

Ville Riikonen

Liimapuupalkkien korjausmenetelmät ja korjaussuunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

6.4.2016

Tekijä(t) Otsikko	Ville Riikonen Liimapuupalkkien korjausmenetelmät ja korjaussuunnittelu
Sivumäärä Aika	64 sivua + 6 liitettä 6.4.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaaja(t)	Lehtori Jouni Kalliomäki Tekninen johtaja Olli Saarinen
<p>Tämän insinöörityön aiheena oli liimapuupalkkien korjausmenetelmien tutkiminen ja kehittäminen, sekä korjaussuunnitteluprosessin selkeyttäminen. Tutkimus rajattiin käsittelemään tasakorkeita liimapuupalkkeja, jotka olisivat normaalikäytössä haljenneet korjaamista edellyttävään kuntoon. Perinteisesti käytettyjen korjausmenetelmien lisäksi tutkittiin mahdollisuuksia käyttää puurakenteissa harvemmin käytettyjä hiilikuituvahvistuksia ja niiden erilaisia sovelluksia.</p> <p>Työn tavoitteena oli laatia yrityksen käyttöön liimapuurakenteiden korjaussuunnitteluohje tutustumalla liimapuun yleisimpiin vaurioihin, kartoittamalla käytettäviä korjausmenetelmiä, sekä nostamalla esiin liimapuupalkkien korjaussuunnittelussa erityistä huomiota vaativia seikkoja.</p> <p>Tutkimuksessa tarkasteltiin yleisimpiä liimapuupalkkien halkeilua aiheuttavia tekijöitä, niiden minimoimista, sekä niistä aiheutuneiden vaurioiden korjaamista. Tutkimusta tehtiin kirjallisten lähteiden pohjalta, sekä haastatteleamalla suunnittelijoita heidän kokemuksistaan ja näkemyksistään liimapuupalkkien korjaussuunnitteluun ja –menetelmiin liittyen. Tutkimuksen käytännön osuus toteutettiin koestamalla laboratoriossa eri menetelmin vahvistettuja palkkeja, jotka oli halkaistu kiireellistä korjaamista edellyttävään kuntoon.</p> <p>Tutkimuksen aikana havaittiin, kuinka jokaisella vahvistustavalla on omat hyvät ja huonot puolensa, mukaan lukien vahvistukseen käytettävien tarvikkeiden hinnat. Työssä tehtyjen koestusten perusteella ei voida tehdä kovinkaan jyrkkiä johtopäätöksiä suuntaan tai toiseen johtuen kapeasta otannasta, mutta esimerkiksi työtapojen käytännöllisyyttä voitiin hieman arvioida ja vertailla keskenään. Suunnittelun ohjaamista varten laadittiin kerättyjen tietojen perusteella yrityksen käyttöön suunnitteluohje, jonka avulla pyritään helpottamaan korjausmenetelmän valintaa ja nopeuttamaan suunnittelutyötä.</p>	
Avainsanat	Liimapuu, korjaus, hiilikuitu, injektointi

Author(s) Title	Ville Riikonen Repair Design and Repair Methods for Glued Laminated Timber
Number of Pages Date	64 pages + 6 appendices 6 April 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Jouni Kalliomäki, Lecturer Olli Saarinen, Technical Director
<p>The subject of this study was repairing methods for glued laminated timber structures and to clarify the planning process for repair operations. The study was limited to laminated timbers of uniform height that would, in normal use, have cracked badly enough to be in need of repairs. In addition to traditional repair methods, the possibility of utilizing carbon fiber injections was also examined.</p> <p>The aim of this study was to develop comprehensive guidelines for planning the repair of glued timber structures by studying the most common types of damages as well as the most common repair methods in use today.</p> <p>The most common causes of fissures in glued laminated timber structures were analyzed, as well as methods for minimizing and repairing such damages. The study was performed by examining previously published works on the matter as well as interviewing relevant professionals. Several empirical tests were also conducted: critically damaged timbers reinforced in different ways, were subjected to various forms of strain.</p> <p>It was discovered that each reinforcement method had both positive and negative attributes, including material expenses. The results of the different tests were inconclusive. This is mainly due to the limited number of samples. However, it was to some degree possible to evaluate the efficiency and practicality of different repair and reinforcement methods.</p> <p>A planning methodology was drafted to assist in selecting the appropriate repair methods and to speed up the planning process.</p>	
Keywords	Glued laminated timber, repairing, carbon fiber, injection

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Liimapuu	2
2.1	Liimapuu rakentamisessa	2
2.2	Liimapuun rakenne	2
2.3	Valmistusprosessi	3
2.4	Lujuusluokat	5
3	Laskennallinen tarkastelu	9
3.1	Leikkausvoima taivutetussa rakenteessa	9
3.2	Liimapuun leikkauslujuus	11
4	Liimapuurakenteiden vauriot	13
4.1	Tyypilliset vauriot	13
4.2	Halkeamat ja niiden aiheuttajat	13
4.3	Halkeamien hallinta	17
5	Korjausmenetelmät	19
5.1	Korjaustarpeen arviointi	19
5.2	Injektointi	20
5.3	Ruuvaus	20
5.4	Vinotangot	21
5.5	Vanerointi	21
6	Uudemmat koestettavat korjausmenetelmät	23
6.1	Hiilikuituvahvistus ja -laminointi	23
7	Kustannukset	23
8	Laboratorion koesarjat	25
8.1	Valmistelut ja koemenetelmät	25
8.1.1	Epoksi-injektointi	27
8.1.2	Polyuretaaniliimaus	30
8.1.3	Ruuvaus kohtisuoraan	31

8.1.4	Ruuvaus 45 asteen kulmassa	33
8.1.5	Vanerivahvistus	34
8.1.6	Hiilikuitukankaat	35
8.1.7	Hiilikuitulevyt	37
8.2	Laskelmat	40
9	Koestusten tulokset	42
9.1	Injektointi notkealla epoksilla	42
9.2	Hiilikuitulaminointi kolmelta sivulta	43
9.3	Korjaamaton palkki	45
9.4	Vanerointi	47
9.5	Polyuretaaniliimaus	48
9.6	Injektointi valumattomalla epoksilla	49
9.7	Ruuvaus 45 asteen kulmassa	50
9.8	Ruuvikiinnitteinen hiilikuitulevy	52
9.9	Liimattu hiilikuitulevy	53
9.10	Hiilikuitulaminointi palkin ympäri	55
9.11	Ruuvaus 90 asteen kulmassa	56
9.12	Alkuperäinen ehjä palkki	57
10	Tulosten analyysi	60
11	Yhteenveto	61
	Lähteet	63
	Liitteet	
	Liite 1. Koesarjan liimapuupalkin valinta	
	Liite 2. Injektoidun liimapuupalkin kestävyys	
	Liite 3. Liimapuupalkin vahvistaminen vaneroimalla	
	Liite 4. Liimapuupalkin vahvistaminen ruuvaamalla	
	Liite 5. Arviot materiaalikuluista	
	Liite 6. Liimapuupalkkien koestusraportit	

1 Johdanto

Liimapuupalkkien käyttö on melko yleistä suurissa hallirakennuksissa materiaalin keveyden ja pitkien jänneväliden helpon toteuttamisen vuoksi. Sen käyttö rakentamisessa yleisyy jatkuvasti ja monet vanhemmat liimapuurakenteet tarvitsevat kunnostusta esimerkiksi luonnollisen kosteuselämisen aiheuttamien halkeamien takia. Useimmat suunnittelijat eivät tunne liimapuupalkkien erilaisia korjausmenetelmiä ja niiden kohdekohtaisia valintaperusteita kovinkaan laajalti. Tämä saattaa hankaloittaa ja hidastaa suunnittelutyötä, sekä johtaa korjausratkaisuihin jotka eivät ole kohteelle parhaita mahdollisia.

Tutkimus tehdään A-Insinöörit Suunnittelu Oy:lle, joka on kasvava, kotimainen ja kansainvälisesti toimiva yritys. A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n toimialoihin kuuluvat esimerkiksi asuin- ja teollisuusrakennusten rakennesuunnittelu, akustiikkasuunnittelu, sekä geosuunnittelu.

Tutkimuksen tavoitteena on kartoittaa käytössä olevia korjausmenetelmiä ja kokeilla uusia menetelmiä, joita ei puurakentamisessa vielä kovin laajalti tunneta. Tutkimustulosten avulla kootaan A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n käyttöön suunnitteluohje, joka auttaa suunnittelijoita alustavasti valitsemaan korjausmenetelmän kohteen erityispiirteiden perusteella, sekä havainnollistaa kunkin tapauksen suunnittelussa huomioon otettavia seikkoja.

Korjausmenetelmiä tutkitaan kirjallisten lähteiden perusteella, sekä haastattelemalla puurakenteiden parissa työskenteleviä suunnittelijoita. Tutkimuksen käytännön osuus rajataan tasakorkeiden liimapuupalkkien leikkausmurtoa vastaan tehtävien vahvistus- ja korjausmenetelmien laskentaan, niiden konkreettiseen toteutukseen, sekä lopulta palkkien koestukseen ja tulosten analyysiin.

2 Liimapuu

2.1 Liimapuu rakentamisessa

Liimapuu on jalostettu puurakenne, jonka ominaisuuksia on paranneltu tavalliseen sahatavaraan nähden muun muassa sormijatkoksia ja yhteen liimattujen lamellien avulla. Liimapuu on painoonsa nähden vahvimpia rakennusaineita ja sen valmistaminen on erittäin energiatehokasta muihin rakennusmateriaaleihin verrattuna. [1.]

Liimapuun käyttö on suositeltavaa useastakin syystä. Puu itsessään miellyttää usein ihmisiä luonnonläheisyydellään, tuoksullaan ja ulkonäöllään, mutta liimapuu on myös teknisesti erittäin pätevä rakennusmateriaali. Liimaustekniikan ansiosta siihen tarvitaan merkittävästi vähemmän puuta, kuin yhtä vahvaan sahatavaraan ja sormijatkoksilla saavutetaan hyvinkin pitkiä jännevälejä rakenteissa. Liimapuurakenteet pitävät muotonsa koko niiden käyttöajan ajan ja ne säilyttävät kantavuutensa palotilanteessa monia muita rakennusmateriaaleja paremmin. [1.]

Hyvin huollettuna ja asianmukaisesti suunniteltuna liimapuu on pitkäikäinen rakennusmateriaali, johon tehtävät korjaukset ja ulkoiset ehostukset on lähtökohtaisesti helppo toteuttaa. Lisäksi suomalaisten mieltymys pientaloasumiseen kasvattaa yleisesti puurakenteiden suosiota.

2.2 Liimapuun rakenne

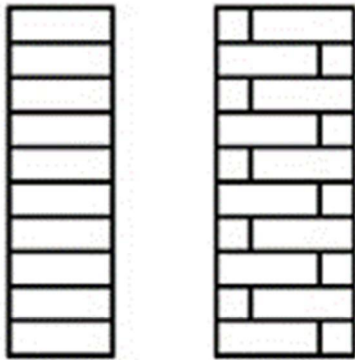
Liimapuu valmistetaan kahdesta tai useammasta yhdensuuntaisesta lamellista, jotka on liimattu yhdeksi rakenteeksi. Yhdessä pituussuuntaisessa lamellissa voi olla myös kaksi vierekkäistä lamellia kuvan 1 mukaisesti. Normaalisti pituussuuntaisten lamellien paksuus on 6...45 mm. [4.]

Liimapuun valmistuksessa käytetään vain suuren lujuuden omaavia liimoja joiden kestävyys on erityisen hyvä pitkäaikaisesti kuormitettuna. Liimat jaetaan standardin EN 14080 ja sen viitestandardin EN 301 mukaisesti kahteen ryhmään, liimatyyppeihin I ja liimatyyppeihin II. Edellä mainituille vaihtoehdona on myös EN 15425 vaatimusten mukainen yksikomponenttinen polyuretaaniliima. [1.]

Liimapuu valmistetaan Pohjoismaissa pääasiassa kuusesta, mutta myös mäntyä ja lehtikuusta käytetään. Kuusen oksat ovat yleensä melko pieniä, eikä niiden ympärillä esiinny pihkajuovaa kuten männyllä. Kaikkien puulajien oksakokoa rajoittaa lujuuslajittelu vaikka lujassakin puussa voi olla suuria oksia. Käsittelemätön liimapuu ei sovellu käytettäväksi ulkoilmassa säärasituksille alttiina. Lamellien puuaines lahoaa pitkäaikaisessa kosteusrasituksessa, vaikka liimaukseen käytetty liima kestäisikin sään vaikutukset. [1.]

2.3 Valmistusprosessi

Liimapuuta valmistetaan lähes poikkeuksetta samalla tavalla maasta tai tehtaasta riippumatta. Yleensä liimapuu valmistetaan kuivatusta ja lujuuslajitellusta kuusisahatavarasta. Paineekyllästetty mänty soveltuu tilanteisiin, joissa valmis tuote joutuu kosteisiin olosuhteisiin. Vierekkäin olevien lamellien kosteussuhteiden erotuksen ei tulisi ylittää 5 %, jotta saadaan paras mahdollinen liimasauman lujuus ja sopiva kosteussuhde lopputuotteelle, sekä vältetään selvästi haitallinen halkeilu ja pienennetään vääntymisriskiä. [2.]

