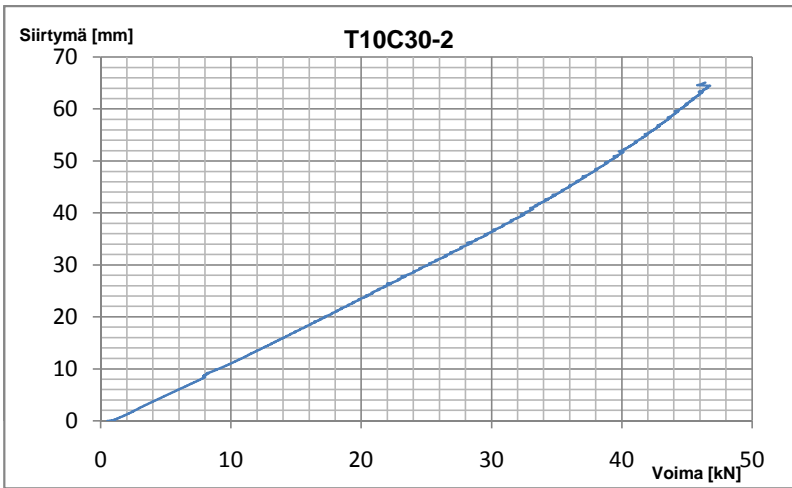
Kuvaaja 2.22.2 Koekappaleen T09C24-3 toteutunut kuormitusohjelma



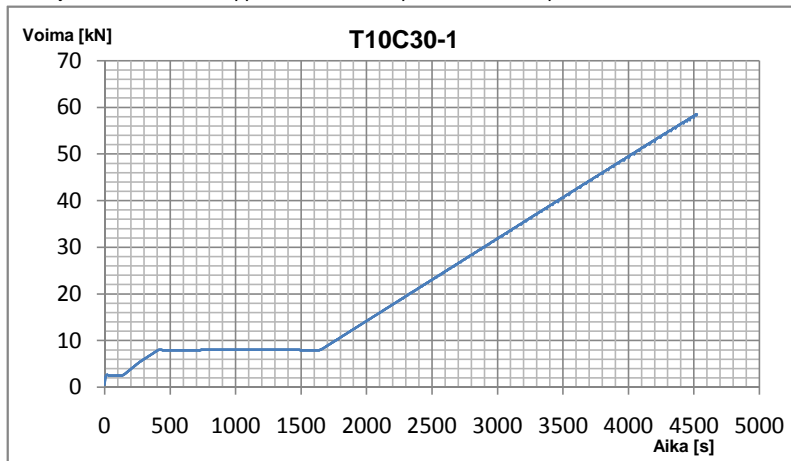
Kuvaaja 2.22.4 Koekappaleen T09C24-4 toteutunut kuormitusohjelma



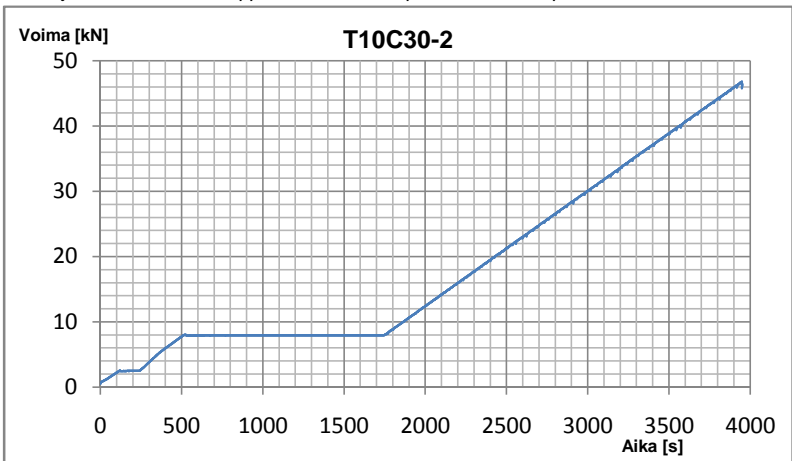
Kuvaaja 2.23.1 Koekappaleen T10C30-1 puristusvoima taipuman funktiona.



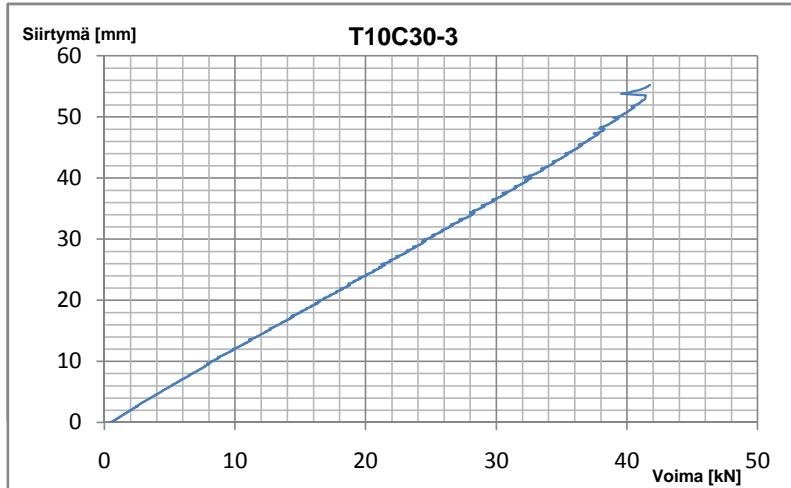
Kuvaaja 2.23.3 Koekappaleen T10C30-2 puristusvoima taipuman funktiona.



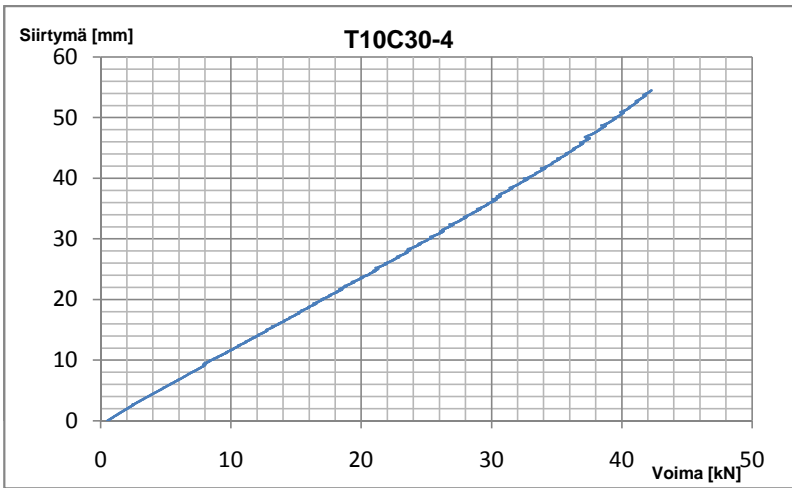
Kuvaaja 2.23.2 Koekappaleen T10C30-1 toteutunut kuormitusohjelma



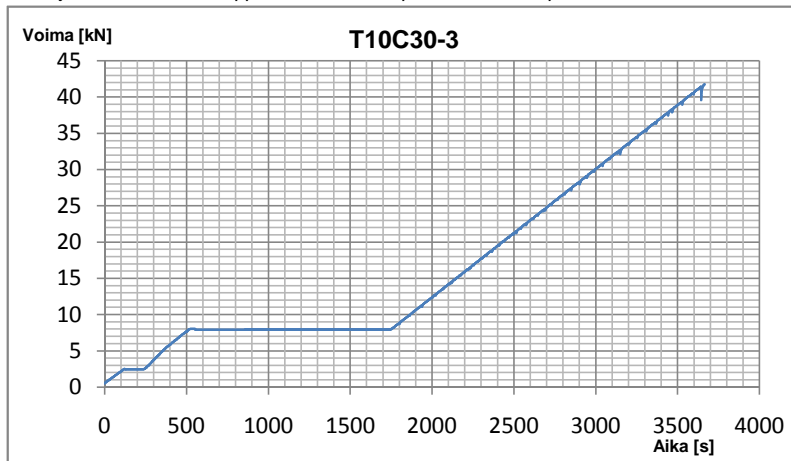
Kuvaaja 2.23.4 Koekappaleen T10C30-2 toteutunut kuormitusohjelma



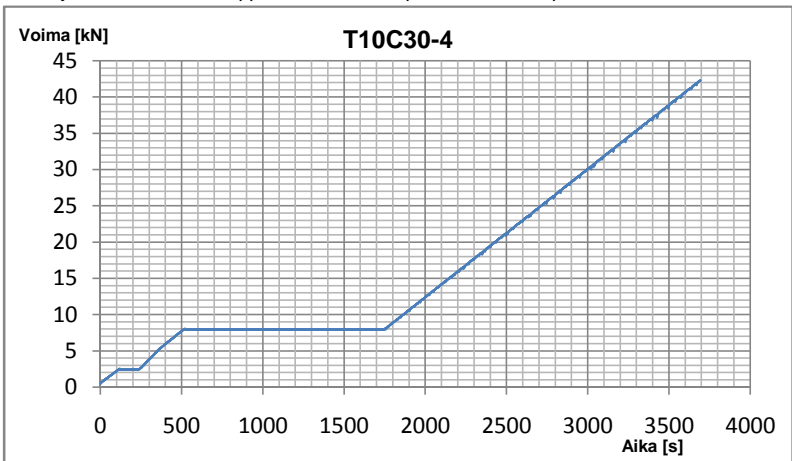
Kuvaaja 2.24.1 Koekappaleen T10C30-3 puristusvoima taipuman funktiona.



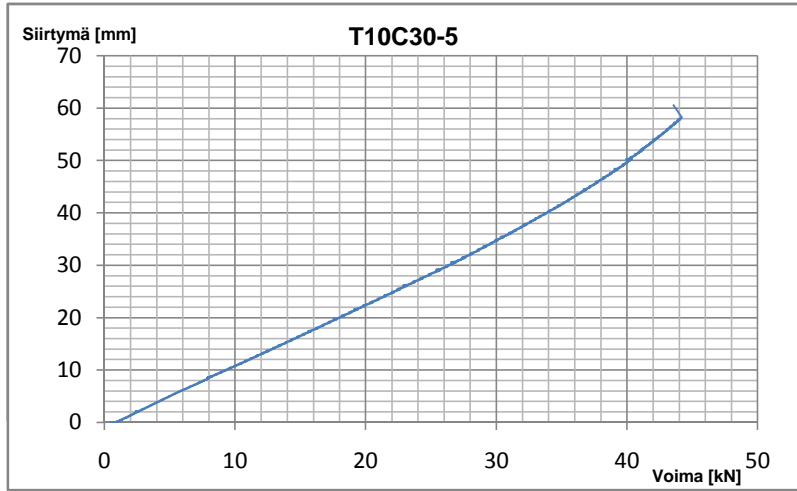
Kuvaaja 2.24.3 Koekappaleen T10C30-4 puristusvoima taipuman funktiona.