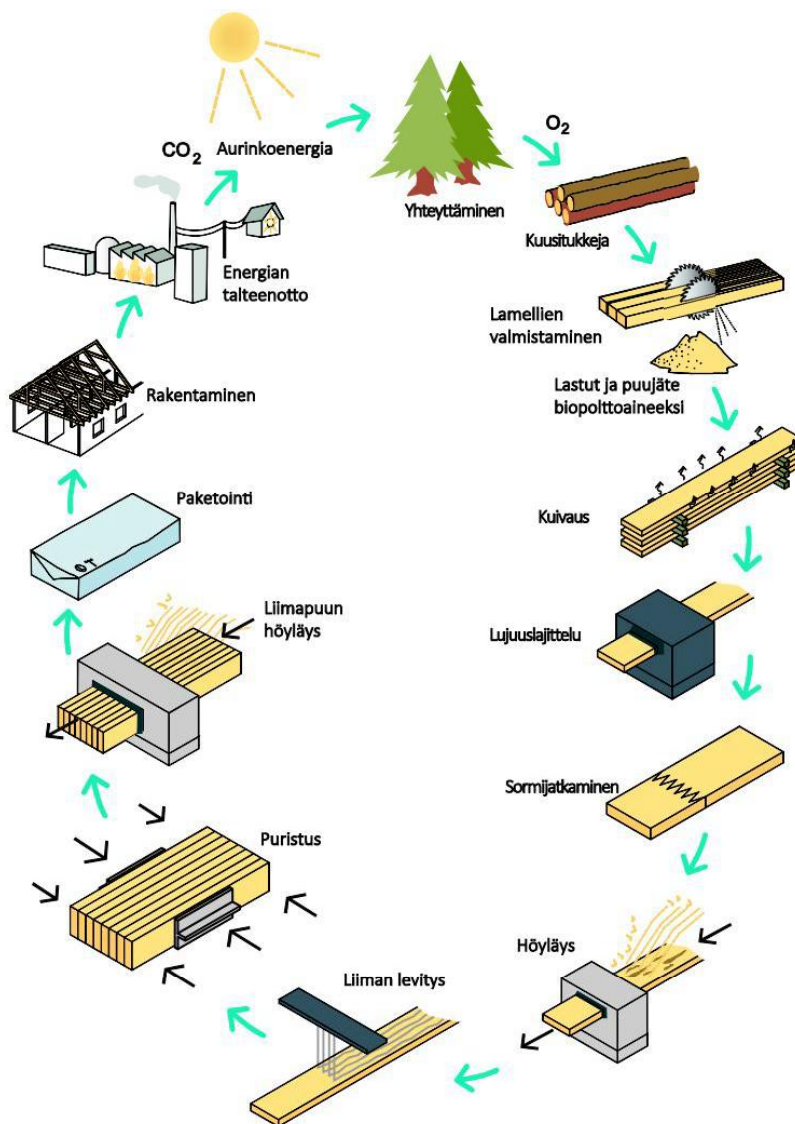


Kuva 1. Liimapuun rakenne. [4.]

Joissakin tapauksissa liimapuusta voidaan tehdä homogeenista, jolloin kaikkien käytettyjen lamellien lujuusluokitus on sama. Tyypillisesti poikkileikkauksen uloimmille lamelleille tulee suurin jännitys, minkä vuoksi ne valmistetaan suurempaan lujuusluokkaan kuuluvasta sahatavarasta. Näin valmistettua tuotetta kutsutaan

yhdistetyksi liimapuuksi. Yhdistettyä liimapuuta valmistettaessa on kuitenkin huomioitava varastointimahdollisuus vähintään kahden eri lujuusluokan lamelleille. [2.]

Liimapuun valmistus aloitetaan tekemällä sahatavarasta pitkiä lamelleja (30...40 m) sormijatkoksilla, minkä jälkeen ne katkaistaan sopivaan mittaan ja kootaan pinoksi. Sormijatkoksiin käytetty liimatyyppejä määrää kuivumisajan ennen lamellien lapepintojen höyläystä ja liimoitusta. Yleensä sormijatkosten liimauksen kuivumisaika on muutamia tunteja. Kun lamellit on liimoitettu, ne täytyy nostaa puristimeen noin tunnin kuluessa ennen kuin liima alkaa kovettua. Puristimet voidaan asettaa myös niin, että lamellit taivutetaan puristuksen yhteydessä. Näin saadaan valmistettua kaarevia tai esikorotettuja muotoja. [2.]



Kuva 2. Liimapuun elinkaari. [2.]

Puristuspaine poistetaan liiman kuivuttua ja valmistetut osat siirretään höylättäväksi ja viimeistellään toivottuun laatuluokkaan kuuluviksi. Viimeisenä valmistusvaiheena ennen rakennusosien paketointia tehdään suunnitelmien mukaiset poraukset, mahdolliset reunojen sahaukset, sekä pintakäsittely. [2.]

2.4 Lujuusluokat

Kun liimapuu valmistetaan standardin EN 14080 mukaisesti, voidaan lujuusluokka määrittää useammilla eri tavoilla:

- laskennallisesti (lujuus määräytyy lamellien lujuudesta)
- koekuormitusten avulla
- standardin EN 14080 mukaisen luokittelumenettelyn avulla.

Taulukko 1. Yhdistetyn liimapuun ominaislujuudet ja -jäykkyydet, sekä tiheydet. [2.]

Ominaisuus ^a	Merkintä	Liimapuun lujuusluokka						
		GL20c	GL22c	GL24c	GL26c	GL28c	GL30c	GL32c
Taivutuslujuus	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Vetolujuus	$f_{t,0,g,k}$	15	16	17	19	19,5	19,5	19,5
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Puristuslujuus	$f_{c,0,g,k}$	18,5	20	21,5	23,5	24	24,5	24,5
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Leikkauslujuus	$f_{v,g,k}$	3,5						
	$f_{r,g,k}$	1,2						
Kimmokerroin	$E_{0,g,mean}$	10400	10400	11000	12000	12500	13000	13500
	$E_{0,g,05}$	8600	8600	9100	10000	10400	10800	11200
	$E_{90,g,mean}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
Liukukerroin	$G_{g,mean}$	650						
	$G_{g,05}$	542						
	$G_{r,g,mean}$	65						
	$G_{r,g,05}$	54						
Tiheys ^b	$\rho_{g,k}$	355	355	365	385	390	390	400
	$\rho_{g,mean}$	390	390	400	420	420	430	440

^a Taulukon ominaisuudet on laskettu standardin kohdan 5.1.5 mukaisesti sen taulukon 2 mukaisille rakenteille. Jos samaan lujuusluokkaan johtaville erilaisille rakenteille saadaan eri arvot, niin on annettu pienin arvo.

^b Laskettu eri lamellivyöhykkeiden tiheyksien keskiarvona, katso standardin kohta 5.1.5.3 kappale 5.

Tavallisesti liimapuun lujuuden määrittävät käytetyn sahatavaran lujuus, liimapuun poikileikkauksen koostumus, sekä sormijatkosten lujuus. Edellä mainittu standardi EN 14080 määrittelee lujuusluokat taulukoiden mukaan. Tarvittaessa valmistaja voi kuitenkin osoittaa laskennallisen menetelmän tai koekuormituksen avulla oman lujuusluokansa esimerkiksi rakenteiden optimoinnin tai saatavilla olevan sahatavaran vuoksi.

Homogeenisen liimapuun taivutuslujuus voidaan laskea seuraavilla kaavoilla:

Taivutuslujuuden ominaisarvo:

$$f_{m,g,k} = -2,2 + 2,5f_{t,0,l,k}^{0,75} + 1,5 \left(\frac{f_{m,j,k}}{1,4} - f_{t,0,l,k} + 6 \right)^{0,65} \quad (1)$$

Yhtälöä voi kuitenkin käyttää vain, jos lamellien sormijatkosten ominaislujuus lapetaivutuksessa on:

$$1,4f_{t,0,l,k} \leq f_{m,j,k} \leq 1,4f_{t,0,l,k} + 12 \quad (2)$$

Yhtälöä käytetään myös jatkamattomista lamelleista tehdyn liimapuun lujuudelle, jolloin:

$$f_{m,j,k} = 1,4f_{t,0,l,k} + 12 \quad (3)$$

Taulukko 2. Homogeenisen liimapuun ominaislujuudet ja -jäykkyydet, sekä tiheydet. [2.]

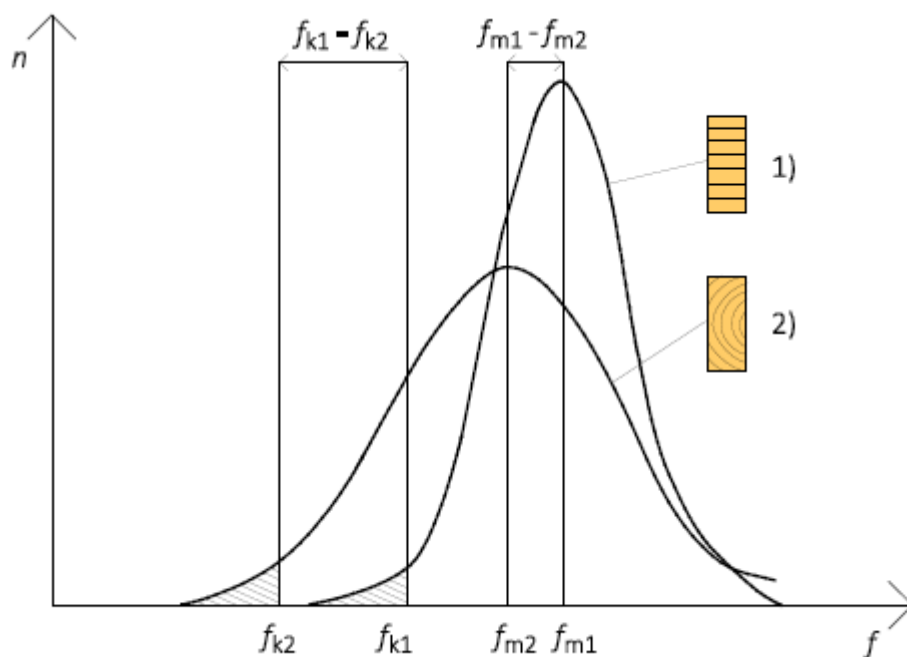
Ominaisuus	Merkintä	Liimapuun lujuusluokka						
		GL20h	GL22h	GL24h	GL26h	GL28h	GL30h	GL32h
Taivutuslujuus	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Vetolujuus	$f_{t,0,g,k}$	16	17,6	19,2	20,8	22,3	24	25,6
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Puristuslujuus	$f_{c,0,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Leikkauslujuus	$f_{v,g,k}$	3,5						
	$f_{r,g,k}$	1,2						
Kimmokerroin	$E_{0,g,mean}$	8400	10500	11500	12100	12600	13600	14200
	$E_{0,g,05}$	7000	8800	9600	10100	10500	11300	11800
	$E_{90,g,mean}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
Liukukerroin	$G_{g,mean}$	650						
	$G_{g,05}$	540						
	$G_{r,g,mean}$	65						
	$G_{r,g,05}$	54						
Tiheys	$\rho_{g,k}$	340	370	385	405	425	430	440
	$\rho_{g,mean}$	370	410	420	445	460	480	490

Liimapuun ja perinteisen sahatavaran lujuuksilla on huomattavan paljon samoja piirteitä:

- Lujuuteen vaikuttaa syiden suunnan suhde jännityksen vaikutussuuntaan (anisotropia)
- Kosteussuhteen kasvaessa lujuus pienenee
- Kuormitusajan kasvaessa lujuus pienenee

- Lujuudessa on vaihteluita rakenneosien välillä ja yksittäisen rakenneosan eri kohdissa.

Liimapuisen rakenneosan etuna perinteiseen sahatavaraan on keskimäärin suurempi lujuus ja lujuuden pienempi hajonta. Suurin lujuus määritetään aina rakennesahatavaran heikoimman poikkileikkauksen mukaan. Yleensä heikoin poikkileikkaus osuu oksan tai sormijatkoksen kohdalle, mutta lamelleista kootussa liimapuurakenteessa on erittäin harvinaista, että useiden lamellien heikoin kohta osuisi samaan kohtaan koko poikkileikkauksen suhteen. Kyseistä poikkileikkauksen lujuutta parantavaa ominaisuutta sanotaan lamellivaikutukseksi. [2.]

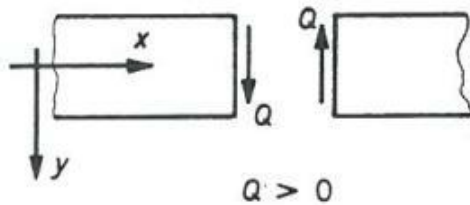


Kuva 3. Liimapuun ja sahatavaran keskimääräinen lujuus ja lujuuden hajonta. [1.]

3 Laskennallinen tarkastelu

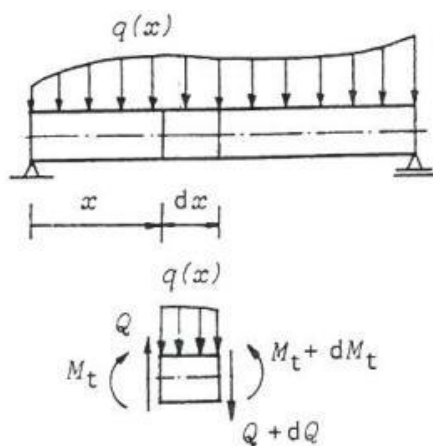
3.1 Leikkausvoima taivutetussa rakenteessa

Rakennetta taivutettaessa siihen syntyy aina myös leikkausvoimaa. Leikkausvoima on rakenteen poikkileikkauksessa syntyvän leikkausjännityskentän resultantti. Se on arvoltaan positiivinen, jos se on y-akselin suhteen positiiviseen suuntaan poikkileikkauspinnassa, jonka materiaalista poispäin suunnattu normaali on positiiviseen suuntaan x-akselilla, tai jos se on y-akselin suhteen negatiiviseen suuntaan poikkileikkauspinnassa, jonka materiaalista poispäin suunnattu normaali on negatiiviseen suuntaan x-akselilla. [5.]



Kuva 4. Positiivinen leikkausvoima. [5.]

Kun kuvassa 5 esitetyn palkin kohdasta x leikataan differentiaalinen elementti, jonka pituus on dx , saadaan elementin tasapainoyhtälöistä:



Kuva 5. Palkin differentiaalelementti. [5.]

$$+Q - (Q + dQ) - q(x)dx = 0 \quad (4)$$

$$-M_t + (M_t + dM_t) - Qdx = 0 \quad (5)$$

Yhtälöistä voidaan ratkaista yhteydet:

$$\frac{dQ}{dx} = -q(x) \quad (6)$$

$$\frac{dM_t}{dx} = Q(x) \quad (7)$$

$$\frac{d^2M_t}{dx^2} = -q(x) \quad (8)$$

Differentiaaliyhtälöistä voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset:

- Leikkausvoimajakauman kulmakerroin on sama kuin kuormitusiheyden negatiivinen arvo kyseisessä pisteessä
- Momenttijakauman kulmakerroin on sama kuin leikkausvoima kyseisessä pisteessä.
- Momentin ääriarvot ovat pisteissä, joissa leikkausvoima vaihtaa merkkiä.

Taivutetun rakenteen leikkausjännitys lasketaan kaavasta

$$\sigma_v = \frac{V_d * S}{I * b} \quad (9)$$

missä,

V_d = tarkasteltavassa poikkileikkauksessa oleva leikkausvoima

b = tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys

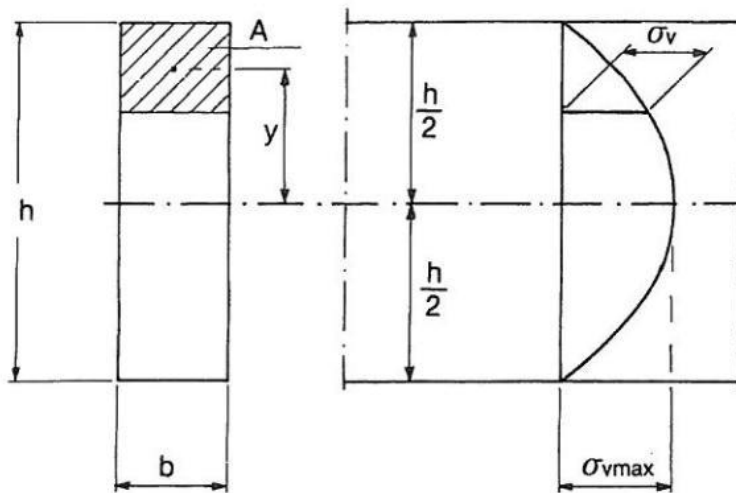
S = tarkasteltavan kohdan staattinen momentti neutraaliakselin suhteen.

I = poikkileikkauksen jäyhyysmomentti

Suorakaidepoikkileikkaukselle pätee kuvan 6 merkintöjen mukaisesti:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (10)$$

$$S = A * y \quad (11)$$



Kuva 6. Leikkausjännityksen jakautuminen suorakaidepoikkileikkauksessa. [6.]

Leikkausjännityksen arvo on suurimmillaan painopisteakselilla, jolloin

$$S = S_{max} = \frac{h}{2} * b * \frac{h}{4} \quad (12)$$

$$\sigma_{vmax} = \frac{3}{2} * \frac{V_d}{bh} \quad (13)$$

3.2 Liimapuun leikkauslujuus

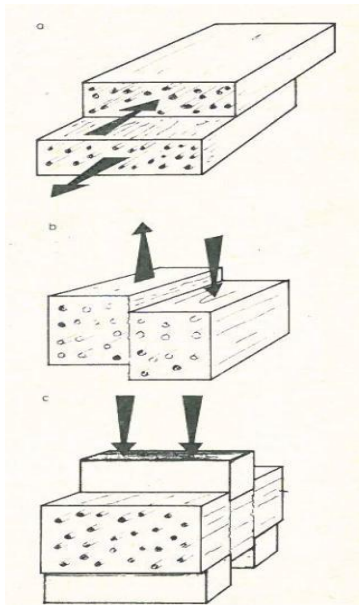
Perinteisen puun leikkauslujuus riippuu suuresti leikkautuvan tason suunnasta puun syiden pituussuuntaan nähden. Liimapuussa erilaisia leikkautumistapoja on kolme. Pituussuuntaisessa leikkauksessa leikkaustaso ja voima ovat syiden pituussuunnassa. Tällöin syyt pyrkivät liukumaan pituussuunnassa toisiinsa nähden. Leikkaustason ollessa syiden

suunnassa ja voiman kohtisuora syiden suuntaan, on kyseessä vierintäleikkaus, jossa syyt pyrkivät liukumaan toistensa suhteen poikittaissuunnassa. Kolmas leikkaustapaus on poikkisuuntainen leikkaus, jossa sekä leikkaustaso että voima ovat syiden pituussuuntaan kohtisuorassa. Poikkisuuntaisessa leikkauksessa syyt pyrkivät leikkautumaan poikki. [8.]

Taivutetun liimapuupalkin pituussuuntainen leikkauslujuus on $3...7 \text{ N/mm}^2$. Sen sijaan poikkisuuntainen leikkauslujuus on samaa suuruusluokkaa puristuslujuuden kanssa, eli huomattavasti pituussuuntaa korkeampi. Anisotrooppisuuden vuoksi tällä ei kuitenkaan ole käytännön merkitystä, sillä palkki leikkaantuu joka tapauksessa heikommassa, eli puun syiden pituussuunnassa leikkausjännityksen parittaisuuden vuoksi. [8.]

Vierintäleikkauslujuus on suuruusluokaltaan $1,5...3,0 \text{ N/mm}^2$ ja sen huomioiminen voi tulla kysymykseen esimerkiksi tilanteessa, jossa palkin laippaa kuormitetaan y-akselin suunnassa. [8.]

Kosteuden vaikutus leikkauslujuuteen on melko vähäinen, mutta leikkauslujuus on herkkä puun sisäisille vioille kuten halkeamille, joiden kokoon ja sitä kautta leikkauskestävyyteen vaikuttaa erityisesti rakenteen hetkellinen kosteus, mutta myös koko sen kosteushistoria. [8.]



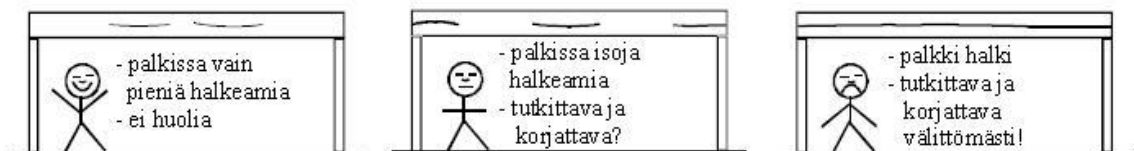
Kuva 7. Ylhäältä alas järjestyksessä: Pituussuuntainen leikkaus, vierintäleikkaus ja poikkisuuntainen leikkaus. [8.]

4 Liimapuurakenteiden vauriot

4.1 Tyypilliset vauriot

Puuta ja terästä verrataan suunnittelun kannalta usein toisiinsa, sillä molempien suunnittelusta suurin osa on liitosten suunnittelua. Teräsrakenteet ovat herkkiä lämpölaajenemiselle, kun taas puun muodonmuutokset syntyvät kosteuden vaihteluista. Erityisen suurta huomiota puun suunnittelussa on kiinnitettävä suuriin puurakenteisiin, joissa puun lujuusopillinen ortotrooppisuus korostuu. Tällä tarkoitetaan sitä, että puun lujuus- ja kimmo-ominaisuudet poikkeavat toisistaan syiden suunnassa ja syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. [9.]

Liimapuurakenteiden tyypillisimmät vauriot ovat halkeamia, joita syntyy esimerkiksi kosteusvaihteluiden aiheuttamien muodonmuutosten vuoksi. Kun halkeamat ovat alle 10 mm syviä, on kyse vain esteettisistä haitoista, eikä niillä ole vaikutusta rakenteen kantavuuteen. Suunnittelussa tulee huomioida halkeamien syntymiseen vaikuttavat ominaisuudet ja tekijät. Halkeamia on rajoitettava ainakin niin, ettei niistä ole vaaraa rakenteen kantavuudelle tai muulle toimivuudelle. Vaikka halkeamat olisivatkin vain esteettisiä haittoja on suunnittelijan syytä muistaa, ettei näkyvillä oleva halkeillut rakenne herätä luottamusta tavallisen tilankäyttäjän silmissä, huolimatta sen hyvästä rakenteellisesta toiminnasta. [11.]



Kuva 8. Halkeamien ulkoinen havainnointi. [11.]

4.2 Halkeamat ja niiden aiheuttajat

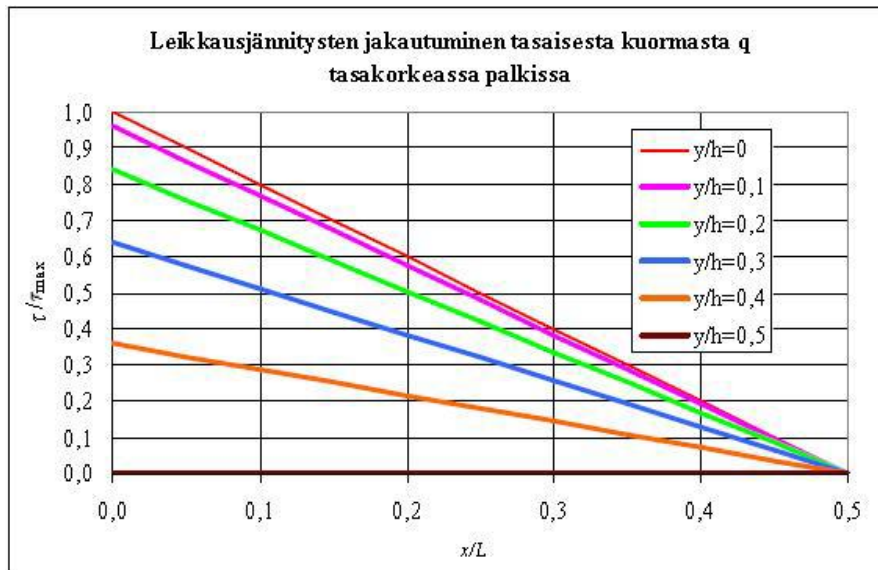
Liimapuurakenteiden halkeamisen yleisimpiä syitä on neljä kappaletta ja ne voivat aiheuttaa halkeamia joko itsessään tai yhteisvaikutuksesta. Yleisimmät syyt ovat:

- materiaali- ja valmistusvirheet,

- liian suuret leikkausrasitukset,
- vetorasituksen ylittyminen syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa ja
- puun kuivuminen.

Materiaali- ja valmistusvirheistä tavallisin on liimausvirhe, jonka aiheuttama halkeama esiintyy palkissa liimasauman kohdalla ja on lähes suora. Rakenteellisesti tilanne on vaarallisin, kun halkeama on saumassa palkin molemmilla puolilla. Liimausvirheet ovat kuitenkin hyvin harvinaisia ja halkeaman ollessa jossakin muussa kohdassa kuin lamellien saumassa, kyseessä harvemmin on liimausvirhe. [11.]

Kun palkin lappeessa esiintyy palkin pituussuuntainen halkeama, on yleensä kyse leikkausrasituksen ylittymisestä. Leikkausrasitus kuitenkin huomioidaan palkin mitoituksessa niin tarkasti, ettei sen tapahtuminen yksinään ole käytännössä mahdollista, vaan se edellyttää myös joko kuivumishalkeamia tai epäonnistunutta liimausta. Leikkausrasitusten suurimmat arvot ovat rakenteessa pienellä alueella ja ne pienenevät nopeasti palkin pituus- tai korkeussuuntaan siirryttäessä. Alla olevassa kuviossa 1 on esitetty jännitysten jakautuminen tasakorkeassa palkissa normeerattuna niin, että tuen lähellä oleva suurin arvo on 1. Palkin leikkausmurtoriskiä voidaan arvioida, kun halkeaman paikka ja syvyys tunnetaan. Tarkastellaan esimerkiksi 600 mm korkeaa palkkia joka on jänneväliltään 3000 mm. Jännitystä tarkastellaan 900 mm päässä tuelta ($x/L=0,2$) ja 240 mm korkeudella palkin alapinnasta ($y/h=0,2$), saadaan leikkausjännityksen suhteelliseksi jakautumaksi noin 0,5. [11.]

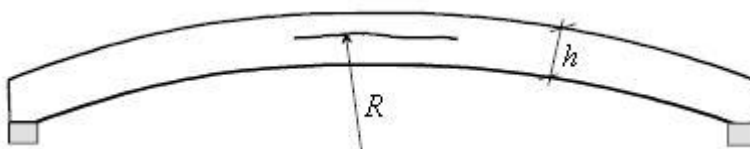


Kuvio 1. Leikkausjännitysten suhteellinen jakautuma tasakorkeassa palkissa. [11.]

Syitä vastaan kohtisuora vetolujuus puulla on pieni ja tästä syystä vetorasitukset ovat puurakenteille erittäin haitallisia. Vetorasituksia syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa syntyy esimerkiksi, kun

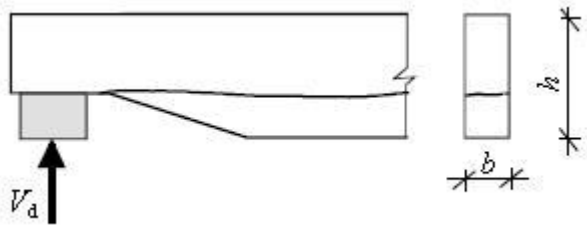
- taivutusmomentti pyrkii oikaisemaan kaartaa, tai kaarevaa palkkia,
- suuren leikkausvoiman alueelle tehdään loveus (esimerkiksi tuen reunalle) ja
- palkkiin tulee kuorman puoleisesta reunasta ripustettuja ripustuskuormia.

Tasakorkean kaarevan palkin jolla on tasainen kuormitus päällä, mitoittaa syitä vastaan kohtisuora vetojännitys ennen taivutusmomenttia. Voimassa on kuitenkin oltava ehto, jonka mukaan palkin kaarevuussäteen R ja korkeuden h suhde on pienempi kuin 16. [11.]



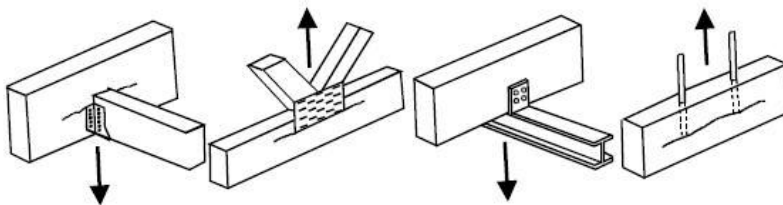
Kuva 9. Tasakorkean kaarevan palkin halkeaminen [11.]

Tuelta lovetun palkin leikkausmitoituksessa huomioidaan yksinkertaistuksen vuoksi poikkileikkaus, josta on vähennetty loveuksen osuus. Pienennetylle poikkileikkaukselle tulevaa leikkausjännitystä verrataan pienennettyyn leikkauslujuuteen, johon vaikuttavat loveuksen muoto ja koko. [11.]



Kuva 10. Tuelta lovetun palkin halkeaminen [11.]

Tyypillisesti ripustuskuormia syntyy esimerkiksi liitoksista, joissa sekundääripalkit ripustetaan primääripalkkien kylkiin. Puun pienen vetolujuuden lisäksi halkeamien syntyminen ripustuskuormista kasvaa huomattavasti, jos rakenne pääsee kuivumaan huomattavan nopeasti. [11.]



Kuva 11. Ripustuskuormista aiheutuva halkeaminen. [11.]

Palkin kuivuminen ja kutistuminen lisäävät halkeiluvaaraa huomattavasti kostumista ja paisumista enemmän. Mikäli kosteuselämisen aiheuttamat muodonmuutokset on kokonaan tai osittain estetty, ne aiheuttavat rakenteeseen syitä vastaan kohtisuoria vetorasi-tuksia. [11.]