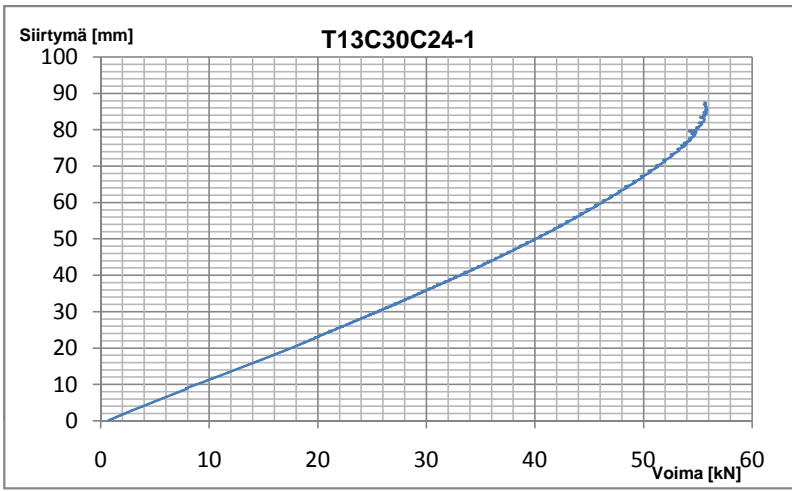
Kuvaaja 2.24.2 Koekappaleen T10C30-3 toteutunut kuormitusohjelma



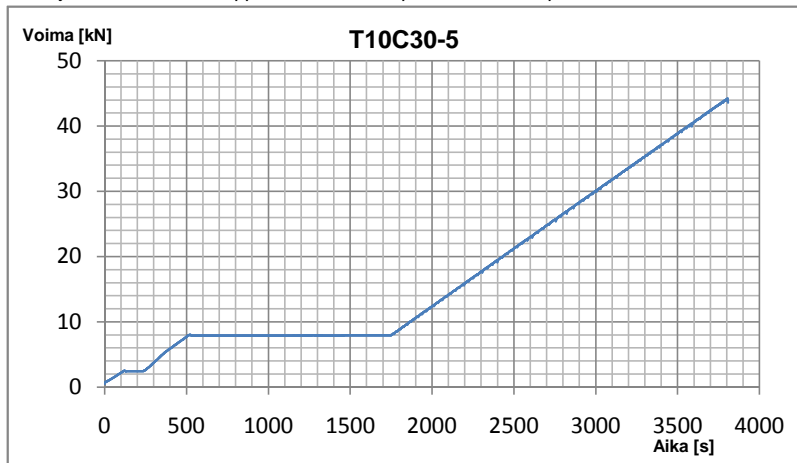
Kuvaaja 2.24.4 Koekappaleen T10C30-4 toteutunut kuormitusohjelma



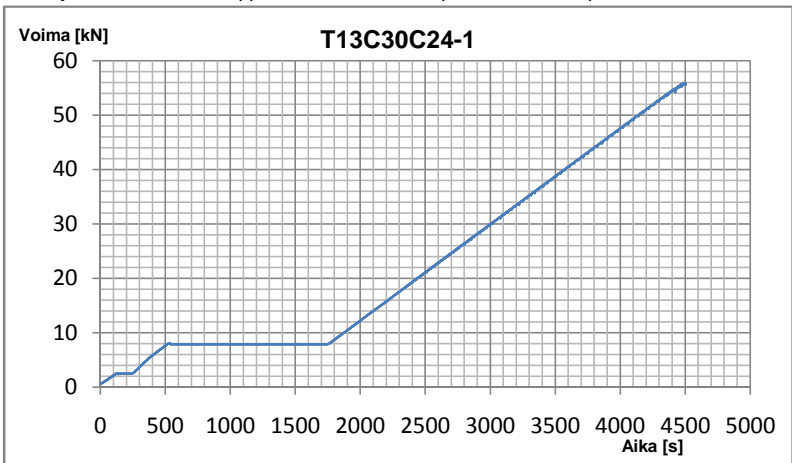
Kuvaaja 2.25.1 Koekappaleen T10C30-5 puristusvoima taipuman funktiona.



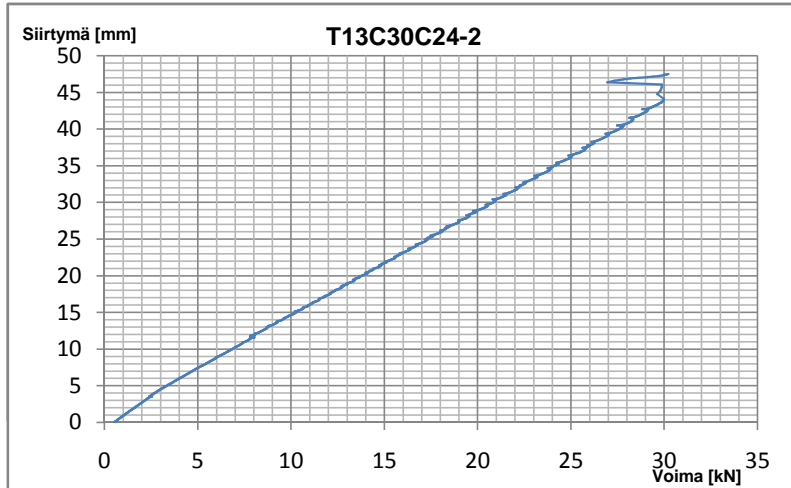
Kuvaaja 2.25.3 Koekappaleen T13C30C24-1 puristusvoima taipuman funktiona.



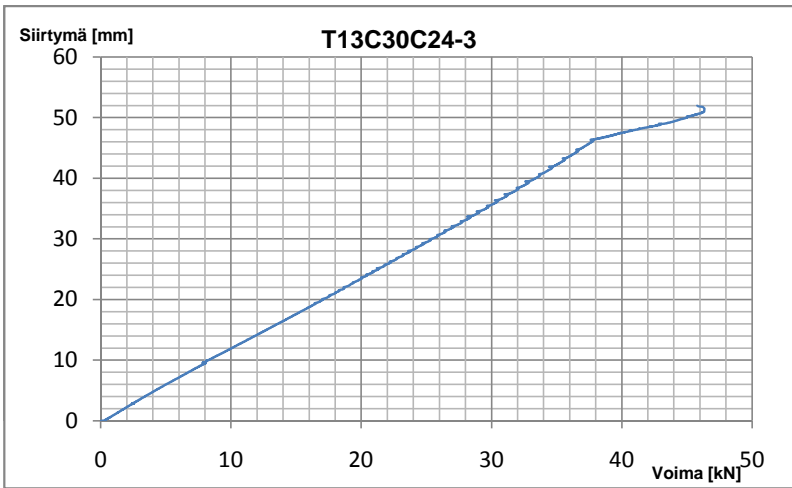
Kuvaaja 2.25.2 Koekappaleen T10C30-5 toteutunut kuormitusohjelma



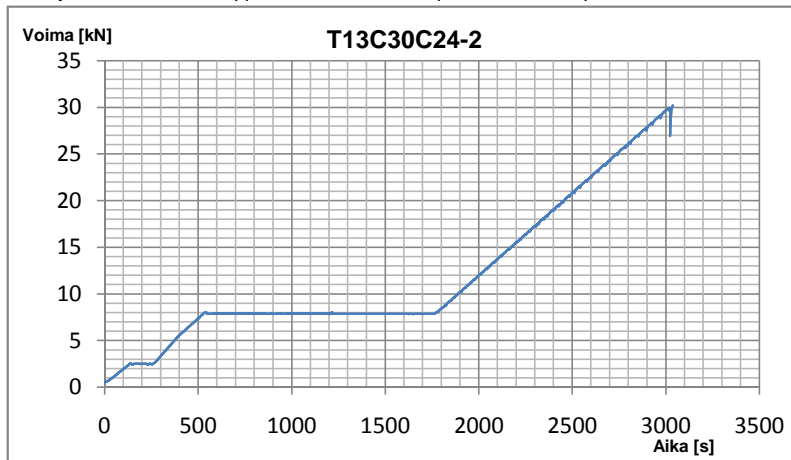
Kuvaaja 2.25.4 Koekappaleen T13C30C24-1 toteutunut kuormitusohjelma



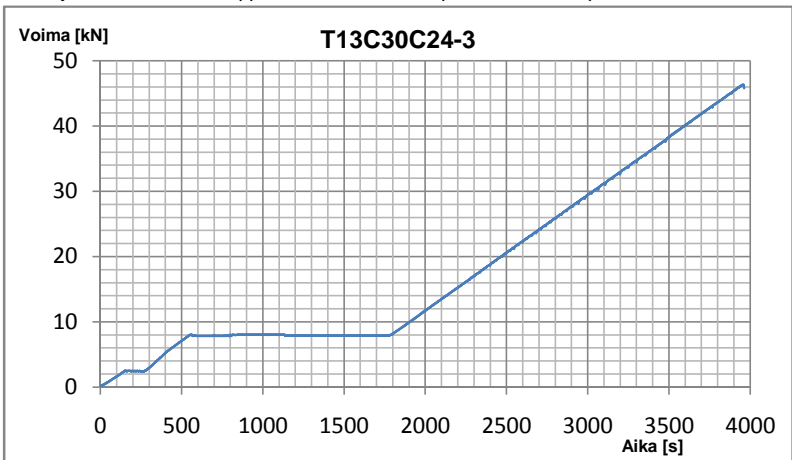
Kuvaaja 2.26.1 Koekappaleen T13C30C24-2 puristusvoima taipuman funktiona.



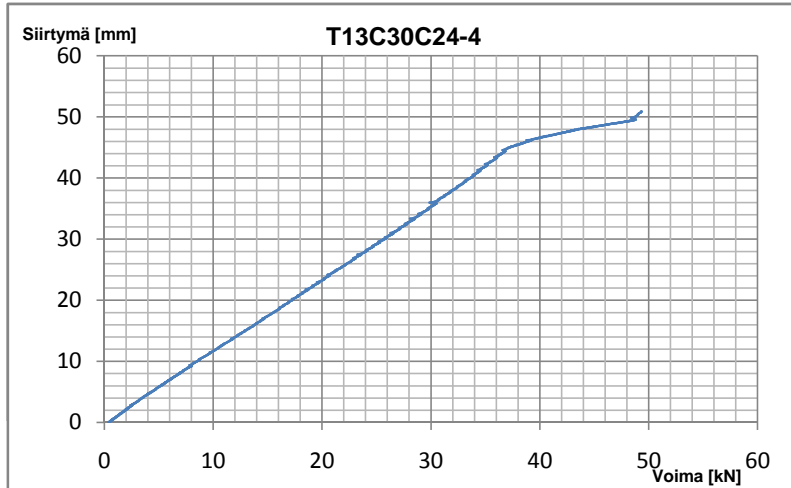
Kuvaaja 2.26.3 Koekappaleen T13C30C24-3 puristusvoima taipuman funktiona.



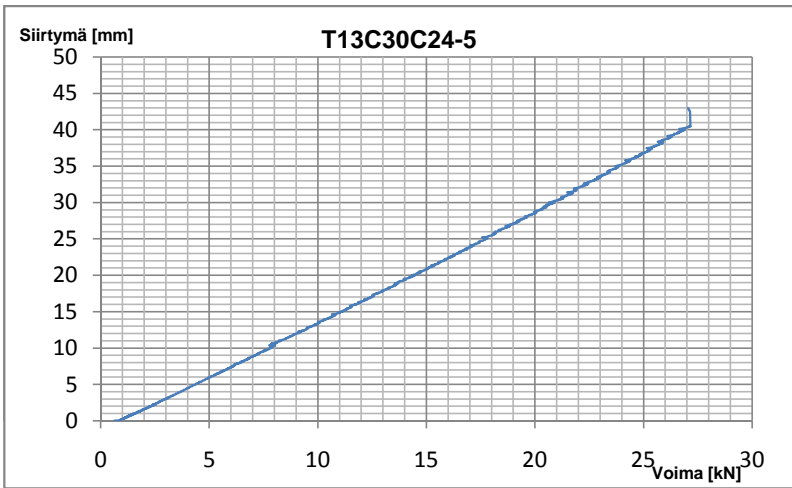
Kuvaaja 2.26.2 Koekappaleen T13C30C24-2 toteutunut kuormitusohjelma



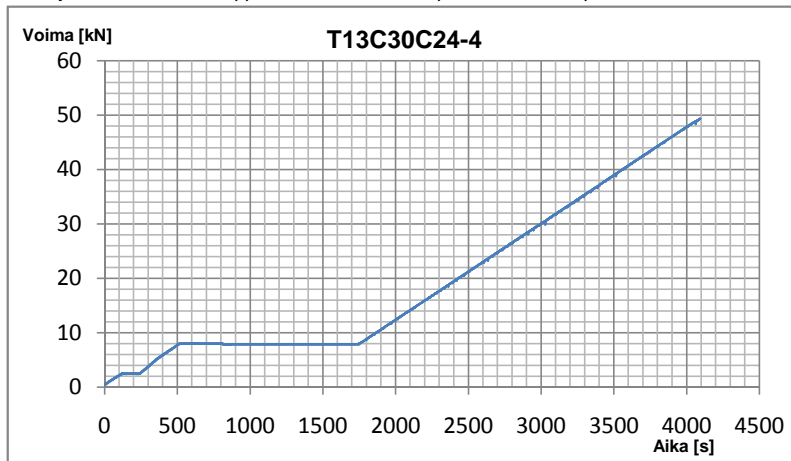
Kuvaaja 2.26.4 Koekappaleen T13C30C24-3 toteutunut kuormitusohjelma



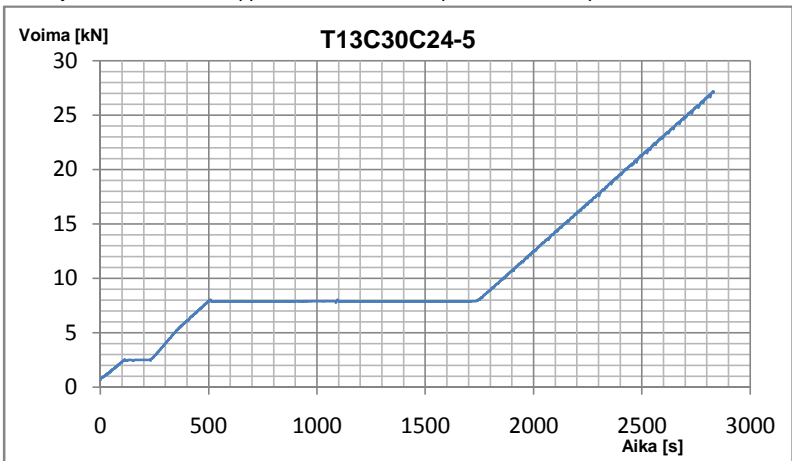
Kuvaaja 2.27.1 Koekappaleen T13C30C24-4 puristusvoima taipuman funktiona.