Liimapuu asettuu 10-12 % valmistuskosteuteensa kun se saa olla riittävän pitkään ti-lassa, jossa ilman suhteellinen kosteus on 50-60 % RH. Liimapuun halkeilulle otollisin ja samalla rakenteelle vaarallisin ajanjakso on ensimmäinen kuivumisjakso asennuksen

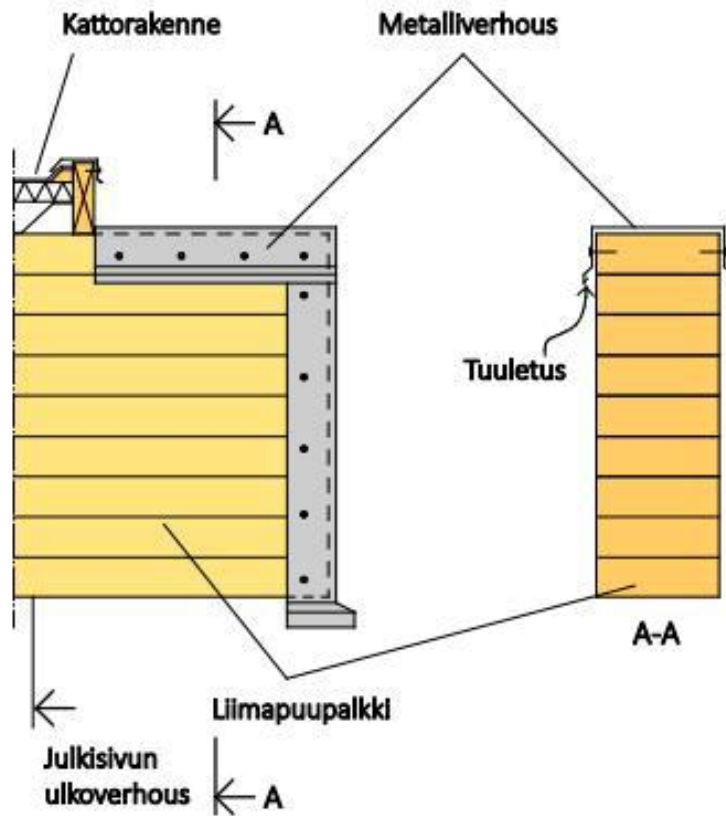
jälkeen, jolloin liimapuu alkaa kuivua valmistuskosteudesta tai asennuksen aikaisesta kosteudesta. [11.]

4.3 Halkeamien hallinta

Suuret halkeamat edesauttavat veden tunkeutumista liimapuun sisäosiin ja siten edistävät lahon kehittymistä. Lahovaurioita syntyy helpoimmin vaakasuorille pinnoille joille vesi voi jäädä seisomaan. Veden seisomista voidaan ehkäistä rakentamalla pinnat kalteviksi tai suojaamalla rakenteellisesti suoralta sadevedeltä. [1.]

Osien muotoilu ja tekniset ratkaisut ovat parhaita keinoja pitkäaikaisen kostumisen minimoimiseksi, mutta yhtä lailla ympäröivät rakenteet ja talotekniikan sijoittelu ovat olennaisia tekijöitä. Paikallisen kuivumisen ja siitä seuraavan halkeilun voivat aiheuttaa esimerkiksi lämpöputkien tai puhaltimien sijaitseminen liian lähellä liimapuurakenteita. [1.]

Nopeat kosteusvaihtelut ovat liimapuulle hyvin haitallisia, mutta niitä voidaan välttää pintakäsittelyn tai kosteudelta suojaavalla verhouksella. Liimapuisen rakennusosan pääty- ja yläpinnat jotka sijaitsevat ulkotilassa on yleensä suojattava tuuletetulla verhouksella joista yleisimmin käytetään pellitystä ja puuverhouksia. Mikäli perinteisiä suojausmenetelmiä ei voida soveltaa, tulee säälle alttiit pinnat käsitellä säännöllisesti kosteussuoja-aineella joita ovat esimerkiksi tunkeutuva pohjuste tai tehonsa puolesta vastaavanlainen puunsuoja-aine. Erityistä tarkkuutta on syytä kiinnittää nimenomaan päätypuuhun, joka imee vettä lähes 20 kertaa muita pintoja nopeammin. [1.]



Kuva 12. Julkisivun ulkopuolelle tulevan liimapuupalkin pään suojaus. [2.]

5 Korjausmenetelmät

5.1 Korjaustarpeen arviointi

Rakenteiden korjaaminen on aina tarpeen, jos on syytä epäillä että halkeilu aiheuttaa rakenteellisia riskejä. Rakenteellista riskiä arvioitaessa huomioidaan vaurioituneeseen kohtaan kohdistuvat rasitukset, sekä vaurioitumisen laajuus ja suuruus. [11.]

Vaurioituneella alueella vaikuttavat rasitukset lasketaan rakenteeseen kohdistuvista todellisista kuormista, kuitenkin niin, että käytetään viranomaismääräysten asettamia vähimmäiskuormia. Tärkeimmät tutkittavat rasitukset ovat syitä vastaan kohtisuorat veto-rasitukset, sekä leikkausrasitukset. [11.]

Vaurioitumisen suuruus tarkoittaa halkeamien tapauksessa niiden pituutta, syvyyttä ja paikkaa. Halkeamat tarkistetaan aina molemmilta puolilta rakennetta ja kohdakkain olevien halkeamien syvyys on niiden summa. Halkeamien todellisen syvyyden arviointi on käytännön tasolla mahdotonta, mutta niiden vähimmäissyvyys voidaan mitata esimerkiksi rakotulkillä. Saatu vähimmäissyvyys on syytä kertoa ”varmuuskertoimella” joka voi olla esimerkiksi 1,5, ellei ole syytä päätyä käyttämään jotakin muuta arvoa. [11.]



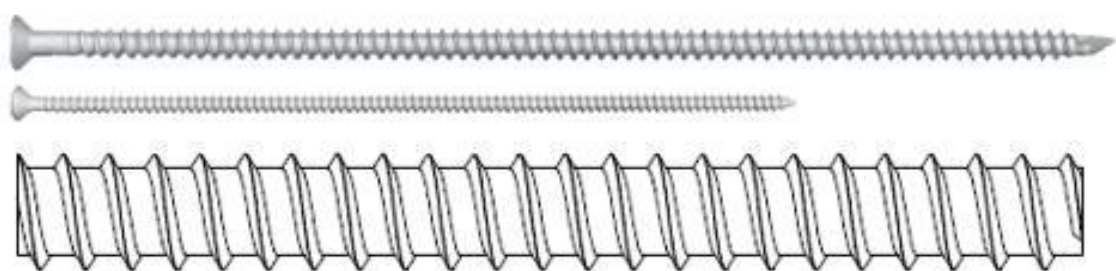
Kuva 13. Liimapuupalkin halkeaman mittaamista rakotulkillä. [14.]

5.2 Injektointi

Injektoinnissa liimapuun halkeamat täytetään epoksiliimalla tilaajan hyväksymän injektointisuunnitelman mukaisesti. Injektointi soveltuu hyvin tukien läheisyydessä suuria leikkausvoimia vastaanottaville irronneille liimasaumoille, sekä yli 0,5 mm leveille halkeamille. Näiden lisäksi aukoissa palkin korkeuden alimmassa kolmanneksessa sijaitsevat irronneet liimasaumat ja yli 1,0 mm leveät halkeamat, joiden pituus ylittää palkin jännemitan viidesosan ovat hyviä injektoimalla korjattavia kohteita. Injektointityöntekijän on osoitettava ammattitaitonsa tilaajan hyväksymällä työnäytteellä tai ammattipassilla, sillä injektointityön onnistuminen edellyttää tarkkuutta ja erityistä ammattitaitoa. [13.]

5.3 Ruuvaus

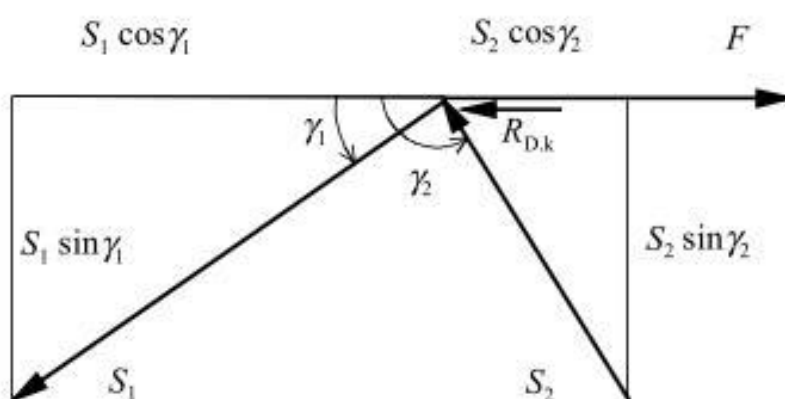
Ruuvausta käytetään usein puurakenteiden liitoksiin ja lovettujen palkkien vahvistamiseen tuen reunalla, mutta menetelmä sopii myös halkeilleen liimapuupalkin korjaamiseen. Ruuvaamiseen voidaan käyttää kierteellistä tankoa, joka voidaan katkaista aina sopivan mittaiseksi. Tämä kuitenkin edellyttää esiporausta, jolta vältetään käyttämällä niin kutsuttuja itseporautuvia, eli porakärjellä varustettuja ruuveja. Molemmat menetelmät ovat hyviä mataliin palkkeihin, mutta puun kosteuselämisen vuoksi erittäin pitkät ruuvit voivat halkaista rakenteen. Ruuvauskorjaukset tulee aina suorittaa tuotteen valmistajan ohjeistuksen mukaisesti ja työhön soveltuvin erikoistyökaluin.



Kuva 14. SFS Intecin tuotteita puurakenteiden vahvistamiseen ja liitosten tekemiseen. Ylempänä itseporautuvat WR-ruuvit ja alla kierteellinen tanko WB. [15.]

5.4 Vinotangot

Vinotangoilla tarkoitetaan yleensä vaurioituneelle alueelle esiporattuihin reikiin liimattuja teräksiä. Usein vinotankoliitos muodostuu vinosti toisiinsa nähden olevista harjateräksistä, jotka on kiinnitetty toisiinsa yhtenäiseksi osaksi. Vinotankoliitosten tarkemmat suunnitteluohjeet löytyvät puurakenteiden suunnitteluohjeista RIL-205-1-2009. Liitoksen teräsosat mitoitetaan suunnitteluohjeiden mukaisesti ja liitoksen valmistajalla on oltava todistukset, joilla se osoittaa oman osaamisensa valmistajana, sekä laitteistonsa sopivuuden. [11.]



Kuva 15. Vinotankojen toiminta [11.]

5.5 Vanerointi

Vaneroinnilla tarkoitetaan yleensä palkin vaurioalueiden vahvistamista palkin kylkeen liimaruuvatuilla vanerilevyillä. Naulat eivät sovellu käytettäväksi vaneroinnin yhteydessä, sillä ruuvien tehtävänä on aikaansaada liimauksen vaatima puristus. [11.]

Vaneroinnissa käytettävällä liimalla on oltava täyttöominaisuuksia, jotta pienet epätasaisuudet saadaan täytettyä. Hyviä vanerointiliimoja ovat esimerkiksi epoksiliimat, sekä polyuretaaniliimat, jotka on hyväksytty rakenteelliseen käyttöön. [11.]

Käytettävien ruuvien tulee olla itseporautuvia ja halkaisijaltaan 4,0...6,5 mm, sekä rakenteelliseen käyttöön hyväksyttyjä. Kannan puoleisen puun kohdalla ei saa olla kierrettä, vaan kierteen on ulotuttava kokonaisuudessaan kärjen puoleiseen puuhun. Jotta riittävä puristus liimaukselle saadaan aikaan, on ruvin kannan oltava riittävän leveä ja

sen on kiristettäessä upottava puuhun. Kannan läpivetolujuuden on kuitenkin oltava kärjen tartuntalujuutta pienempi. Ruuvaustiheyden määrää käytännössä liimauksen vaatima puristus osien välille. Ruuvivälinä käytetään normaalisti 7-kertaista liitettävän vanerin paksuutta. [11.]

Korjaustapausten ollessa aina yksilöllisiä, on kohteessa mahdollisuuksien mukaan hyvä tehdä ennakkokoe, jolla voidaan tarkistaa liimojen ja työtapojen soveltuvuus kyseiseen korjaukseen. Ennakkokokeessa vaneri poistetaan koekappaleesta liiman kovettumisen jälkeen. Mikäli murtuminen tapahtuu puusta, eikä liimasaumasta, on liimaus onnistunut ja menetelmät sopivia työn suorittamiseen. [11.]

6 Uudemmat koestettavat korjausmenetelmät

6.1 Hiilikuituvahvistus ja -laminointi

Hiilikuitua on tutkittu ja käytetty enimmäkseen betonirakenteiden vahvistamisessa, mutta se soveltuu myös teräs- ja puurakenteille. Hiilikuitu on materiaalina erittäin kevyttä suhteessa sen lujuuteen, mutta sen huono palonkestävyys on huomioitava vahvistusta suunniteltaessa. Hiilikuidun lujuusominaisuudet riippuvat käytetyn epoksin määrästä, kuitukerrosten suunnasta, sekä epoksin ja kuidun valmistustavoista. Tutkimuksessa käytettyjen hiilikuitunauhojen ja -levyjen vetolujuus oli noin 1000 MPa ja kimmokerroin 170-175 GPa. [12.]

Korjauskohteissa usein vallitseva ahtaus ei ole ongelma hiilikuitua käytettäessä, sillä hiilikuitukomposiitteja saa useissa eri muodoissa. Näin ollen esimerkiksi tukipilari voidaan vahvistaa taipuisalla kudoksella, jolloin pilarin nurjahtaminen estetään koteloinnin tavoin. Hiilikuituvahvistus tehdään yleensä puristusmenetelmällä, jossa hiilikuitunauha liimataan rakenteen pintaan vahvalla tiksotrooppisella epoksiliimalla. [12.]

7 Kustannukset

Liimapuupalkkien korjaamiseen liittyviä kustannuksia arvioitiin tässä tapauksessa ainoastaan materiaalimenekkien kannalta, sillä työlle oli hankala määritellä arvoa. Esimerkiksi ruuvivahvistustyö oli Tampereen Ammattikorkeakoulun opiskelijoiden tekemänä merkittävästi nopeampi menetelmä kuin hiilikuidulla laminointi. Uskoisin kuitenkin eron pienentyvän merkittävästi, kun laminoinnin suorittaa työhön erikoistunut ammattilainen, jolla on ammattitaidon lisäksi työn edellyttämät tarvikkeet ja laitteet.