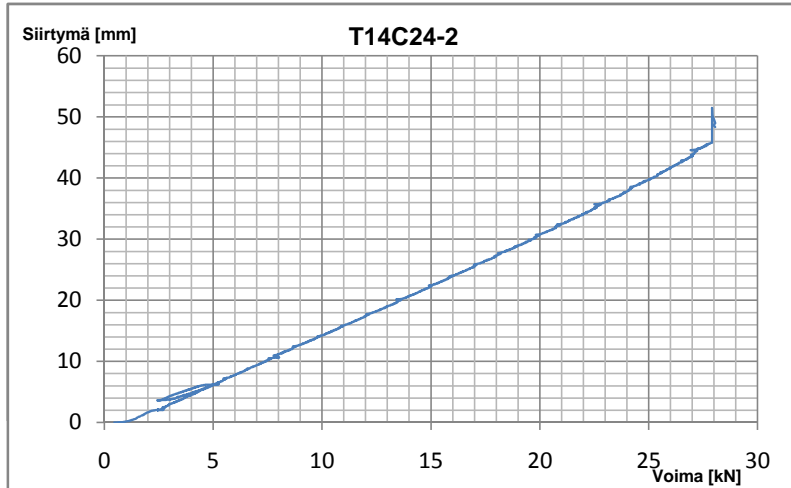
Kuvaaja 2.27.3 Koekappaleen T13C30C24-5 puristusvoima taipuman funktiona.



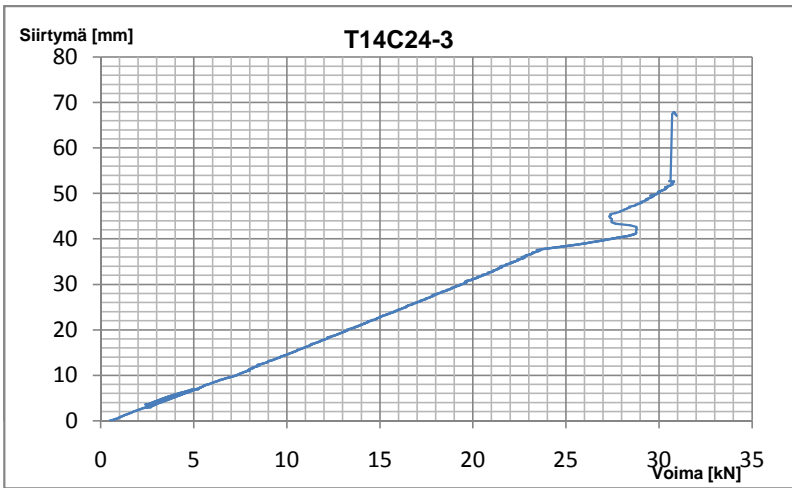
Kuvaaja 2.27.2 Koekappaleen T13C30C24-4 toteutunut kuormitusohjelma



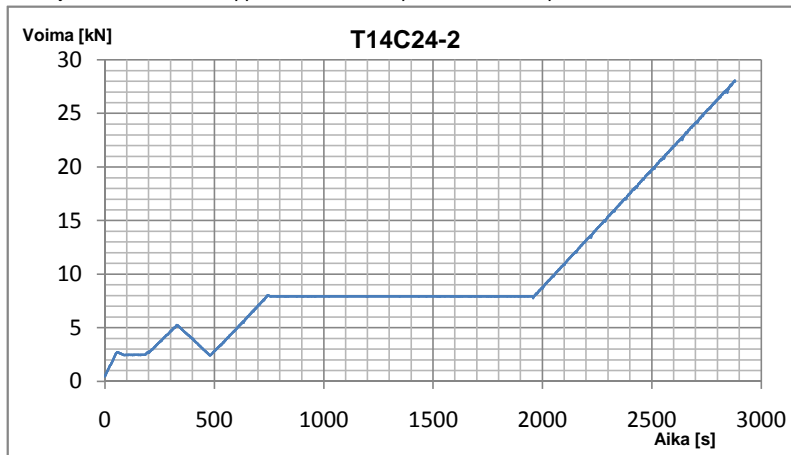
Kuvaaja 2.27.4 Koekappaleen T13C30C24-5 toteutunut kuormitusohjelma



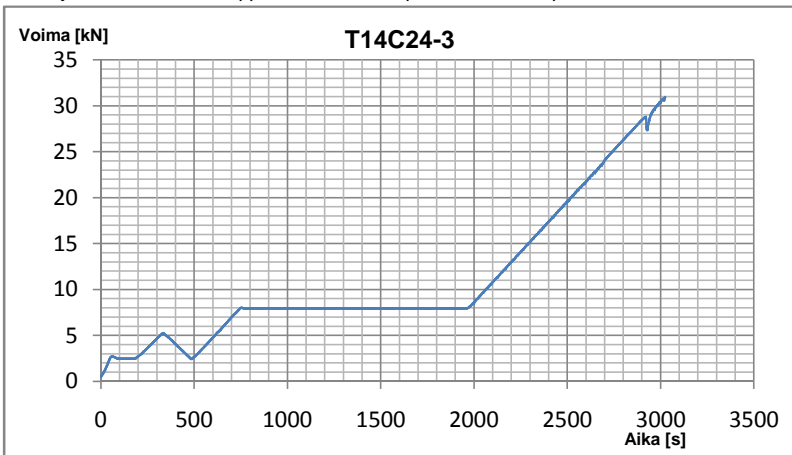
Kuvaaja 2.28.1 Koekappaleen T14C24-2 puristusvoima taipuman funktiona.



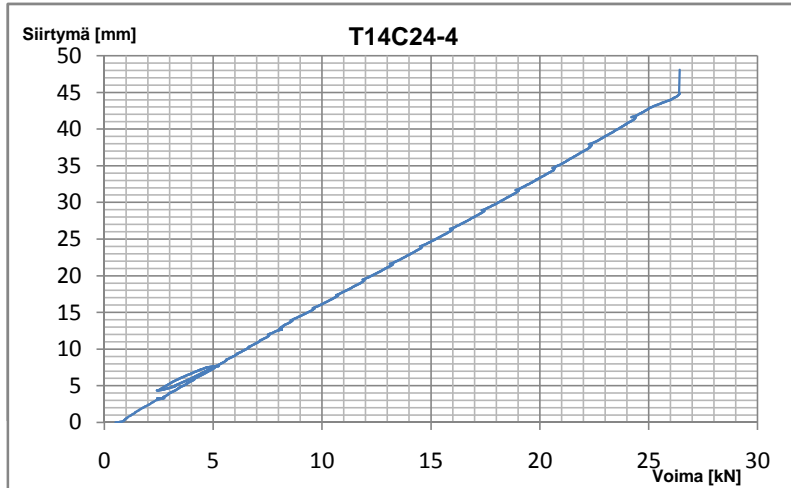
Kuvaaja 2.28.3 Koekappaleen T14C24-3 puristusvoima taipuman funktiona.



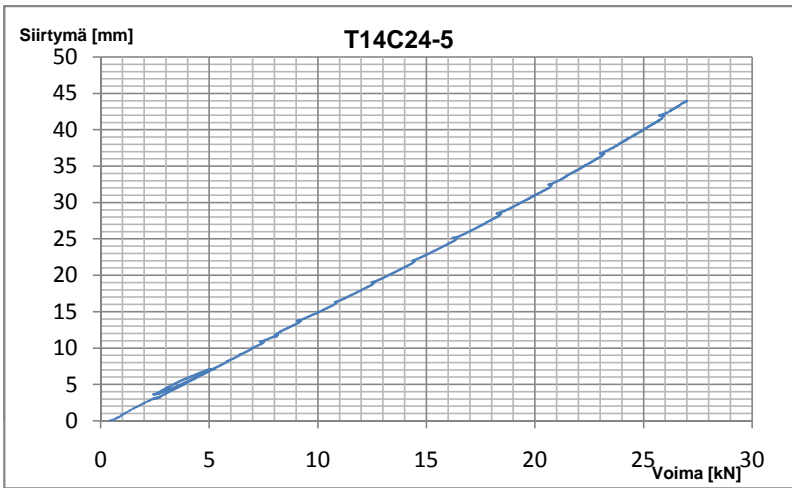
Kuvaaja 2.28.2 Koekappaleen T14C24-2 toteutunut kuormitusohjelma



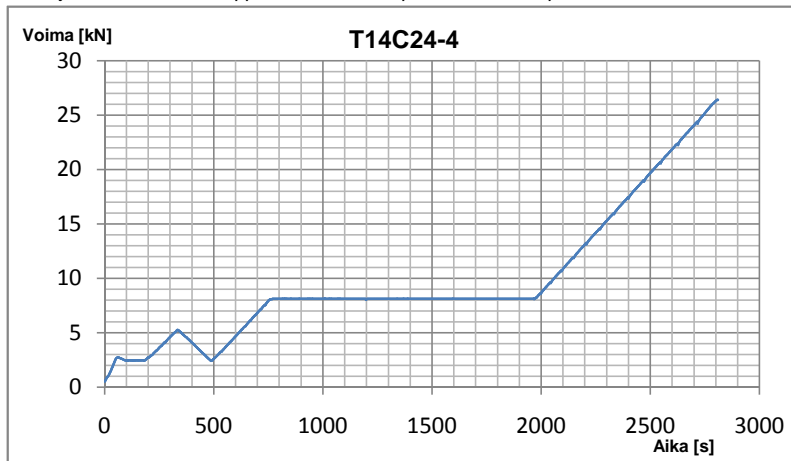
Kuvaaja 2.28.4 Koekappaleen T14C24-3 toteutunut kuormitusohjelma



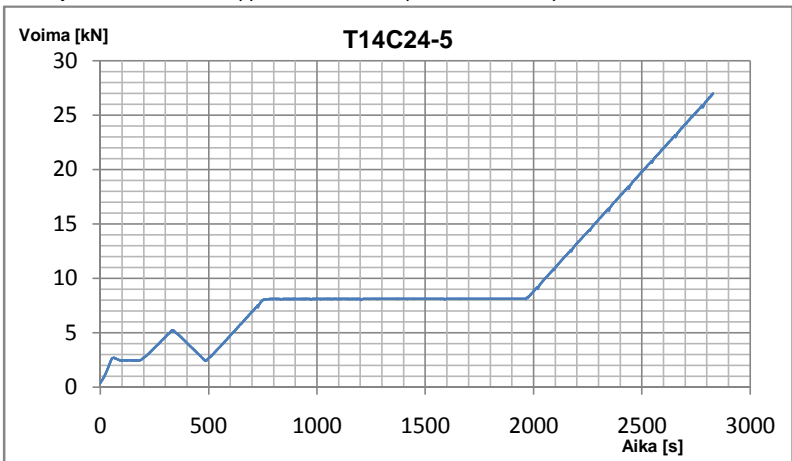
Kuvaaja 2.29.1 Koekappaleen T14C24-4 puristusvoima taipuman funktiona.