Materiaalien hintaerot ovat huomattavia vahvistustavasta riippuen ja kuten liitteen 5 taulukoista voidaan nähdä, erityisesti hiilikuidun ja sen kiinnittämiseen käytettävien epoksiliimojen hinnat ovat korkeita verrattuna perinteisimpiin materiaaleihin. Pelkästään materiaalien hintojen perusteella voitaisiin todeta, ettei hiilikuituvahvistamisesta saada helposti taloudellista menetelmää. Hiilikuidun kestävyys on ehkä jopa turhankin suuri suhteessa vahvistettavaan materiaaliin, sillä puun murtumisen jälkeen hiilikuidun jäljellä olevasta kestävyydestä ei ole käytännössä mitään hyötyä. Hiilikuitu saattaa pitää rakenteen

kasassa niin, ettei henkilövahinkoja synny, mutta vetopinnalta murtunut leikkausvahvistettu palkki ei ole hyväksyttävä rakenne missään tapauksessa.

Polyuretaaniliimausta voidaan materiaalimenekkien kannalta pitää lähes ilmaisena korjausmenetelmänä, mutta sen pätevyys aidossa tilanteessa on hyvin kyseenalainen. Halkeamien täyttäminen ilman paineistamista on todellisuudessa hankalaa. Tämän lisäksi liimaan kannattaisi sekoittaa esimerkiksi pieniä puutikkuja tai kuituja lujuuden ja tartunnan parantamiseksi.

Pitkien ruuvien käyttäminen tämän työn koestusten mittakaavassa on vielä ymmärrettävää, vaikka materiaalikuluissa ollaan lähes hiilikuituvahvistusten hinnoissa. Suurten, jopa metrin pituisten ruuvien käyttäminen on halkeamariskien lisäksi melko kallista, sillä suuret ruuvit maksavat helposti 10-12 euroa kappaleelta ja niitä tarvitaan suuria määriä isoissa palkeissa. Tämän vuoksi on suositeltavaa pysyä pienemmissä ruuvivahvistuksissa kuten tuelta lovetujen palkkien vahvistamisessa, eikä lähteä korjaamaan pahoin särkynyttä rakennetta ruuveilla.

8 Laboratorion koesarjat

8.1 Valmistelut ja koemenetelmät

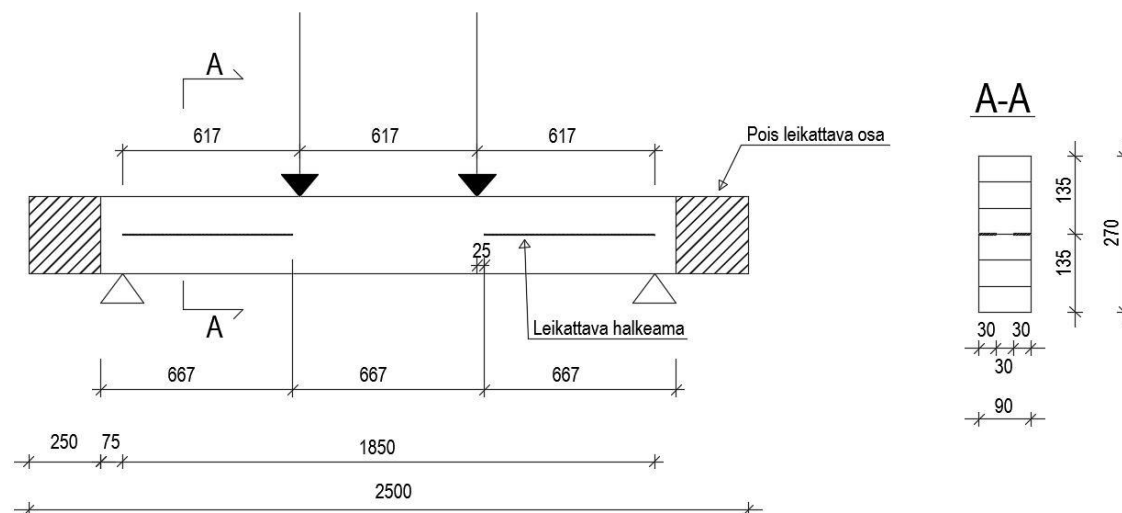
Erilaisten korjausmenetelmien onnistumista ja niillä saavutettavaa kestävyyttä selvitettiin kokeellisesti Tampereen Ammattikorkeakoulun laboratoriossa. Tutkimuksia varten hankittiin liimapuupalkkeja, joiden poikkileikkaus oli 90 mm x 270 mm ja ne katkaistiin työstöä varten 2,5 metrin pituuteen.



Kuva 16. Liimapuupalkit halkaistuna odottamassa korjausta.

Liimapuupalkkeja säilytettiin Tampereen Ammattikorkeakoulun laboratorioden puutavaravarastossa, missä kosteusolosuhteet pysyvät melko tasaisina. Näin pysyttiin myös käyttöluokka 1. määraamissa olosuhteissa, eikä kosteusvaihteluita tarvinnut huomioida palkkien käyttäytymisessä. Korjausmenetelmillä haluttiin tutkia erityisesti palkkien leikkauskestävyyden vahvistamista ja tämän vuoksi palkit halkaistiin vastaamaan tilannetta, jossa jonkin korjauksen tekeminen olisi välttämätöntä. Palkit halkaistiin sirkkelillä molemmilta puolilta poikkileikkauksen korkeuden puolivälistä 30 mm syvyyteen niin, että halkeama alkoi tuen sisäreunalta ja päättyi pituuden kolmannespisteeseen missä pistekuormat tulisivat vaikuttamaan. Halkeaman pää päätettiin kuitenkin siirtää tuen keskipisteelle, jolloin kolmannespisteisiin asetetut kuormat eivät enää osuneet täysin samaan

kohtaan halkeaman päädyn kanssa. Palkin halkeamisen oletettiin tapahtuvan lähempänä tukea, joten poikkeamalla ei uskottu olevan suurta merkitystä. Kuvassa 18 on esitetty periaatepiirros koestustilanteen palkeista.



Kuva 17. Koestettavien palkkien rakennemalli. Ei mittakaavaa.

Palkin leikkauskestävyyttä halkaisun jälkeen voidaan karkeasti arvioida toteamalla että palkin leikkauskapasiteetti on heikentynyt halkeaman kohdalla halkeaman syvyyden verran. Tässä tapauksessa palkista on halki 2/3-osaa, jolloin leikkauskapasiteetti olisi 33% alkuperäisestä. On kuitenkin huomioitava, että laskennassa käytetyt suunnitteluohjeiden arvot ovat hieman todellisuutta pienempiä, sillä ne huomioivat pienet leikkauslujuutta heikentävät halkeamat rakenteessa. [9.]

Liimapuupalkeille valittiin 10 tutkittavaa korjausmenetelmää, joista laskennallista tutkintaa tässä työssä tehtiin liimausten, kahden eri tyyppisen ruuvauksen, sekä vaneroinnin osalta ja muita korjausmenetelmiä arvioitiin niiden koestuskäyttämisen perusteella. Korjattujen palkkien lisäksi koestettiin täysin ehjä palkki, sekä vahvistamaton halkaistu palkki.

Varsinainen koestus liimapuupalkeille suoritettiin Tampereen Ammattikorkeakoulun laboratoriossa hydraulikalla toimivalla prässillä. Koestustilanteessa muodostettiin rakennemalli, jossa liimapuupalkki on yksiaukkoinen vapaasti tuettu rakenne. Palkin päissä tukileveys oli 150 mm ja tukien keskipisteiden välinen etäisyys 1850 mm. Palkkia kuormitettiin kahdella pistekuormalla jännevälän kolmannespisteistä ja etukäteen oli laskelmin

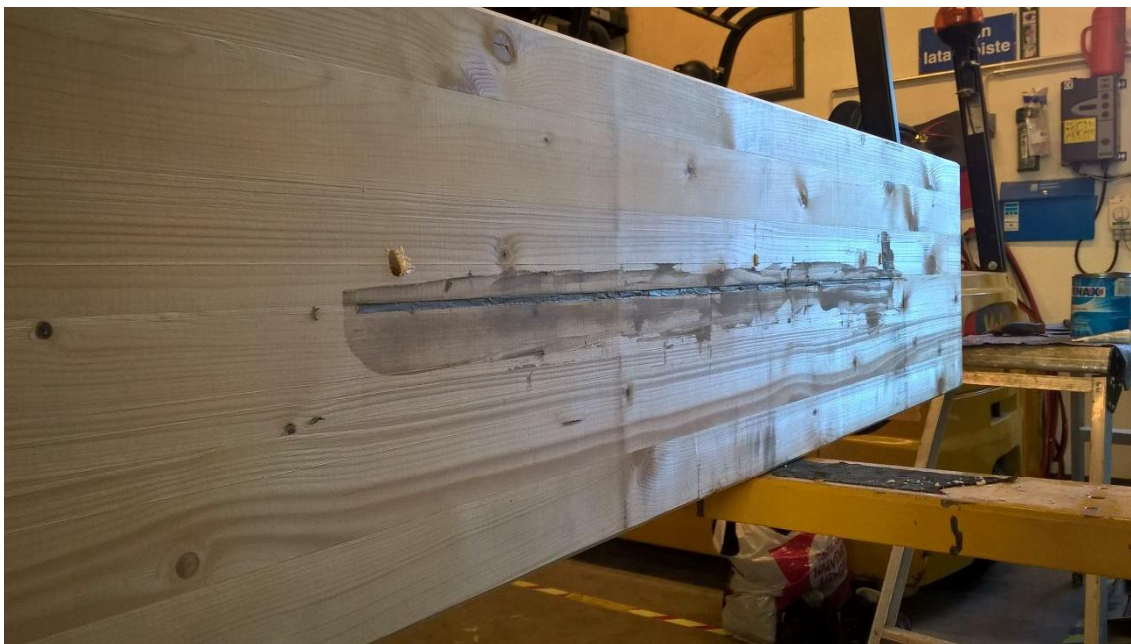
varmistuttu siitä, että ehjän palkin leikkauskestävyys on ensimmäinen kuormituksessa ylittyvä kestävyysarvo.

8.1.1 Epoksi-injektointi

Epoksiliimalla injektointia käytetään yleisesti liimapuisten siltapalkkien korjaamiseen. Menetelmään tarvittavien erikoisvälineiden ja ammattitaidon vuoksi injektoinnin onnistuminen varmistettiin kutsumalla paikalla alan asiantuntija, joka suoritti injektointityön. Liimakon Oy on suomalainen injektointeihin ja hiilikuituvahvistusten tekemiseen erikoistunut rakennusalan toimija, jonka kanssa Tampereen Ammattikorkeakoulu on tehnyt yhteisiä koestuksia myös aiemmin.

Liimapuupalkkien epoksi-injektointi tehdään aina työkohteen mukaisesti ja menetelmät valitaan katselmoinnin jälkeen yleensä työntekijöiden kokemusten perusteella. Tämän työn koestettaville palkeille valittiin hyvin tyypillinen injektointi, joka suoritettiin kokeilun vuoksi kahdella eri tyyppisellä epoksilla.

Korjaustyö aloitettiin poraamalla halkeaman yläpuolelta viistosti reikiä, joiden päät pyrittiin saamaan mahdollisimman lähelle halkeaman takaseinämää. Ajorei'iksi kutsuttujen reikien poraustiheyden määrää halkeaman arvioitu syvyys, sillä kaukana toisistaan olevat reiät kasvattavat pumppauksessa palkin sisälle syntyvää painetta etenkin kapeissa ja syvissä halkeamissa. Tämä kasvattaa merkittävästi palkin halkeamisen riskiä ja pahimmillaan johtaa tilanteeseen, jossa halkeamat syvenevät epoksin tieltä jatkuvasti syvemmälle palkkiin. Porauksen jälkeen halkeama puhdistettiin paineilmalla ja niiden sulkeminen aloitettiin Tenax Solido Grigio -kutistumattomalla kitillä. Toisen palkin halkeamat jätettiin päistään muutaman senttimetrin verran auki, ja toisen palkin halkeamat suljettiin koko matkalta. Kittauksen annettiin kuivua noin puoli tuntia, minkä jälkeen sen tartunta kestäisi injektoinnin paineen.

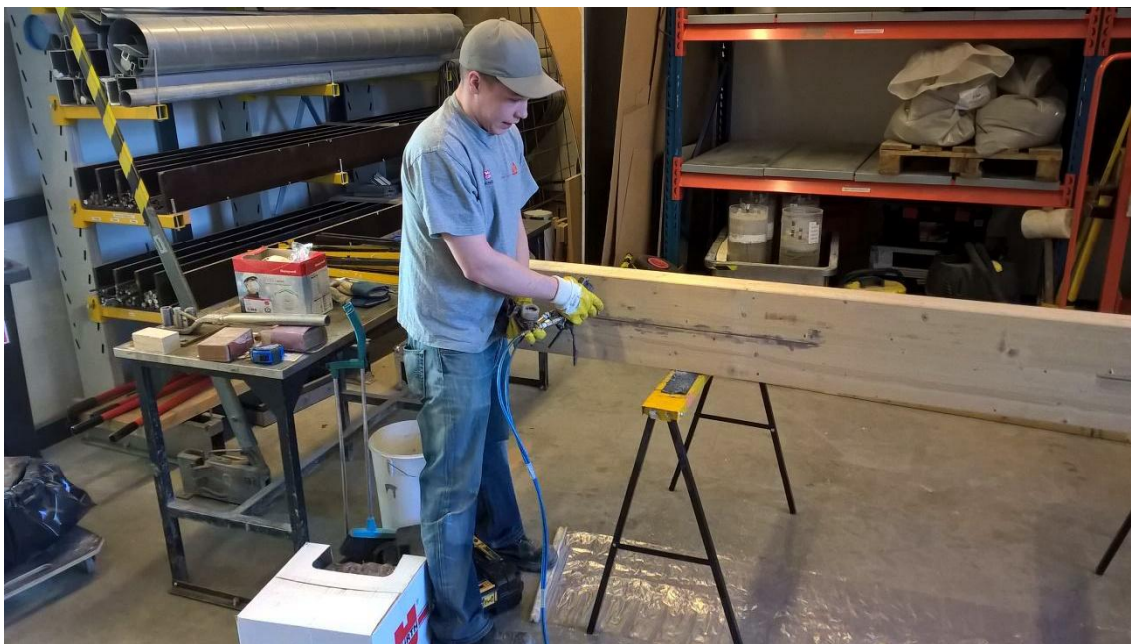


Kuva 18. Koko matkalta umpeen kitattu halkeama. Notkealle epoksille.