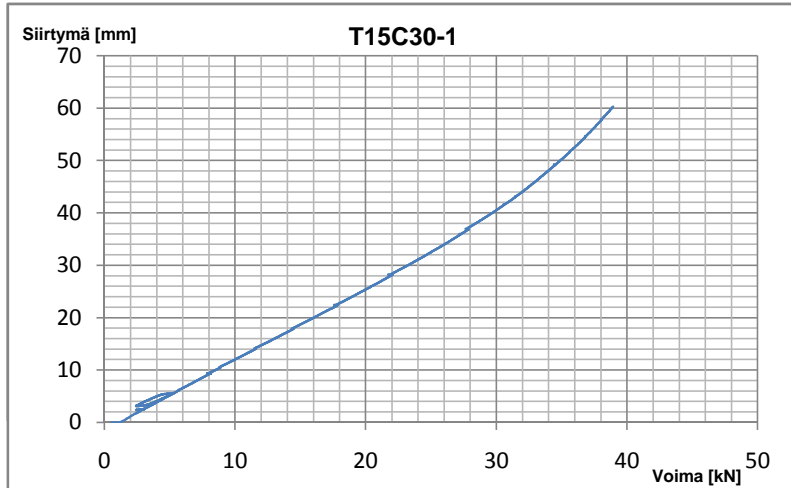
Kuvaaja 2.29.3 Koekappaleen T14C24-5 puristusvoima taipuman funktiona.



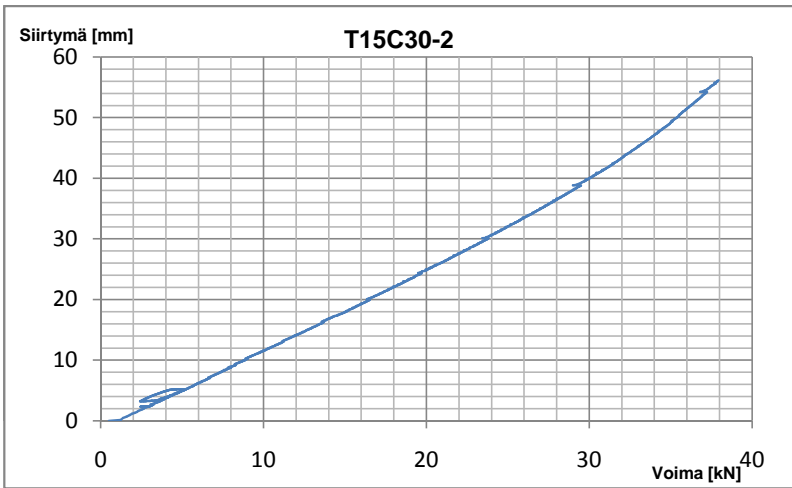
Kuvaaja 2.29.2 Koekappaleen T14C24-4 toteutunut kuormitusohjelma



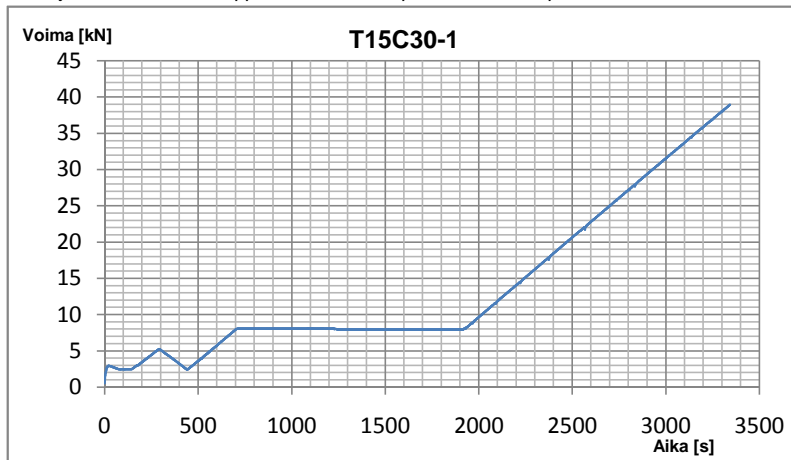
Kuvaaja 2.29.4 Koekappaleen T14C24-5 toteutunut kuormitusohjelma



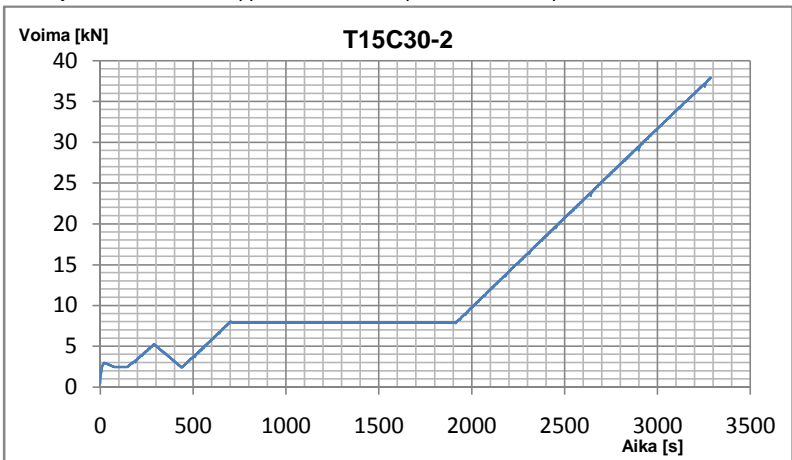
Kuvaaja 2.30.1 Koekappaleen T15C30-1 puristusvoima taipuman funktiona.



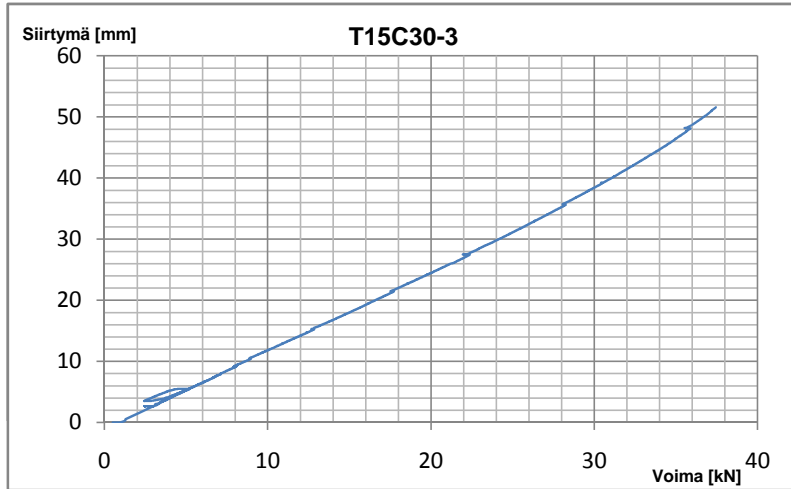
Kuvaaja 2.30.3 Koekappaleen T15C30-2 puristusvoima taipuman funktiona.



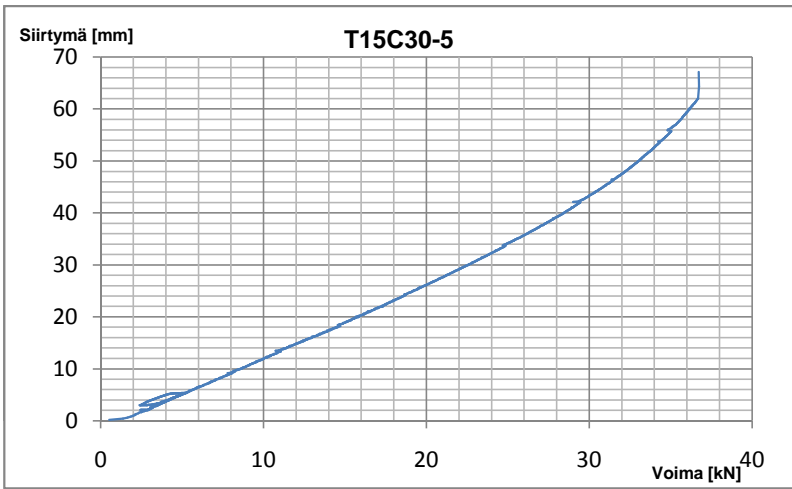
Kuvaaja 2.30.2 Koekappaleen T15C30-1 toteutunut kuormitusohjelma



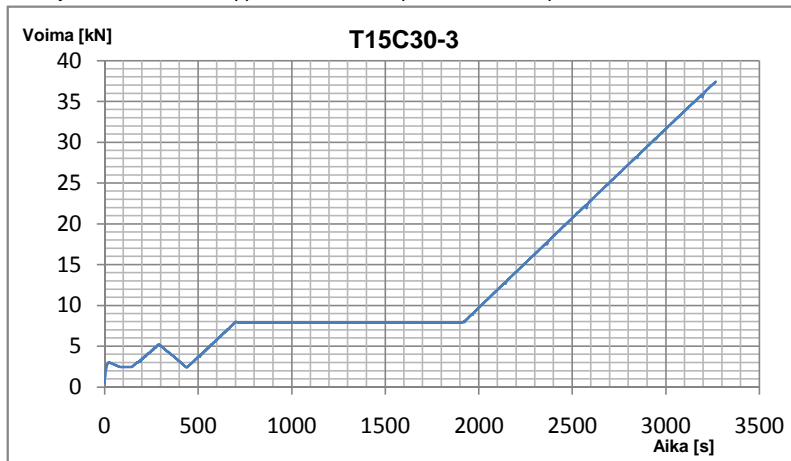
Kuvaaja 2.30.4 Koekappaleen T15C30-2 toteutunut kuormitusohjelma



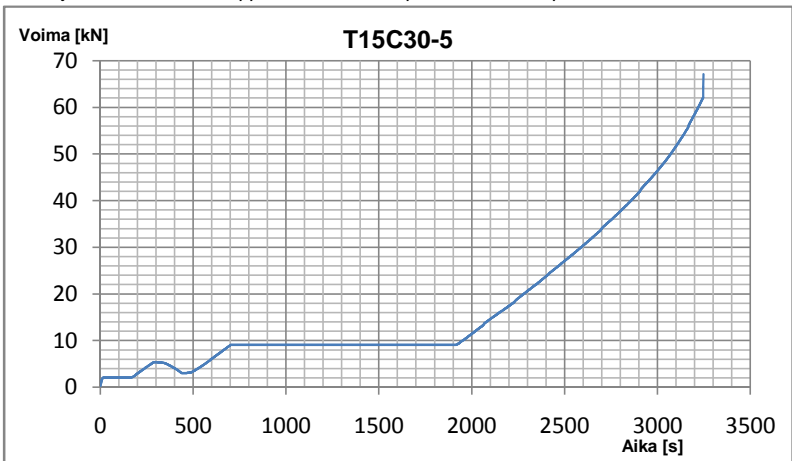
Kuvaaja 2.31.1 Koekappaleen T15C30-3 puristusvoima taipuman funktiona.



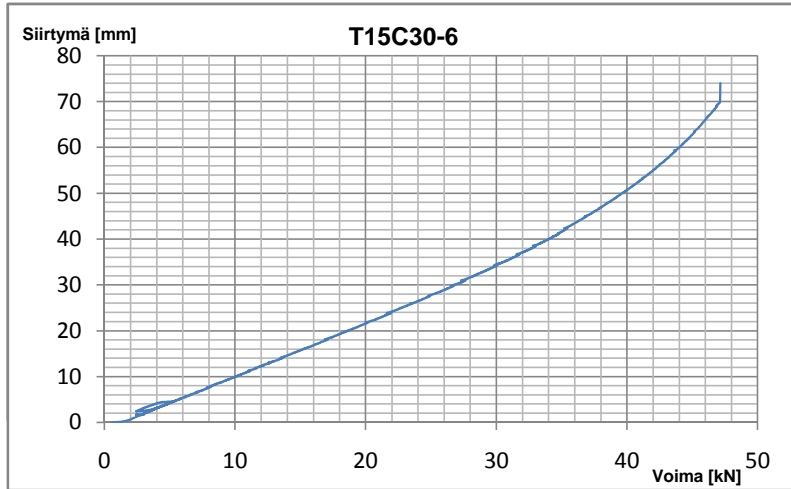
Kuvaaja 2.31.3 Koekappaleen T15C30-5 puristusvoima taipuman funktiona.



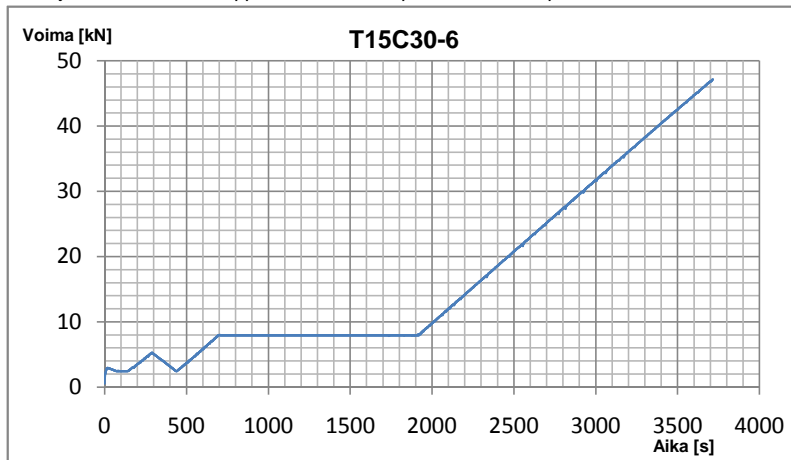
Kuvaaja 2.31.2 Koekappaleen T15C30-3 toteutunut kuormitusohjelma



Kuvaaja 2.31.4 Koekappaleen T15C30-5 toteutunut kuormitusohjelma

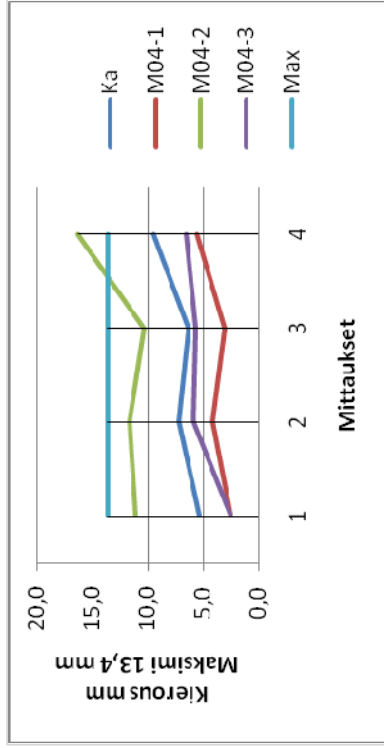
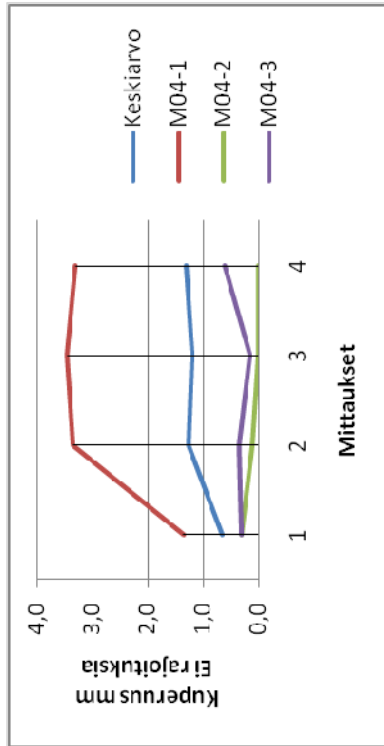
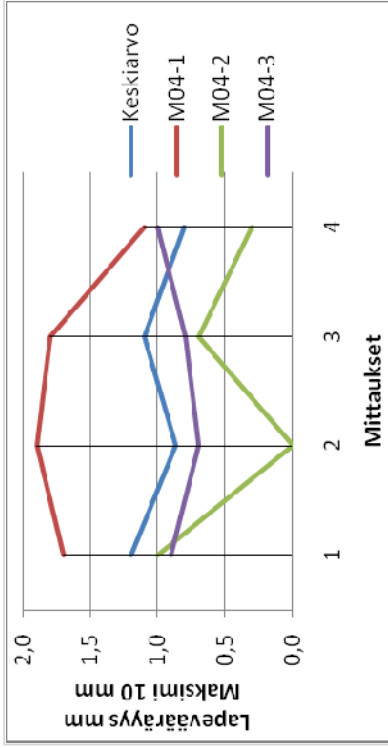
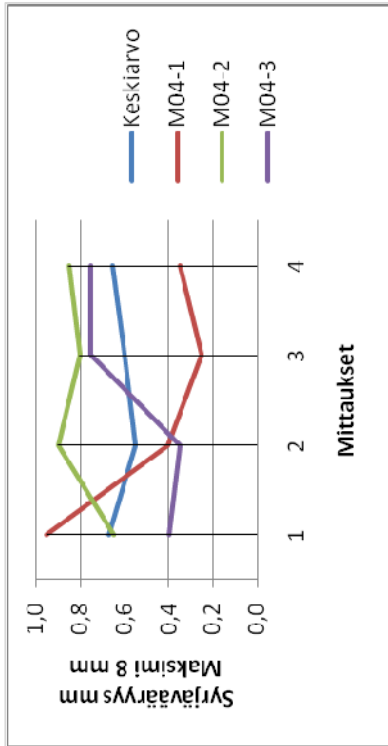


Kuvaaja 2.32.1 Koekappaleen T15C30-6 puristusvoima taipuman funktiona.

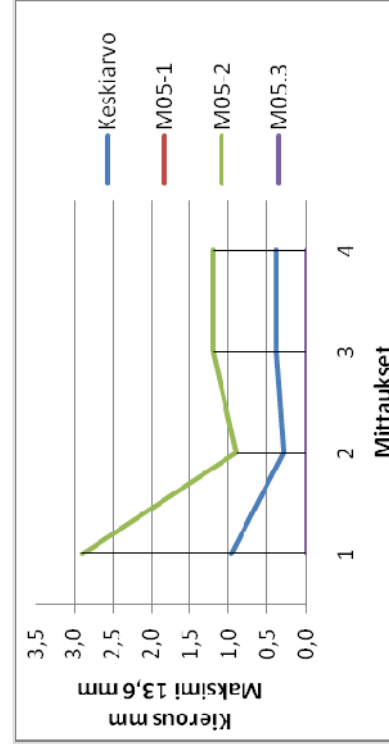
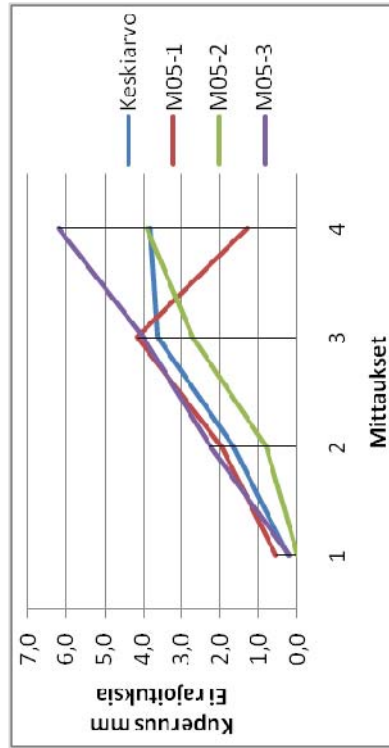
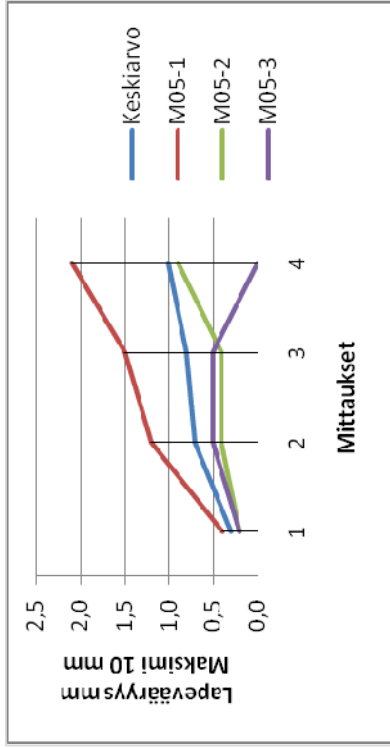
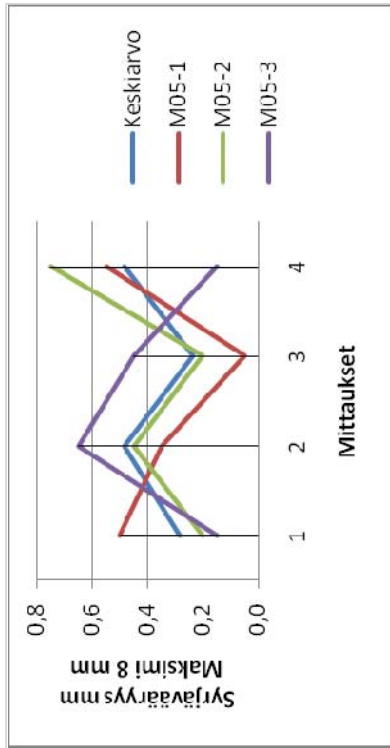


Kuvaaja 2.32.2 Koekappaleen T15C30-6 toteutunut kuormitusohjelma

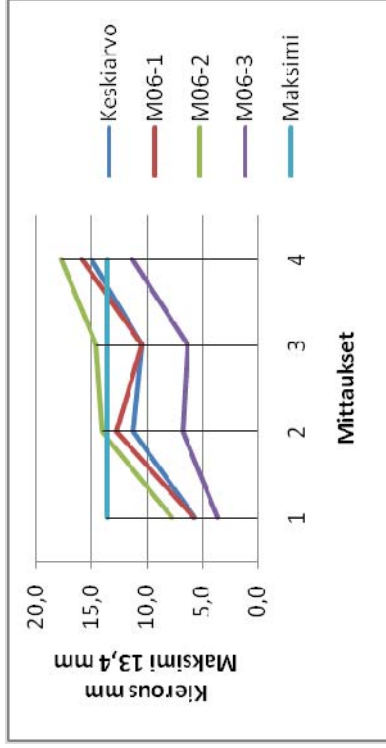
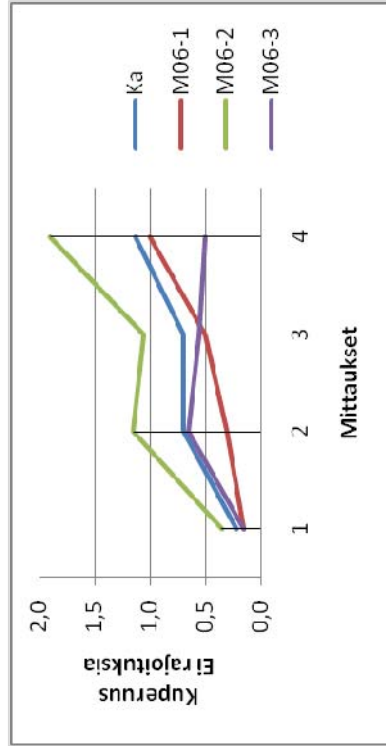
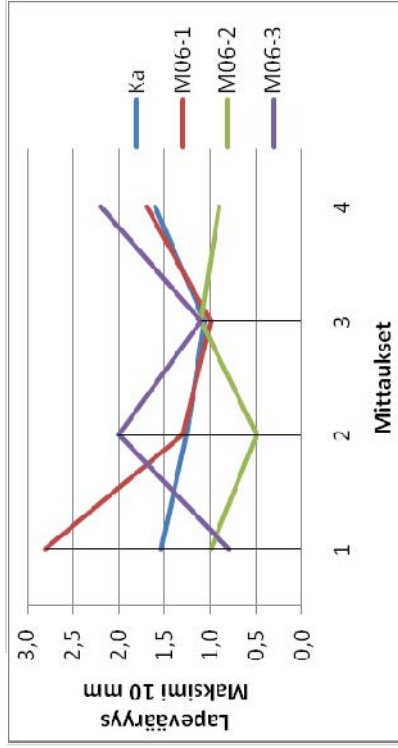
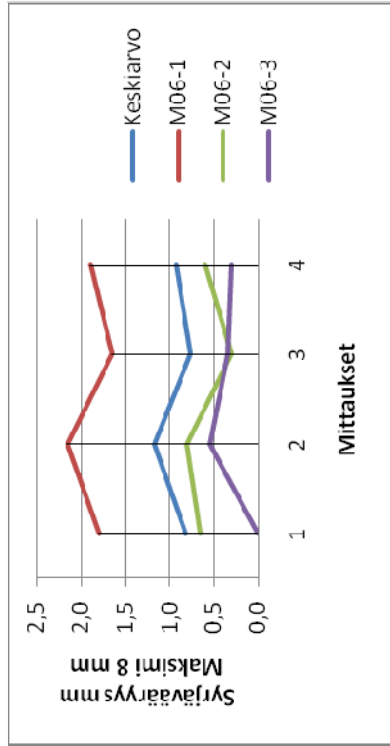
Koekappaleiden M04-1 – M04-3 muotovirheet