Ensimmäisen palkin injektointiin käytettiin notkeaa epoksia, joka soveltuu korkeintaan 5 mm leveille halkeamille. Injektointi aloitettiin reunimmaisesta reiästä ja sen suorittamiseen käytettiin automaattisesti epoksihartsin ja kovetteen oikealla suhteella sekoittavaa pumppua. Injektointipistoolista oli myös mahdollista säätää injektointipaine, mikä estää usein halkeiluun johtavan liian kovalla paineella ajamisen.

Epoksin noustessa ylös seuraavasta pumppausreiästä, tukittiin ensimmäinen reikä kangastupolla ja siirryttiin pumppaamaan ylitulvineen reiän kautta. Liimakonin työntekijät painottivat, ettei täyttöä kannata tehdä vastakkaisesta suunnasta hyppäämällä yhden reiän yli, sillä näin toimimalla ilmapussin jääminen halkeamaan on erittäin todennäköistä. Mikäli ympäröivät olosuhteet pakottavat täyttämään halkeamaa kahdesta suunnasta, on vastaan pumpatessa yli hypätystä reiästä valutettava epoksia niin kauan, että ilmakuplan ulos tuleminen havaitaan silmämääräisesti.

Kun injektointi oli suoritettu kaikista rei'istä järjestyksessä, täytettiin kaikki porausreiät vielä kertaalleen pintaan saakka. Näin varmistettiin epoksin riittävä määrä halkeamassa, vaikka puu imisi osan epoksista itseensä. Kun palkkia tarkasteltiin myöhemmin epoksin jo kuivuessa, havaittiin että reikien nestepinnat olivat laskeneet jopa 5 mm. Tuoreudesta huolimatta palkki oli siis imenyt osan epoksista. Tämän kokemuksen kautta havaittiin kuinka merkittävä etu yläviistosta poratut ajoreiät ovat notkealla epoksilla injektoidessa.



Kuva 19. Notkean epoksin injektointi.

Toisen palkin injektointi suoritettiin valumattomalla epoksilla, joka soveltuu suuremmille halkeamille. Vaikka molempien palkkien halkeamien sulut tehtiin kitillä, on valumatonta epoksia käytettäessä yleistä käyttää itse epoksia myös sulun tekemiseen. Valumattomalle epoksille tehdyn sulun päät olivat avoimet, jotta ilma saataisiin halkeamasta varmasti pois, eikä injektointi paine kasvaisi liiaksi halkeaman sisällä.

Valumattoman epoksin kanssa käytettiin käsikäyttöistä prässää. Liimakonin työntekijät huomauttivat, että ilman painemittareita käsin pumpattaessa on erityisen tärkeää tuntea laitteisto ja käytettävät materiaalit. Käsikäyttöisellä prässillä saadaan huomaamatta helposti aikaan suurenkin palkin halkaisevia voimia, kun paine palkin sisällä kasvaa.

Injektointityö suoritettiin samaan tapaan järjestelmällisesti edeten kuin notkeankin epoksin kanssa. Lopuksi ajoreiät täytettiin ja sulun päät siistittiin. Valumattoman epoksin eduiksi havaittiin yleisesti helppo ja nopea työskentely, mikä varmasti osaltaan johtuu myös tekijöiden hyvästä ammattitaidosta. Toisin kuin notkea epoksi, joka sotki palkin kylkiä, valumaton epoksi oli helppo pyyhkäistä pois pinnalta, eikä siitä jäänyt juuri lainkaan tahroja palkkiin.



Kuva 20. Valumattoman epoksin injektointi käsikäyttöisellä prässillä.

8.1.2 Polyuretaaniliimaus

Korjausmenetelmistä yksinkertaisin ja nopein oli halkeamien täyttäminen polyuretaaniliimalla ilmastointiteippiin tehtyjen reikien läpi. Korjauskohteen olosuhteissa halkeamien täyttäminen olisi huomattavasti hankalampaa, sillä palkki makasi pöydällä kyljellään kun halkeamaa täytettiin, eikä notkea liima näin ollen päässyt valumaan halkeamasta. Lähtökohtaisesti halkeamien täyttämistä niin sanotulla tavallisella puuliimalla ei voida pitää kunnollisena korjausmenetelmänä. Liimatusta palkista saatiin kuitenkin vertailukohta vahvistamattoman ja muilla menetelmillä vahvistettujen palkkien välille.



Kuva 21. Polyuretaaniliimaus.

8.1.3 Ruuvaus kohtisuoraan

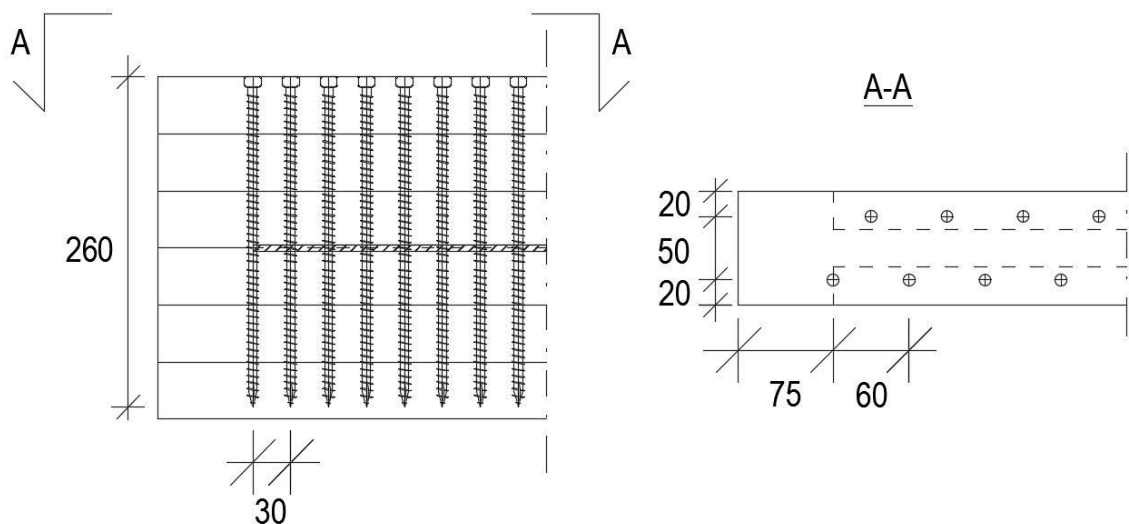
Ruuvivahvistus on hyvin yleinen tapa vahvistaa tuelta lovettuja palkkeja, mutta se soveltuu myös tavalliseen vahvistamiseen tilanteessa, jossa palkin ylä- tai alapuolella on hyvin tilaa, eikä palkkiin käsiksi pääseminen vaadi kohtuuttomia purkutöitä.

Koestuspalkkien vahvistamiseen käytettiin italialaisen Rothoblaasin valmistamia ruuveja, jotka on suunniteltu liimapuupalkkien vahvistuksiin ja liitosten tekemiseen. Ruuvien koon vuoksi niiden suositellut reunaetäisyydet eivät täyttyneet kapean palkin vahvistuksessa ja muun muassa Rothoblaasin kehittämä myProject-mitoitusohjelma huomautti tästä.



Kuva 22. Kohtisuora ruuvaus. Palkissa näkyy ulos tunkeutunut ruuvi.

Palkkiin ruuvattiin 46 kappaletta VGZ7260 täyskierteisiä porakärkiruuveja, joiden halkaisija on 7 mm ja pituus 260 mm. Ruuvaus tehtiin ilman ruuvinohjainta ja yksi ruuveista työntyikin ulos palkin kyljestä viimeisen lamellin kohdalla. Syynä pidettiin ruuvien osumista oksaan, sillä ruuvit olivat pituutensa vuoksi melko taipuisia. Kuvassa 23 on esitetty ruuvien jaon periaate palkissa.

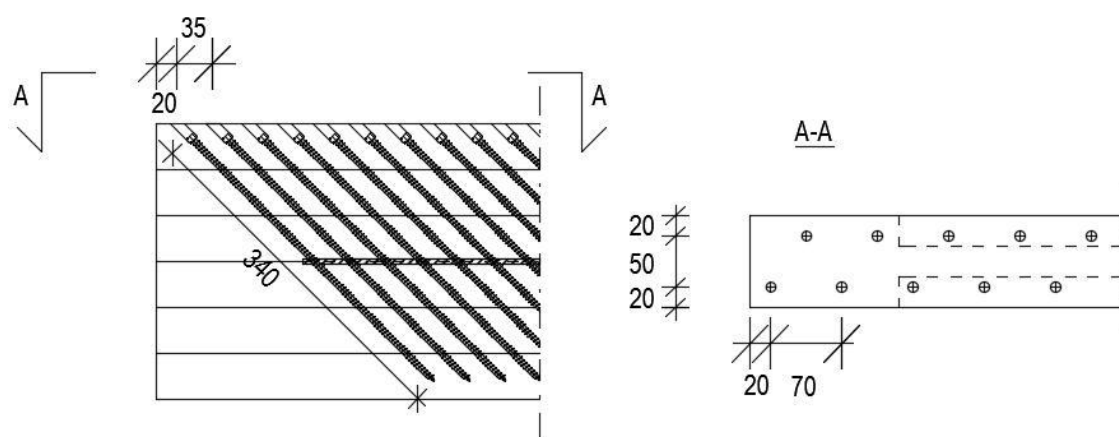


Kuva 23. Ruuvijaon periaate kohtisuorassa ruuvauksessa. Ei mittakaavaa.

8.1.4 Ruuvaus 45 asteen kulmassa

Vinon ruuvaus on periaatteiltaan täysin vastaava kuin kohtisuoraan ruuvaaminen. Näitä kahta oli kuitenkin syytä vertailla, sillä ruuvien pidentyessä niiden kappalehinta nousee merkittävästi. Mikäli merkittävää hyötyä kestävyudessa ei ole, ei pidempiin ruuveihin ole syytä sijoittaa ylimääräistä rahaa.

Vinon ruuvatun palkin pituus poikkesi muista palkeista, sillä ruuveja haluttiin saada koko halkeaman matkalle. Näin ollen ruuvaaminen oli aloitettava etäämmältä halkeaman reunasta.



Kuva 24. Ruuvijaon periaate 45 asteen kulmaan ruuvatessa. Ei mittakaavaa.

Vinoruuvauksessa käytettiin 44 kappaletta Rothoblaasin VGZ7340 täyskierteisiä porakärkiruuveja, joiden halkaisija on 7 mm ja pituus 340 mm. Ruuvausta varten valmistettiin puusta ohjain, jolla ruuvaus saatiin alkamaan oikeassa kulmassa. Muutamat ruuvit työn-tyivät jälleen palkkien kyljestä ulos, mutta niiden korjaamiseen ei nähty syytä, sillä ne olivat ohittaneet halkeaman tason ennen korkkaamistaan ja näin ollen ainoastaan niiden ankkurointi olisi hieman puhdasta ruuvausta heikompi.

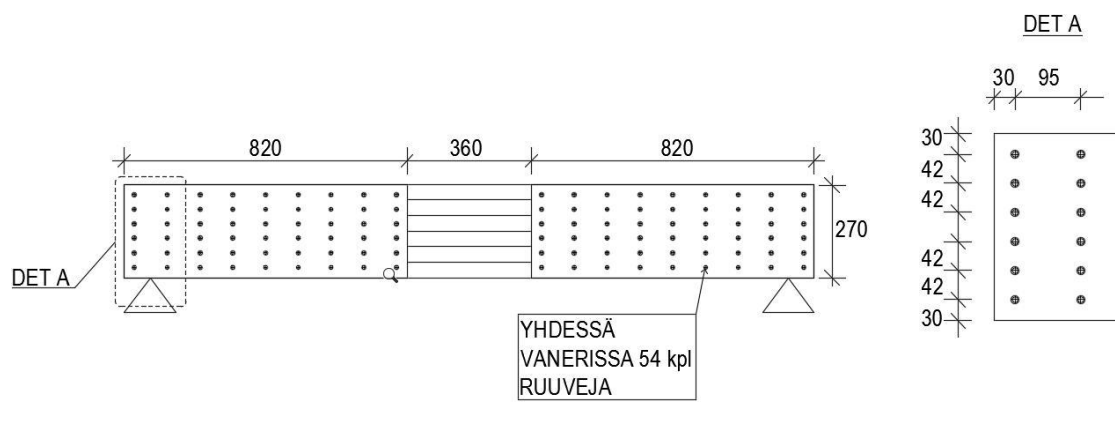


Kuva 25. Vasemmalla ruuvauspisteiden merkkäus. Oikealla korjattu palkki jossa merkittynä ulostunkeutunut ruuvi.

8.1.5 Vanerivahvistus

Liimapuupalkin vanerivahvistus toteutettiin RIL 244-2007 ohjeesta poiketen pelkästään ruuvikiinnityksellä tyypillisen liimaruuvauksen sijaan. Tällöin koestustilanteessa kuormat siirtyvät alussa tapahtuvan kappaleiden välisen pienen liikkeen jälkeen ruuvien kautta vanereille.

Vahvistamiseen käytettiin 12 mm paksua suomalaista koivuvaneria joka kiinnitettiin Fix Masterin 4,2 mm x 45 mm harvakierteisillä Hobau ruuveilla. Ruuvijako ja ruuvauksen periaate on esitetty kuvassa 26.

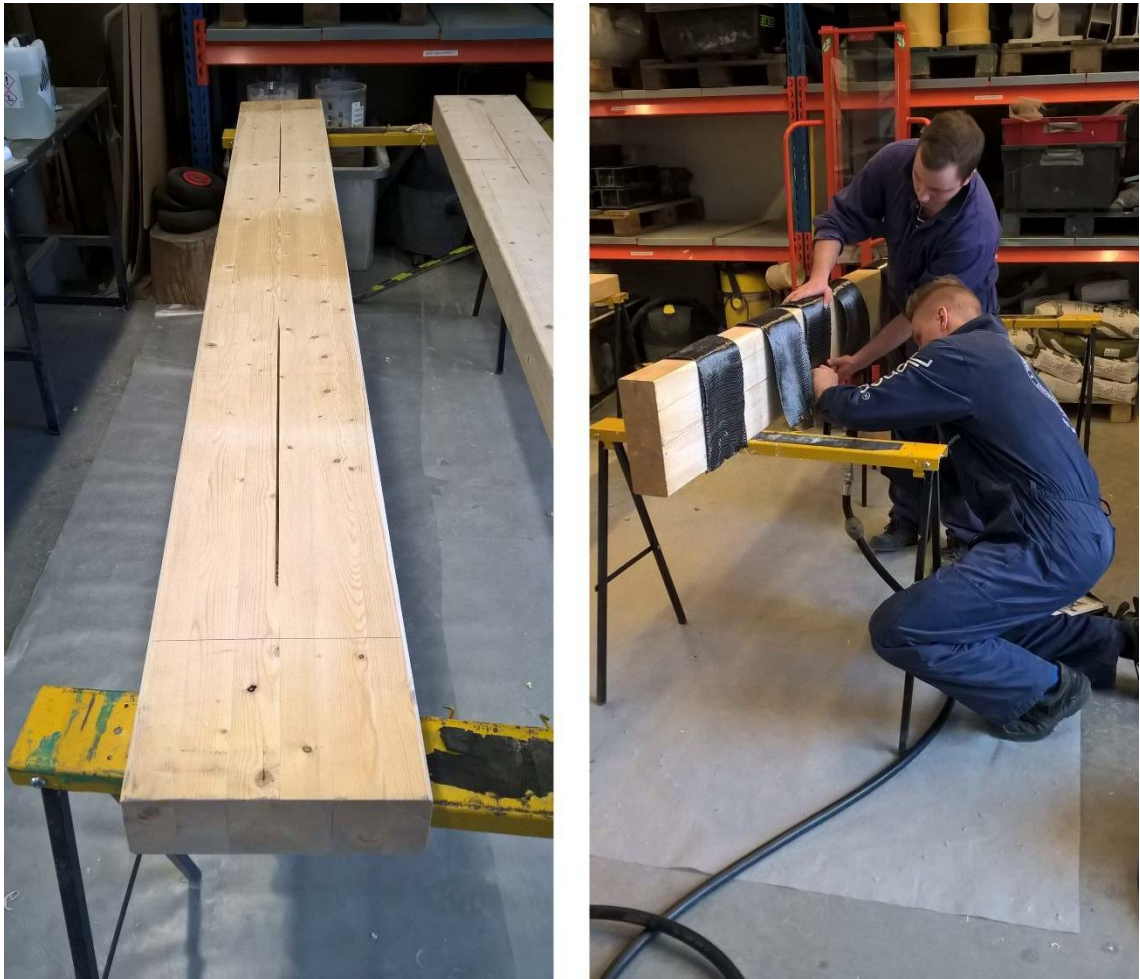


Kuva 26. Vaneroinnin periaate. Ei mittakaavaa.

8.1.6 Hiilikuitukankaat

Hiilikuitukankaista tehtiin kaksi erilaista vahvistustapausta, sillä optimitalanteen ja todellisessa korjauskohteessa eteen tulevan tapauksen eroja haluttiin arvioida. Täydellisen korjauskohteen palkkiin päästiin käsiksi kaikilta sivuilta, jolloin hiilikuitukankaalla voitiin kiertää palkkia ympäri. Tavallisemman korjauskohteen palkki oli avoin kolmelta sivulta, jolloin palkin yläpinta jätettiin avoimeksi. Molemmissa menetelmissä hiilikuitukerroksia laitettiin kaksi kappaletta yhteen kohtaan ja molempien puolien leikkausalueet vahvistettiin kolmesta kohtaa.

Palkkien laminointiin käytettiin 200 mm leveää ja 300 g/m² painavaa unidirectional kangasta, jonka kiinnittämiseen käytetty Epolam 2017/2018 epoksi tehtiin 35 minuutin kovetteella. Hiilikuitukankaan tartuntaa varten palkit hiottiin ensin tartuntapinnoilta ja hiontapöly imuroitiin huolellisesti pois. Tämän lisäksi palkkien reunoja pyöristettiin hieman höyläämällä ja hiomalla, jotta hiilikuitukangas saatiin taipumaan ja tarttumaan kunnolla palkin reunojen ylityksissä. Hiilikuitukangasrullasta leikattiin sopivia mattoja molempien palkkien tarpeisiin ja ensimmäiset suikaleet kiinnitettiin päistään nitojalla palkkien kylkeen.



Kuva 27. Vasemmalla hiottu palkki ja oikealla ensimmäisten hiilikuitukankaiden nidonta.

Kankaiden valmistelun jälkeen aloitettiin epoksiliiman komponenttien sekoittaminen. Huomioitavaa tässä vaiheessa oli, ettei epoksia kannata tehdä ennen kuin muut työvaiheet liimausta varten ovat täysin valmiit, sillä hartsin kanssa käytettiin 35 minuutin käsittelyajan sallivaa kovetetta. Palkin pintaan levitettiin liimaa ja hiilikuitukangas painettiin kiinni, minkä jälkeen välistä poistettiin ilma metallisella telalla. Liima levitettiin jälleen seuraavan kankaan pinnalle ja edeltävät työvaiheet toistettiin.

Kun useampia vahvikkeita oli edellä esitetyllä tavalla kiinnitetty, menetelmä havaittiin osittain vääräksi, sillä se mahdollistaisi hiilikuitukankaan kuitujen jäämisen kuiviksi. Oikeassa menetelmässä epoksia levitetään erittäin runsaasti alimmaisen kankaan alle, minkä jälkeen voimakkaasti telaamalla tai alipaineistamalla epoksi pakotetaan hiilikuitukangaskerrosten läpi yksi kerrallaan. Väärästä menetelmästä huolimatta palkkien kestävyden uskottiin olevan vahvistuksen jälkeen alkuperäistä suurempi ja vertailukelpoisten

tulosten takaamiseksi kaikki hiilikuitukankaat kiinnitettiin loppuun saakka samalla menetelmällä.

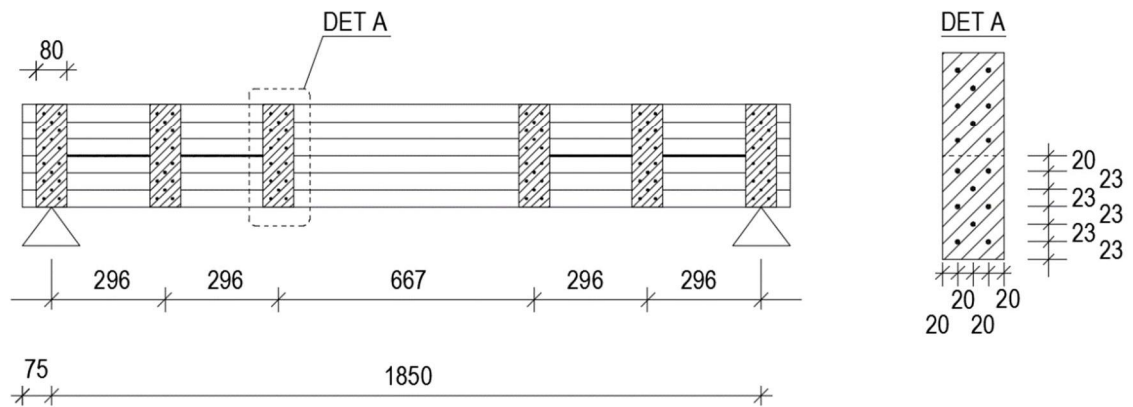


Kuva 28. Ympäri liimattavan hiilikuitukankaan kiinnitys.

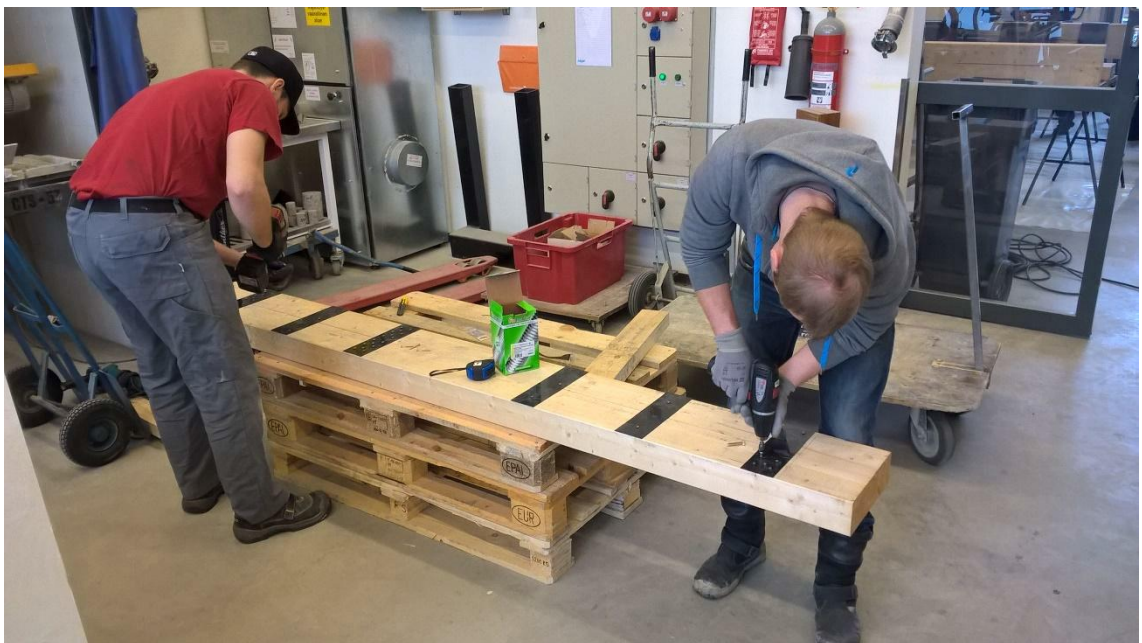
8.1.7 Hiilikuitulevyt

Hiilikuitulevyistä tehtiin kankaiden tapaan kaksi erilaista korjausta. Levyjen kohdalla vertailu kohdistettiin liimauksen ja ruuvauksen erojen havainnointiin.

Ruuvausmenetelmässä käytettiin 1,2 mm paksua hiilikuitulevyä, josta leikattiin 80 mm leveät vahvikekaistaleet. Levyihin mitattiin ruuvien paikat ja tehtiin esiporaukset kuvan 29 mukaisesti. Vaikka jokaiseen kaistaleeseen ruuvattiin 16 tavallista 4,2x45 mm harvakierteistä ruuvia, pidettiin todennäköisenä että ruuvit pettäisivät koestuksessa ennen hiilikuitua. Erityistä huomioita kiinnitettiin ruuvien etäisyyteen halkeaman molemmin puolin, sillä halkeaman kasaan puristuminen mahdollistaisi hiilikuitulevyn lommahtamisen halkeaman kohdalta.

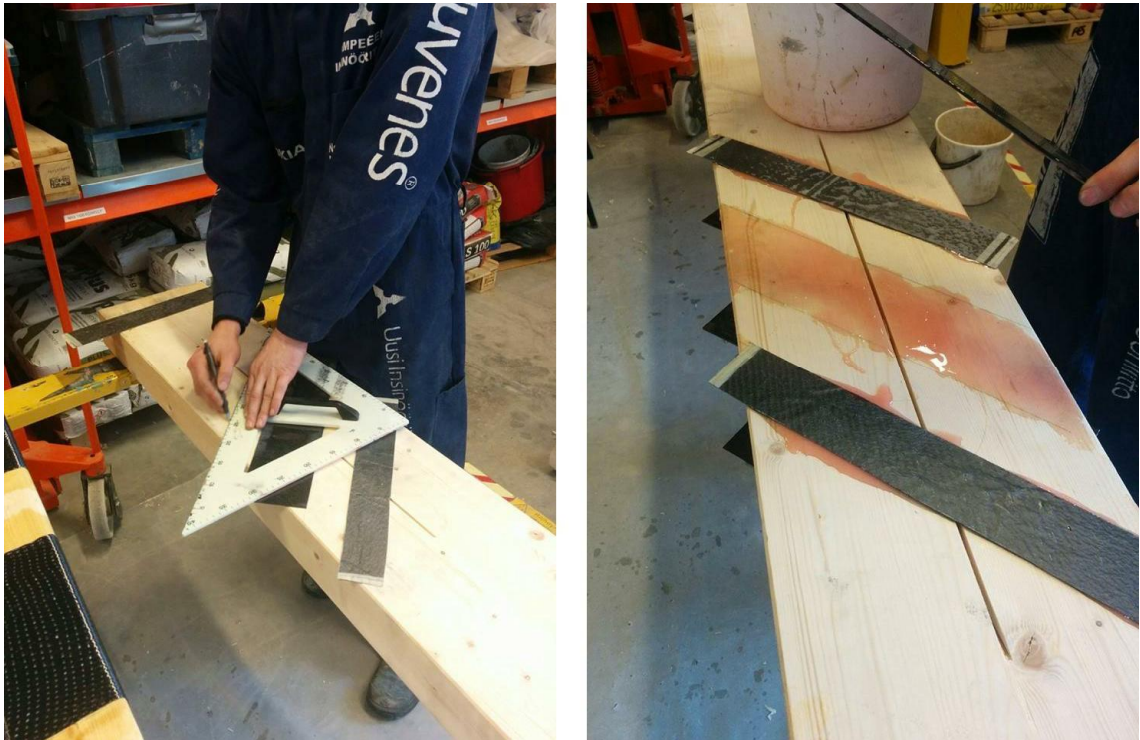


Kuva 29. Ruuvattujen hiilikuitulevyjen periaate. Ei mittakaavaa.



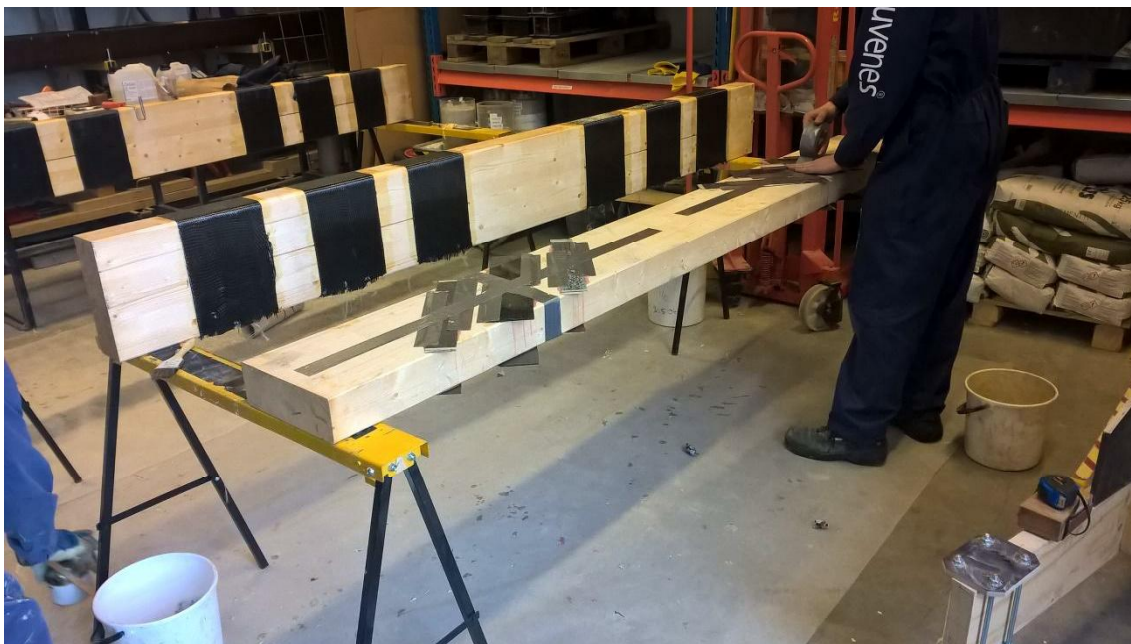
Kuva 30. Hiilikuitulevyjen ruuvaus.