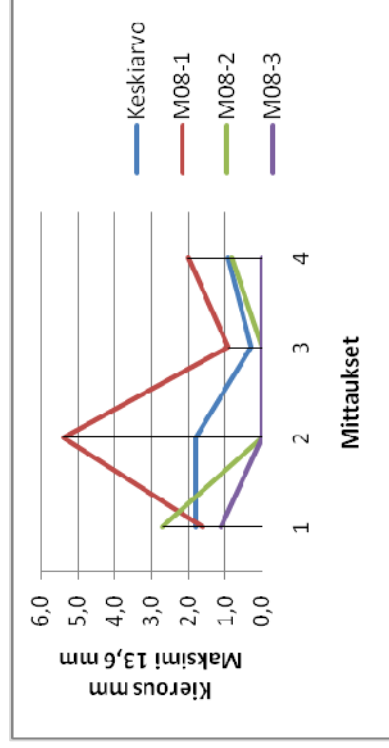
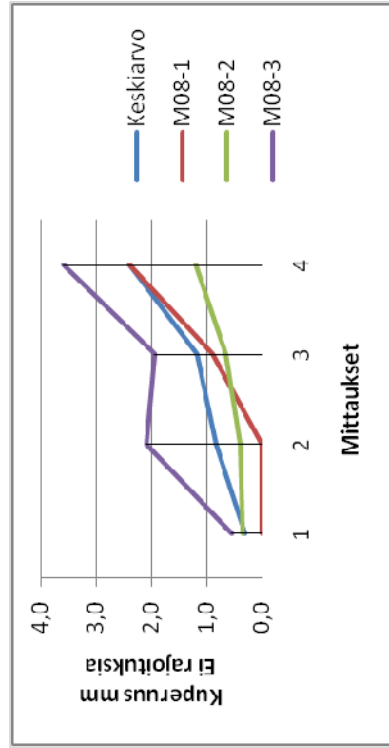
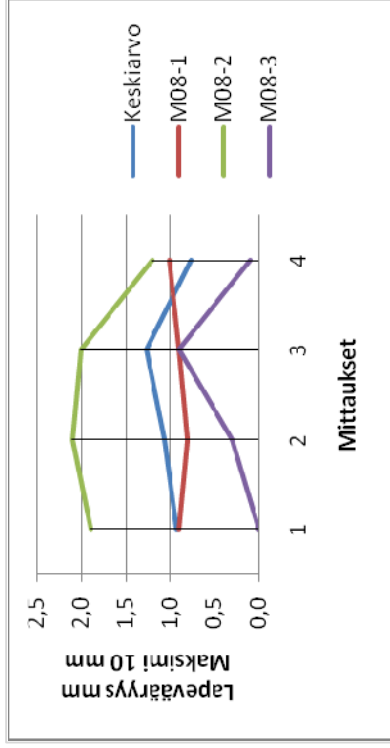
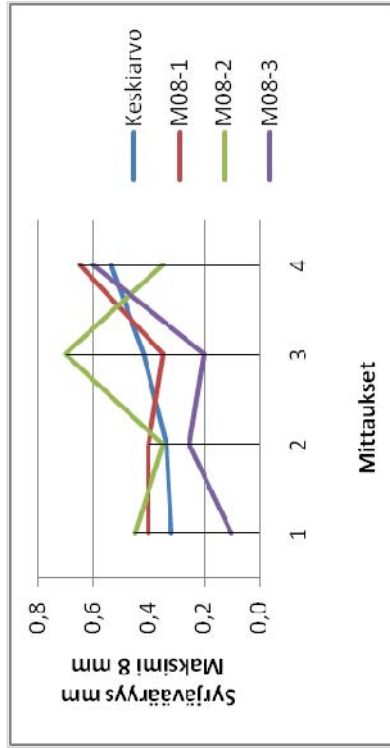
Koekappaleitten M05-1 – M05-3 muotovirheet



Koekappaleitten M06-1 – M06-3 muotovirheet.



Koekappaleitten M08-1 – M08-3 muotovirheet.



Taivutuskokeiden tulokset yksittäisille koekappaleille.

Palkin tunnus	#	max F [kN]	f_m [N/mm ²]	$f_m/f_{m,k}$	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	Murtotapa ja -kohta
T01C24	1	20,8	43,2	1,8	12180,8	Taivutusmurto, oksa 0,2 m keskeltä
T01C24	2	16,3	33,9	1,4	9994,2	Taivutusmurto, oksa 0,17 m keskeltä sydän poikkileikkauksen keskellä
T01C24	3	-				Hylätty koekappale
T01C24	4	19,6	41,2	1,7	10554,4	Taivutusmurto, oksa 0,7 m keskeltä
T01C24	5	26,6	56,2	2,3	13559,1	Taivutusmurto, oksaryhmä keskellä palkkia
T02C30	1	25,3	52,7	1,8	11901,2	Taivutusmurto, oksaryhmä 0,55 m keskeltä
T02C30	2	30,9	65,5	2,2	13843,0	Taivutusmurto keskellä palkkia
T02C30	3	24,4	51,1	1,7	11292,7	Taivutusmurto keskialueella
T02C30	4	27,8	58,1	1,9	14444,9	Leikkaushalkeamia palkin keskikorkeudella Taivutusmurto keskialueella
T02C30	5	23,5	49,3	1,6	12748,4	Leikkaushalkeamia palkin keskikorkeudella Taivutusmurto keskialueella
T03C24s*	1	21,5	45,5	1,9	15587,4	Taivutusmurto sormijatkos 0,1 m keskeltä
T03C24s	2	21,4	44,8	1,9	13282,4	Taivutusmurto sormijatkos 0,7 m keskeltä
T03C24s	3	23,9	50,1	2,1	12081,3	Leikkaushalkeamia palkin keskikorkeudella Taivutusmurto sormijatkos 0,55 m keskeltä
T03C24s	4	17,1	35,3	1,5	11282,6	Taivutusmurto sormijatkos 0,1 m keskeltä
T03C24s	5	14,6	31,0	1,3	12387,8	Taivutusmurto, oksa 0,6 m keskeltä Sormijatkos ehjä 0,5 m keskeltä
T04C30s	1	17,3	36,3	1,2	14694,5	Taivutusmurto oksa 0,5 m keskeltä
T04C30s	2	19,0	39,8	1,3	12666,9	Taivutusmurto sormijatkos 0,2 m keskeltä
T04C30s	3	18,2	38,0	1,3	14387,8	Pituussuuntainen halkeama 30 mm alareunasta L = 2,1 m Sormijatkos 0,6 m keskeltä ehjä
T04C30s	4	17,2	36,2	1,2	12539,0	Leikkaushalkeama palkin keskellä L = 3 m Taivutusmurto sormij. vierestä 0,1 m keskeltä
T04C30s	5	15,5	33,0	1,1	10893,5	Leikkaushalkeama 60 mm alareunasta L = 2,6 m Taivutusmurto oksa 0,5 m Sormijatkos 0,35 m keskeltä ehjä
T05C24	1	21,5	44,4	1,9	12374,4	Leikkaushalkeamia palkin keskikorkeudella Taivutusmurto oksa 0,2 m keskeltä
T05C24	2	25,7	52,8	2,2	13011,2	Yläreunan puristusmurto oksan kohdalla keskellä palkkia, koe keskeytettiin suuren taipuman vuoksi
T05C24	3	21,9	45,1	1,9	15690,6	Leikkaushalkeama palkin keskellä L = 2 m Taivutusmurto, oksa 0,32 m keskeltä
T05C24	4	19,4	40,2	1,7	13274,6	Leikkaushalkeama palkin keskellä L = 2,5 m Taivutusmurto, oksa 0,4 m keskeltä
T05C24	5	21,1	43,3	1,8	12177,7	Leikkaushalkeama palkin keskellä L = 3,0 m Taivutusmurto, oksa keskellä palkkia
T06C30	1	26,2	53,9	1,8	12666,3	Leikkaushalkeama 30 mm alareunasta L 1,3 m Taivutusmurto, oksa 0,35 m keskeltä
T06C30	2	24,3	50,3	1,7	12835,3	Leikkaushalkeama palkin keskellä L = 2,5 m Taivutusmurto, oksa 0,7 m keskeltä
T06C30	3	18,8	39,1	1,3	11760,7	Leikkaushalkeama palkin keskellä L = 2,5 m Taivutusmurto, oksa 0,5 m keskeltä
T06C30	4	19,9	41,1	1,4	11349,0	Leikkaushalkeama palkin keskellä L = 2,0 m Taivutusmurto, oksa 0,4 m keskeltä
T06C30	5	17,5	36,2	1,2	12900,3	Leikkaushalkeama palkin keskellä L = 2,0 m Taivutusmurto, oksa 0,5 m keskeltä

Palkin tunnus	#	max F [kN]	f_m [N/mm ²]	f_m/f_k	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	Murtotapa ja -kohta
T07C24s	1	19,0	38,9	1,6	14716,3	taivutusmurto, sormijatkos 0,47 m keskeltä
T07C24s	2	21,5	44,5	1,9	12966,3	taivutusmurto, oksa 0,05 m keskeltä
T07C24s	3	17,6	36,4	1,5	13298,2	taivutusmurto, sormijatkos 0,38 m keskeltä
T07C24s	4	17,6	36,1	1,5	13581,0	taivutusmurto, sormijatkos 0,32 m keskeltä
T07C24s	5	18,4	37,8	1,6	14711,9	taivutusmurto, sormijatkos 0,45 m keskeltä
T08C30s	1	27,2	56,1	1,9	15074,2	leikkaushalkeama 1,4 m keskeltä taivutusmurto, oksa etäisyys 0,4 m keskeltä
T08C30s	2	15,3	31,4	1,0	13062,8	taivutusmurto, sormijatkos 0,2 m keskeltä
T08C30s	3	21,0	43,1	1,4	12382,1	leikkaushalkeama 0,94 ja 1,5 m keskeltä taivutusmurto, oksa etäisyys 0,38 m keskeltä
T08C30s	4	20,2	41,3	1,4	15570,2	leikkaushalkeama 1,17 ja 2,1 m keskeltä taivutusmurto, sormijatkos 0,41 m keskeltä
T08C30s	5	15,5	31,8	1,1	10344,9	leikkaushalkeama 0,6 ja 1,85 m keskeltä taivutusmurto, sormijatkos 0,27 m keskeltä
T09C24	1	39,5	40,8	1,7	11069,3	leikkaushalkeama 3,2 m palkin päästä 1. ja 2. lamellin välissä, keskiosassa 2. lamellissa taivutusmurto, oksa etäisyys 0,38 m keskeltä
T09C24	2	39,1	41,0	1,7	12870,9	leikkaushalkeama 4,0 m taivutusmurto, oksa etäisyys 0,25 m keskeltä
T09C24	3	53,1	57,8	2,4	14349,3	leikkaushalkeama 4,4 m 1. ja 2. lamellin välissä taivutusmurto, oksa etäisyys 0,28 m keskeltä
T09C24	4	48,3	50,9	2,1	12491,2	leikkaushalkeama 3,45 m taivutusmurto, oksa etäisyys 0,15 m keskeltä
T10C30	1	58,6	61,1	2,0	13797,9	Taivutus keskeytettiin suuren taipuman vuoksi. Yläreunan oksan kohdalla puristuskestävyyden ylitys, tyssäntymistä
T10C30	2	46,0	47,8	1,6	12044,3	taivutusmurto, oksan etäisyys 0,12 m keskeltä
T10C30	3	41,8	42,9	1,4	12032,4	taivutusmurto, oksaryhmän etäisyys 0,78 m keskeltä
T10C30	4	42,3	44,0	1,5	12561,7	taivutusmurto, oksan etäisyys 0,08 m keskeltä, halkeama L=3,06 m etäisyys alareunasta 70 mm - 80 mm
T10C30	5	44,2	45,6	1,5	12621,2	taivutusmurto alin lamelli, oksan etäisyys 0,94 m keskeltä, leikkaushalkeama L=3,6 m palkin päästä, taivutusmurto 2. lamelli
T13C24/C30	1	55,9	57,9	1,9	12363,6	taivutusmurto, palkki taipui mittauskapasiteetin rajalle, ei oksia alareunassa, pari sälettä irti alareunasta
T13C24/C30	2	30,4	31,3	1,0	10543,7	taivutusmurto, oksan etäisyys 0,86 m keskeltä, halkeama L=3,0 m symmetrisesti, etäisyys alareunasta 70 mm - 80 mm
T13C24/C30	3	53,6	55,6	1,9	12866,6	Koe keskeytettiin suuren taipiman vuoksi ennen murtoa, alareunassa ei oksia
T13C24/C30	4	49,4	51,0	1,7	12605,0	taivutusmurto, oksan etäisyys 0,25 m keskeltä, halkeamat L=1,78 m ja 1,63 m keskeltä, etäisyys alareunasta 75 ja 120 mm
T13C24/C30	5	27,2	27,9	0,9	10361,9	taivutusmurto, oksan etäisyys 0,77 m keskeltä, halkeamat L=1,21 m ja 0,74 m keskeltä, etäisyys alareunasta 75 mm

Palkin tunnus	#	max F [kN]	f_m [N/mm ²]	f_m/f_k	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	Murtotapa ja -kohta
T14C24s	1		-			Hylätty koekappale, sormijatkos oli vioittunut
T14C24s	2	28,1	29,8	1,2	10929,3	leikkaushalkeama 3,45 m, taivutusmurto oksasta, etäisyys 0,15 m keskeltä
T14C24s	3	31,0	33,0	1,4	10368,2	taivutusmurto, syrjäoksa etäisyys 1,1 m keskeltä, sormijatkos ehjä 1,45 m keskeltä
T14C24s	4	26,4	28,1	1,2	11744,5	taivutusmurto, oksa etäisyys 1,0 m keskeltä, sormijatkos ehjä oksan vieressä
T14C24s	5	28,2	29,9	1,2	10018,2	taivutusmurto, oksa etäisyys 0,4 m keskeltä, sormijatkos ehjä 0,15 m palkin keskeltä
T15C30s	1	38,9	42,0	1,4	11860,9	taivutusmurto sormijatkoksen kohdalla, 0,09 m keskeltä
T15C30s	2	38,0	40,9	1,4	12161,6	taivutusmurto sormijatkoksen kohdalla, 0,1 m keskeltä
T15C30s	3	37,5	40,2	1,3	12237,3	taivutusmurto sormijatkoksen kohdalla, 0,15 m keskeltä
T15C30s	4		-			Hylätty koekappale
T15C30s	5	36,8	39,5	1,3	11337,0	taivutusmurto sormijatkoksen kohdalla, 0,17 m keskeltä
T15C30s	6	47,2	50,6	1,7	13163,5	taivutusmurto sormijatkoksen kohdalla, 1,06 m keskeltä
*s = sormijatkos						

Taivutuskokeet, palkkien poikkileikkausmitat, tiheydet sekä kosteusprosentit.

Palkin tunnus	#	b [mm]	h [mm]	ρ [kg/m ³]	ω [%]
T01C24	1	45,2	190,6	387,0	12,1
T01C24	2	45,2	190,6	434,7	12,8
T01C24	4	45,2	189,7	402,3	13,3
T01C24	5	44,7	190,3	474,4	13,0
Keskiarvo		45,1	190,3	424,6	12,8
Keskihajonta		0,2	0,4	38,7	0,5
T02C30	1	45,0	190,9	403,5	12,1
T02C30	2	44,5	190,4	454,4	13,0
T02C30	3	45,2	190,2	420,0	12,2
T02C30	4	45,1	190,6	438,7	12,9
T02C30	5	44,8	190,8	440,6	12,1
Keskiarvo		44,9	190,6	431,4	12,5
Keskihajonta		0,3	0,3	19,8	0,4
T03C24s	1	44,7	190,2	517,6	13,2
T03C24s	2	44,9	190,8	455,4	12,7
T03C24s	3	44,9	190,4	399,7	12,1
T03C24s	4	45,4	191,2	399,0	12,1
T03C24s	5	44,5	190,3	461,3	12,8
Keskiarvo		44,9	190,6	446,6	12,6
Keskihajonta		0,3	0,4	49,5	0,5
T04C30s	1	44,7	190,8	423,3	12,6
T04C30s	2	45,1	190,1	455,0	12,9
T04C30s	3	45,0	190,7	470,1	12,8
T04C30s	4	45,0	190,4	410,5	13,0
T04C30s	5	44,8	189,1	352,3	12,1
Keskiarvo		44,9	190,2	422,3	12,7
Keskihajonta		0,2	0,7	45,8	0,4
T05C24	1	45,4	191,0	426,7	12,3
T05C24	2	45,5	191,4	476,1	12,8
T05C24	3	45,4	191,0	498,2	12,6
T05C24	4	45,4	190,8	437,9	12,3
T05C24	5	45,5	191,3	447,4	12,4
Keskiarvo		45,4	191,1	457,3	12,5
Keskihajonta		0,1	0,3	29,3	0,2

Palkin tunnus	#	b [mm]	h [mm]	ρ [kg/m³]	ω [%]
T06C30	1	45,5	191,3	464,8	12,6
T06C30	2	45,5	190,9	458,4	12,3
T06C30	3	45,2	190,9	453,2	11,9
T06C30	4	45,4	191,2	429,6	12,2
T06C30	5	45,6	190,4	467,9	12,1
Keskiarvo		45,4	190,9	454,8	12,2
Keskihajonta		0,2	0,3	15,2	0,2
T07C24s	1	45,6	191,2	463,6	12,6
T07C24s	2	45,4	190,7	484,0	12,6
T07C24s	3	45,3	191,0	474,2	12,8
T07C24s	4	45,6	191,1	443,7	12,6
T07C24s	5	45,6	191,2	483,7	12,9
Keskiarvo		45,5	191,0	469,8	12,7
Keskihajonta		0,1	0,2	16,8	0,1
T08C30s	1	45,6	190,7	490,0	12,9
T08C30s	2	45,6	190,8	463,5	12,8
T08C30s	3	45,6	190,8	434,1	12,9
T08C30s	4	45,5	191,6	485,8	12,5
T08C30s	5	45,6	190,9	415,6	12,3
Keskiarvo		45,6	191,0	457,8	12,7
Keskihajonta		0,0	0,4	32,4	0,3
T09C24	1	45,0	287,6	480,5	12,3
T09C24	2	44,2	288,0	427,3	12,1
T09C24	3	42,9	286,9	488,7	12,4
T09C24	4	44,4	286,6	450,9	12,4
Keskiarvo		44,1	287,2	461,8	12,3
Keskihajonta		0,9	0,6	28,2	0,2
T10C30	1	45,0	286,3	504,5	12,6
T10C30	2	45,4	285,8	475,9	12,3
T10C30	3	45,7	286,4	463,2	12,1
T10C30	4	45,3	285,8	481,1	12,4
T10C30	5	45,4	286,6	417,1	8,8
Keskiarvo		45,3	286,2	468,3	11,6
Keskihajonta		0,3	0,3	32,3	1,6
T13C24/C30	1	45,4	286,2	460,1	12,6
T13C24/C30	2	45,4	286,8	443,6	12,0
T13C24/C30	3	45,3	286,2	429,3	12,2
T13C24/C30	4	45,4	286,6	473,7	12,7
T13C24/C30	5	45,5	287,2	428,6	15,6
Keskiarvo		45,4	286,6	447,0	13,0
Keskihajonta		0,1	0,5	19,7	1,5

Palkin tunnus	#	b [mm]	h [mm]	ρ [kg/m³]	ω [%]
T14C24s	2	44,7	285,1	437,0	12,2
T14C24s	3	44,7	284,4	408,1	12,9
T14C24s	4	44,7	284,2	420,9	12,7
T14C24s	5	44,8	285,1	392,2	12,2
Keskiarvo		44,7	284,7	414,5	12,5
Keskihajonta		0,0	0,5	19,0	0,4
T15C30s	1	44,6	282,9	470,1	15,0
T15C30s	2	44,7	282,6	471,6	15,7
T15C30s	3	44,6	283,4	438,4	15,6
T15C30s	5	44,6	283,5	482,0	15,7
T15C30s	6	44,7	283,4	484,9	15,9
Keskiarvo		44,6	283,1	469,4	15,6
Keskihajonta		0,0	0,4	18,5	0,4

Pitkäaikaiskokeet palkille, mitatut taipumat ja olosuhteet

Palkin poikkileikkaus on $h \times b = 285 \times 45$ ja jänneväli $l = 4420$ mm. Toista koekappaleita säilytettiin puulaboratoriossa vakio-olosuhteissa ja toista ulkona katoksen alla. Puulaboratoriossa suhteellisen kosteuden piti olla $R_h = 65 \% \pm 5 \%$ ja lämpötilan $+ 20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$. Palkin kokonaispituus oli 4,56 m. Koekappale oli tehty kahdesta syrjältään liimatusta 3-lamellipalkista liitettyinä toisiinsa kiepahdussiteillä päistään ja keskikohdan molemmin puolin 1 metrin etäisyydellä toisistaan. Kiepahdussiteinä käytettiin samankokoista poikkileikkausta kuin itse palkki on.

Taipumat mitattiin mittakelloilla palkkien alapuolelta keskellä jänneväliä mittakelloilla Mitutoyo ID-C 150B, joiden mitta-alue on 0 – 50,8 mm, luentatarkkuus 0,001 mm ja mittaustarkkuus 0,006 mm. Ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila mitattiin laitteella Vaisala HM141 Humidity and Temperature Indicator, suhteellisen kosteuden mittaustarkkuus 3 % ja lämpötilan $\pm 0,3 \text{ °C}$.

Pysyvä kuorma $G = 2,4 \text{ kN/m}$ kahdelle palkille.

Taulukon 1. sarakkeen numerointi osoittaa arvot, jotka ovat mukana tutkimusraportin graafisissa kuvissa 4.24 ja 4.25.

Havaitut taipumat laboratoriossa

Nro	Pvm	mm	Rh %	°C	klo	puu kost%
1	1.4.2010	6,490	65,1	19,7	17.00	13,5
	1.4.2010	6,583	64,8	20,0	17.48	
	2.4.2010	6,891	67,2	19,3	11.30	
	2.4.2010	6,953	66,6	19,4	18.00	
	3.4.2010	7,011	65,6	19,8	17.00	
	4.4.2010	7,154	66,6	19,4	13.50	
	4.4.2010	7,163	66,1	19,7	18.00	
	5.4.2010	7,171	67,1	19,9	13.00	
	5.4.2010	7,190	65,6	19,4	18.00	
	6.4.2010	7,154	65,8	19,9	12.40	
	6.4.2010	7,161	66,2	19,8	16.00	
	7.4.2010	7,169	66,3	20,0	8.15	
	7.4.2010	7,176	65,7	20,3	16.40	
2	8.4.2010	7,184	65,8	19,7	8.25	
	8.4.2010	7,237	64,1	19,6	13,2	
	8.4.2010	7,247	60,3	19,4	16.30	
	9.4.2010	7,307	68,6	19,6	8.30	
	9.4.2010	7,308	62,6	19,4	15.30	
	10.4.2010	7,375	66,2	20,3	17.00	
	11.4.2010	7,444	67,5	19,9	18.00	
	12.4.2010	7,485	65,3	20,9	9.20	
	12.4.2010	7,489	66,8	21,4	15.50	
	13.4.2010	7,549	63,3	20,3	8.38	
	14.4.2010	7,605	64,3	20,6	8.30	
	14.4.2010	7,588	62,0	21,5	16.08	

Havaitut taipumat ulkona

Nro	mm	Rh %	°C	puu kost%
	-	-	-	-

	Pvm	mm	Rh %	°C	klo	puu kost%
3	15.4.2010	7,689	65,8	18,9	10.15	
	15.4.2010	7,676	62,6	20,4	16.30	
	16.4.2010	7,689	66,7	20,7	12.20	
	17.4.2010	7,724	65,6	21,5	12.20	
	18.4.2010	7,774	65,5	21,8	13.20	
	19.4.2010	7,823	63,7	21,7	8.30	
	19.4.2010	7,828	63,5	19,4	16.25	
	20.4.2010	7,914	65,7	18,5	8.35	
	20.4.2010	7,901	61,3	18,8	16.05	
	21.4.2010	7,937	66,9	18,1	8.25	
	21.4.2010	7,900	61,8	19,0	16.00	
4	22.4.2010	7,934	64,3	21,1	12.20	
	23.4.2010	7,974	64,5	21,1	9.00	
	26.4.2010	8,086	66,3	18,6	9.10	
	27.4.2010	8,091	64,3	22,4	14.05	
	28.4.2010	8,169	61,3	19,1	12.40	
5	29.4.2010	8,180	66,7	19,9	12.30	
	30.4.2010	8,201	66,1	20,4	14.00	
	2.5.2010	8,224	68,5	21,3	11.05	
	3.5.2010	8,246	66,5	21,3	9.25	
	4.5.2010	8,296	65,5	19,5	14.50	
	5.5.2010	8,289	61,4	20,8	11.40	
6	6.5.2010	8,304	62,0	21,0	11.40	
	8.5.2010	8,351	66,3	21,0	12.45	
	10.5.2010	8,374	65,5	20,3	9.55	
	11.5.2010	8,400	66,7	19,7	12.25	
	12.5.2010	8,405	66,4	20,2	10.10	
7	14.5.2010	8,447	67,2	20,0	19.20	

	mm	Rh %	°C	puu kost%
1	6,439	77,1	4,4	13,5
	6,726	78,7	3,5	
	7,075	65,5	6,2	
	7,070	59,1	10,8	
	6,943	31,1	8,8	
2	7,167	88,4	6,9	
	7,303	64,4	14,4	
	7,394	54,4	7,7	
	7,401	45,9	7,3	
	7,593	45,5	11,4	
	7,366	46,7	10,0	
3	7,382	37,3	9,4	
	7,570	78,3	6,3	
	7,605	69,5	8,3	
	7,478	52,3	13,5	
	7,660	62,0	13,2	
4	8,445	63,2	19,7	

Liite 6 3/ 5

Jatkuu

	Pvm	mm	Rh %	°C	klo	puu kost%
	18.5.2010	8,482	68,8	20,4	8.40	
	19.5.2010	8,479	61,7	21,5	12.40	
	20.5.2010	8,517	64,9	21,1	13.50	
8	21.5.2010	8,536	67,0	20,8	12.55	
	22.5.2010	8,525	51,4	22,4	12.25	
	24.5.2010	8,649	63,2	20,8	10.50	
	25.5.2010	8,683	63,5	19,8	9.50	
9	26.5.2010	8,696	64,5	19,9	9.45	
10	3.6.2010	8,694	63,6	19,5	12.15	
11	10.6.2010	8,723	65,0	19,7	14.55	
12	17.6.2010	8,741	64,0	18,7	11.15	
13	28.6.2010	8,757	65,2	20,8	10.30	13, 40
	1.7.2010	8,737	66,3	21,2	14.15	
14	8.7.2010	8,791	65,2	22,8	15.50	
15	15.7.2010	8,889	66,2	24,7	10.30	
16	22.7.2010	9,019	66,2	24,6	11.00	
17	2.8.2010	9,143	67,3	22,9	15.00	
18	12.8.2010	9,187	65,9	22,6	13.45	
19	19.8.2010	9,246	68,3	20,7	13.50	
20	26.8.2010	9,270	68,5	19,4	12.50	
21	2.9.2010	9,288	64,1	18,1	13.30	13,50 %
22	9.9.2010	9,274	65,4	19,0	14.30	
23	16.9.2010	9,259	65,6	18,7	12.30	13,70 %
24	23.9.2010	9,383	54,2	19,0	11.20	13,70 %
25	30.9.2010	9,394	68,2	18,4	12.40	13,70 %
26	7.10.2010	9,343	68,0	17,5	11.10	13,50 %
27	14.10.2010	9,282	69,8	18,2	11.00	13,50 %
28	21.10.2010	9,296	66,4	17,8	11.10	13,40 %

	mm	Rh %	°C	puu kost%
	8,584	80,9	18,3	
	8,456	50,1	24,4	
	8,622	37,0	24,3	
5	8,679	40,1	23,3	
	8,759	49,2	22,6	
	8,791	75,4	11,5	
	8,579	60,5	12,3	
6	8,631	48,3	13,4	
7	8,826	37,4	19,5	
8	9,027	32,5	22,4	
9	8,769	44,1	17,7	
10	8,981	61,6	19,5	13,6
	9,161	54,6	20,9	
11	9,224	42,0	25,3	
12	9,408	50,6	25,4	
13	9,291	55,1	25,6	
14	9,188	46,1	24,0	
15	9,173	58,1	24,1	
16	9,310	44,1	19,6	
17	9,277	75,3	14,0	
18	9,230	41,9	14,9	13,7
19	9,214	48,1	19,6	
20	9,442	85,4	12,6	15,5
21	9,704	74,1	13,5	15,9
22	9,896	58,0	11,6	15,2
23	10,005	71,0	9,8	15,3
24	9,893	80,7	6,5	14,5
25	9,836	61,4	3,4	14,4

Liite 6 4/5

Jatkuu

	Pvm	mm	Rh %	°C	klo	puu kost%
29	26.10.2010	9,347	64,0	18,7	13.50	12,30 %
30	4.11.2010	9,371	66,2	17,2	12.45	13,30 %
31	12.11.2010	9,398	67,1	17,6	10.30	13,30 %
32	18.11.2010	9,399	66,8	19,2	10.20	13,50 %
33	25.11.2010	9,430	65,0	18,9	10.15	13,50 %
34	3.12.2010	9,480	64,2	19,6	12.00	13,50 %
35	9.12.2010	9,472	63,6	19,5	10.30	13,40 %
36	16.12.2010	9,508	65,2	18,5	14.15	13,40 %
37	23.12.2010	9,525	61,6	18,0	14.15	13,00 %
38	5.1.2011	9,537	64,7	18,7	13.50	13,60 %
39	7.1.2011	9,538	64,0	18,8	13.50	13,60 %
40	13.1.2011	9,485	66,2	19,1	11.00	13,80 %
41	20.1.2011	9,640	24,3	19,8	12.35	12,70 %
42	27.1.2011	10,447	16,6	18,9	10.30	11,30 %
43	3.2.2011	10,944	27,7	19,5	13.15	9,20 %
44	10.2.2011	11,230	10,6	33,5	12.00	10,40 %
45	17.2.2011	13,220	3,0	46,6	13.35	7,10 %
46	24.2.2011	14,264	2,1	49,2	13.00	4,90 %
47	3.3.2011	14,690	4,2	51,8	13.20	5,10 %
48	10.3.2011	14,838	26,0	18,9	16.30	3,30 %
49	17.3.2011	14,748	14,4	19,0	12.30	2,50 %
50	24.3.2011	14,671	15,8	19,3	13.30	3,50 %
51	1.4.2011	14,709	19,2	18,3	12.00	3,40 %

	mm	Rh %	°C	puu kost%
26	9,790	73,1	5,8	14,2
27	10,104	78,6	7,3	16,3
28	9,963	89,0	3,4	16,0
29	9,977	84,7	-0,8	15,8
30	9,900	64,1	-5,6	15,2
31	10,035	83,2	-3,8	15,7
32	10,071	83,2	-3,2	15,8
33	9,832	72,7	0,1	16,2
34	9,870	66,5	-18,7	14,2
35	10,055	84,4	-7,8	15,8
36	10,061	85,0	-2,0	15,8
37	10,655	82,0	-4,0	16,2
38	10,759	79,6	-1,8	17,2
39	10,519	81,6	-6,8	16,2
39	10,822	90,2	1,0	16,6
40	10,720	75,4	-7,8	15,1
41	10,507	73,0	-13,4	14,1
42	10,837	70,1	-3,0	15,2
43	10,885	65,2	3,0	15,6
43	11,091	79,0	1,3	15,0
44	11,098	54,5	-0,3	14,6
45	11,268	53,5	1,2	14,7
46	11,283	60,3	1,6	14,2

Liite 6 5/5

Kuormituksen kestosta riippuva suhde w_t / w_{inst}

Taulukon ensimmäiselle riville on kirjattu mitatut alkutaipumat. Seuraavat rivit esittävät viikoittain mitatun taipuman $w_{t\text{ week}}$ ja alkutaipuman suhdetta.

	Koekappale 1 (laboratorio)	Koekappale 2 (ulkona)
Alkutaipuma w_{inst} (mm)	6,490	6,439
$w_2\text{ week} / w_{inst}$	1,11	1,11
$w_3\text{ week} / w_{inst}$	1,18	1,15
$w_4\text{ week} / w_{inst}$	1,22	1,31
$w_5\text{ week} / w_{inst}$	1,26	1,35
$w_6\text{ week} / w_{inst}$	1,28	1,34
$w_7\text{ week} / w_{inst}$	1,30	1,37
$w_8\text{ week} / w_{inst}$	1,32	1,40
$w_9\text{ week} / w_{inst}$	1,34	1,36
$w_{10}\text{ week} / w_{inst}$	1,34	1,39
$w_{11}\text{ week} / w_{inst}$	1,34	1,43
$w_{12}\text{ week} / w_{inst}$	1,34	1,43
$w_{13}\text{ week} / w_{inst}$	1,35	1,46
$w_{14}\text{ week} / w_{inst}$	1,35	1,44
$w_{15}\text{ week} / w_{inst}$	1,35	1,43
$w_{16}\text{ week} / w_{inst}$	1,35	1,43
$w_{17}\text{ week} / w_{inst}$	1,37	1,42
$w_{18}\text{ week} / w_{inst}$	1,39	1,45
$w_{19}\text{ week} / w_{inst}$	1,41	1,44
$w_{20}\text{ week} / w_{inst}$	1,42	1,43
$w_{21}\text{ week} / w_{inst}$	1,42	1,43
$w_{22}\text{ week} / w_{inst}$	1,43	1,45
$w_{23}\text{ week} / w_{inst}$	1,43	1,51
$w_{24}\text{ week} / w_{inst}$	1,43	1,54
$w_{25}\text{ week} / w_{inst}$	1,43	1,55
$w_{26}\text{ week} / w_{inst}$	1,45	1,54
$w_{27}\text{ week} / w_{inst}$	1,45	1,53
$w_{28}\text{ week} / w_{inst}$	1,44	1,52
$w_{29}\text{ week} / w_{inst}$	1,44	1,55
$w_{30}\text{ week} / w_{inst}$	1,43	1,59
$w_{31}\text{ week} / w_{inst}$	1,45	1,55
$w_{32}\text{ week} / w_{inst}$	1,44	1,55
$w_{33}\text{ week} / w_{inst}$	1,44	1,55

w_t / w_{inst}	Koekappale 1 (laboratorio)	Koekappale 2 (ulkona)
$\frac{w_{22}^{22}}{w_{inst}^{22}}$	1,45	1,56
$\frac{w_{26}^{22}}{w_{inst}^{22}}$	1,45	1,56
$\frac{w_{22}^{24}}{w_{inst}^{24}}$	1,45	1,53
$\frac{w_{24}^{24}}{w_{inst}^{24}}$	1,46	1,53
$\frac{w_{22}^{26}}{w_{inst}^{26}}$	1,46	1,56
$\frac{w_{22}^{28}}{w_{inst}^{28}}$	1,49	1,56
$\frac{w_{27}^{28}}{w_{inst}^{28}}$	1,49	1,65
$\frac{w_{22}^{30}}{w_{inst}^{30}}$	1,47	1,67
$\frac{w_{22}^{32}}{w_{inst}^{32}}$	1,47	1,63
$\frac{w_{41}^{32}}{w_{inst}^{32}}$	1,46	1,68
$\frac{w_{42}^{32}}{w_{inst}^{32}}$	1,49	1,66
$\frac{w_{46}^{32}}{w_{inst}^{32}}$	1,61	1,63
$\frac{w_{42}^{34}}{w_{inst}^{34}}$	1,69	1,68
$\frac{w_{44}^{34}}{w_{inst}^{34}}$	1,73	1,68
$\frac{w_{42}^{36}}{w_{inst}^{36}}$	2,03	1,72
$\frac{w_{42}^{38}}{w_{inst}^{38}}$	2,27	1,72
$\frac{w_{47}^{38}}{w_{inst}^{38}}$	2,26	1,75
$\frac{w_{42}^{40}}{w_{inst}^{40}}$	2,29	1,75
$\frac{w_{42}^{42}}{w_{inst}^{42}}$	2,27	
$\frac{w_{22}^{44}}{w_{inst}^{44}}$	2,27	
$\frac{w_{22}^{46}}{w_{inst}^{46}}$	2,27	

Tampereen teknillinen yliopisto
PL 527
33101 Tampere

Tampere University of Technology
P.O.B. 527
FI-33101 Tampere, Finland

ISBN 978-952-15-2695-4
ISSN 1459-2045