Vahvistusten suunnitelmat olivat muuttuneet hieman materiaalien tilausten jälkeen, joten 1,2 mm paksuista hiilikuitulevyä oli tilattu molempien vahvistusten näkökulmasta liian vähän. Hiilikuitulevyä saatiin kuitenkin hankittua nopeasti paikallisten autonrakentajien pajalta. Pajalta saatu levy oli ohuimmillaan 1,2 mm paksua ja eräässä käytetyssä levyn palassa 2 hiilikuitukerroksista oli liimattu 45 asteen kulmaan muihin kerroksiin nähden. Liimauksessa käytetty hiilikuitulevy oli lähtökohtaisesti siis vahvempaa kuin ruuvauksessa käytetty. Hiilikuitu on kuitenkin niin kestävää muihin käytettyihin materiaaleihin nähden, ettei sen murtumista pidetty mahdollisena, eikä vahvikemateriaalien erilaisuuden uskottu vaikuttavan lopputuloksiin tai murtumistapaan.



Kuva 31. Hiilikuitulevyjen liimauskohtien mittauss- ja liimausvaihe.

Vahvistettavat palkit hiottiin jälleen huolellisesti ja hiontapöly poistettiin imurin, sekä paineilman avulla. Hiilikuitulevyistä leikattiin 6 kaistaletta palkin molemmille pitkille sivuille, jotka karhennettiin tartuntapinnoilta S80-hiomapaperilla ja puhdistettiin lopuksi huolellisesti asetonilla kaiken rasvan ja muun lian poistamiseksi. Kun levyjen paikat oli mitattu huolellisesti ja muut työvaiheet olivat valmiit, sekoitettiin Adekit H9951 epoksin hartsi ja kovete keskenään. Liimaa levitettiin sekä palkkiin, että hiilikuitulevyihin ja levyt painettiin palkkiin kiinni niin, että ylimääräinen liima tunkeutui saumasta pinnalle. Lopuksi vahvikkeet teipattiin kiinni palkkiin, jotta ne eivät liikkuisi ennen epoksin kovettumista.



Kuva 32. Liimattujen hiilikuitukaistojen teippaus.

8.2 Laskelmat

Liimapuupalkkien vahvistusten suunnittelua varten tehtiin laskelmia, joilla määritettiin vahvistusten edellyttämiä materiaalmääriä, sekä arvioitiin palkkien kestävyys vahvistusten jälkeen. Liimapuupalkkien alkuperäinen kestävyys pyrittiin palauttamaan vahvistusmenetelmillä, mutta kapasiteetteja ei haluttu merkittävästi kasvattaa alkuperäiseen ehjään palkkiin verrattuna. Liitteenä esitetyt laskelmat tehtiin injektoinnille, vanerivahvistukselle, sekä kahdelle ruuvivahvistukselle.

Injektoinnilla oletettiin saavutettavaksi alkuperäinen kestävyys, jolloin ehjän palkin leikkauskestävyys olisi todennäköisin mitoittava arvo. Vaikka epoksi on merkittävästi puuta lujempaa, ei onnistunutkaan injektointi muuta puun lujuusominaisuuksia, vaan liimapuun lamellit halkeavat joko injektointisauman vierestä, tai palkin alapinnasta vetolujuuden ylityessä.

Vanerivahvistus laskettiin tyypillisesti rakentamisessa käytetyn 12 mm paksun koivuvanerin kestävyuden kautta. Vaneri kiinnitettiin palkkiin ainoastaan ruuveilla, jolloin kuormien siirtyminen palkilta vanerille edellyttää pientä alkusiirtymää palkin ja vanerien vä-

lillä. Vanerien kestävyys koestuksen mukaisessa tilanteessa on melko suuri palkin kestävyteen verrattuna, joten murron voidaan olettaa tapahtuvan liimapuupalkin lamelloissa tai ruuvien leikkautuessa.

Suuret ruuvit mitoitettiin ottamaan leikkausvoimaa vastaan yhtä paljon kuin alkuperäinen ehjä palkki. Vaikka laskelmat osoittavat käytettyä pienemmän ruuvimäärän riittävän leikkausta ja liukumista vastaan, on ruuveja laitettu koko halkeaman matkalle tasaisella jaksolla. Mikäli ruuvit onnistuvat estämään palkin leikkautumisen, on todennäköistä, että palkki murtuu alimmasta lamellista puun vetolujuuden ylittyessä.

9 Koestusten tulokset

9.1 Injektointi notkealla epoksilla

Liimapuupalkkien koestaminen aloitettiin Liimakonin injektoimalla palkilla, jossa oli käytetty notkeaa epoksia. Laskennallisesti palkin oletettiin kestävän vähintään saman verran kuin ehjän palkin ja injektoinnin onnistuessa leikkauskestävyyden uskottiin paranevan niin paljon, että murto tapahtuisi taivutuksesta vetopuolelta.



Kuva 33. Notkealla epoksilla injektoitu palkki koestuslaitteessa. [14.]

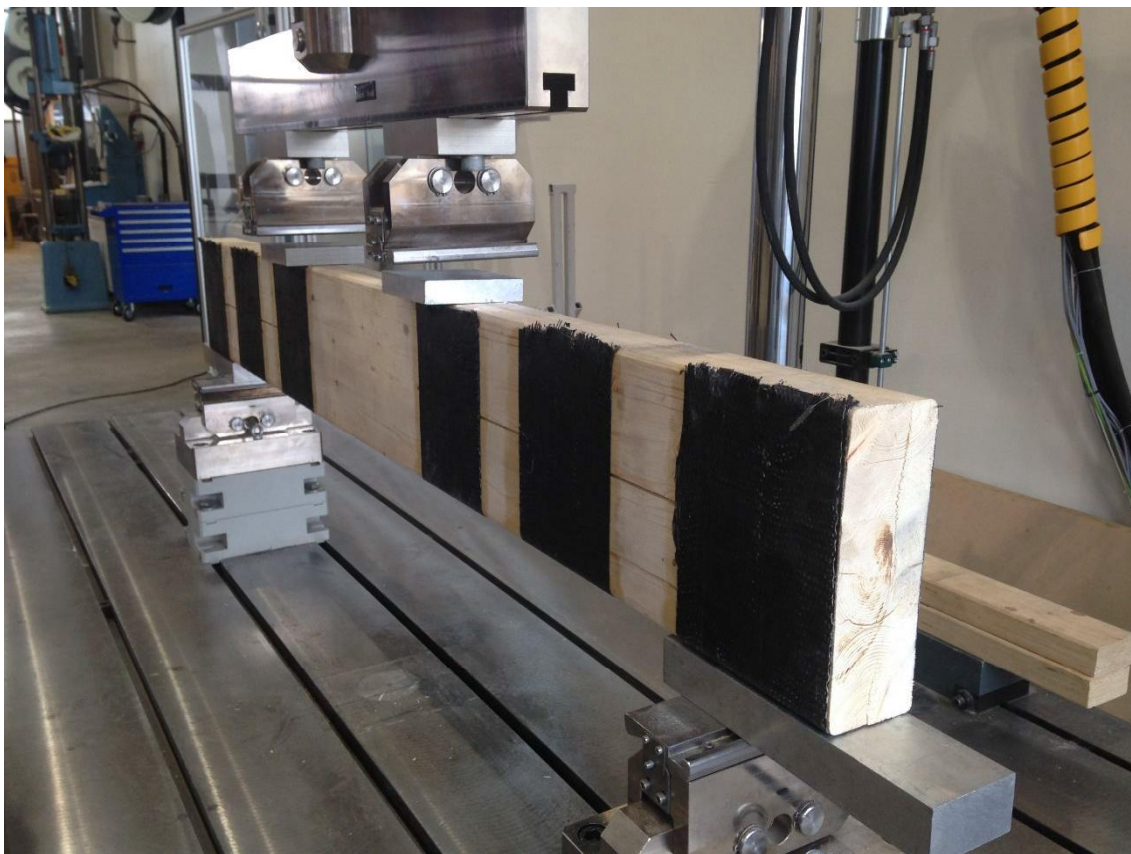
Ehjän liimapuupalkin murtokuorma oli käsinlaskennassa arvioitu noin 104 kN suuruiseksi koestuspenkissä. Notkealla epoksilla injektoitu liimapuupalkki kesti 136,44 kN suuruisen voiman ennen äkillistä taivutusmurtoaan. Kyseisen palkin tapauksessa havaittiin että injektointi on hyvän toteutettavuuden lisäksi erittäin luotettava korjausmenetelmä ja sillä saavutetaan varmasti jopa laskennallinen murtokuorma, mikäli palkeissa ei ole suurempia materiaaaliveirheitä.



Kuva 34. Taivutuksesta murtunut palkki. [14.]

9.2 Hiilikuitulaminointi kolmelta sivulta

Hiilikuitumatolla laminointi oli eräs uudemmistä kokeiluun otetuista menetelmistä. Etukäteen epäilystä herätti osittain epäonnistunut epoksointi, mikä saattaisi vaikuttaa vahvistuksen tuomaan kestävyys. Kestävyys uskottiin tästäkin huolimatta olevan merkittävästi alkuperäistä parempi.



Kuva 35. Kolmelta sivulta laminoitu palkki koestuslaitteessa. [14.]

Laminoidulle palkille ei tehty laskennallista arviota sen kestävyydestä, mutta kuitujen täyttyessä epoksilla ja liimauksen onnistuessa murren oletettiin tapahtuvan taivutuksesta. Palkki halkesi kuitenkin tarkalleen korkeuden puolivälistä leikkautumalla kuorman ollessa 117,16 kN. Leikkausmurren syynä pidettiin epäonnistunutta epoksointia, mutta vääristä työmenetelmistä huolimatta korjauksella saavutettiin laskennallista murtokuormaa suurempi kestävyys. Lisäksi laminoitu palkki murtui varsin sitkeästi ja varoitti kovaäänisesti lähestyvistä murrosta. Näin ollen laminointia pidettiin varsin hyvänä menetelmänä korjaamiseen ja sen jatkotutkiminen onnistuneilla liimauksilla olisi viisasta korjausrakentamisen kehityksen kannalta.



Kuva 36. Leikkauksesta haljennut laminoitu palkki. [14.]

9.3 Korjaamaton palkki

Vertailun vuoksi koestukseen otettiin luonnollisesti myös korjaamaton palkki, jonka kestävyys arvioiminen etukäteen oli äärimmäisen hankalaa. Turvallisuuden varmistamiseksi ja palkin kestävyys yliarvioinnin välttämiseksi suunnitteluohjeet antavat luvan arvioida palkin leikkauskestävyyden olevan halkeamattoman osuuden ja ehjän poikki-leikkauksen suhteen suuruinen. Tällöin kyseisen palkin leikkauskestävyys olisi 33% alkuperäisestä eli murtokuorma olisi noin 35 kN.



Kuva 37. Korjaamaton palkki koestuslaitteessa. [14.]

Korjaamattoman palkin kestävyys yllätti täysin, mikä myös osaltaan häiritsi korjausmenetelmien keskinäistä vertailua. Palkin murtokuorma oli 90 kN ja se murtui varoittamatta leikkautumalla. Palkin haljettua leikkauksesta, alkoi se toimimaan kahtena päällekkäin olevana pienempänä palkkina, jotka kestivät taivutusta vastaan aina 108,06 kN asti kunnes taivutusmurto vei palkilta loputkin kantavuudesta.



Kuva 38. Leikkauksesta murtunut korjaamaton palkki.

9.4 Vanerointi

Perinteisenä korjausmenetelmänä käytetty vanerointi oli toteutettu ainoastaan ruuveilla kiinnittämällä ja vanerin kestävyys oli laskennallisesti todettu huomattavasti palkin alkuperäistä kestävyyttä suuremmaksi. Murron oletettiin tapahtuvan ruuvien pettäessä, jolloin kuorma ei enään siirtyisi vanereille vaan kaikki toimisivat omina rakenteinaan ja palkki murtuisi leikkautumalla.



Kuva 39. Vanerivahvistettu palkki koestuslaitteessa. [14.]

Oletukset osoittautuivat oikeiksi vaneroinnin suhteen. Palkki piti melko kovaa pauketta todennäköisesti yksittäisten ruuvien katkeillessa ja lopulta selkeä leikkautuminen tapahtui noin 121 kN kohdalla. Haljenneella palkilla oli kuitenkin kantavuutta taiputusta vastaan aina 134,74 kN asti, minkä jälkeen se toimi sitkeästi taipuman kasvaessa.

Tulosten perusteella vanerointia pidettiin erittäin hyvänä korjausratkaisuna, joten sen käytön yleisyys ei ole yllättävää. Positiivisinta vaneroinnissa oli murron sitkeys, mikä tekee siitä turvallisen ja lähestyvistä murrosta varoittavan korjausmenetelmän.

9.5 Polyuretaaniliimaus

Polyuretaaniliimaus otettiin vertailukohdaksi injektoinneille, vaikka käytetyt työmenetelmät eivät olleetkaan oikeaan korjauskohteeseen soveltuvat. Kestävyyden oletettiin olevan samaa luokkaa epoksi-injektointien kanssa, sillä polyuretaaniliima on merkittävästi puuta lujempaa. Sahattujen halkeamien tasaisuus sopi myös hyvin niin sanotun tavallisen puuliiman käyttöön, sillä liiman levitystä ei tarvinnut paineistaa.



Kuva 40. Polyuretaaniliimattu palkki koestuslaitteessa. [14.]

Liimattu palkki poikkesi odotuksista kaikkien arvioiden osalta. Palkin oli havaittu olevan halki lamellien välistä poikkileikkauksen korkeuden puolivälissä, minkä odotettiin aikais-tavan leikkaushalkeamista merkittävästi. Lopulta palkki murtui kokonaan taivutuksesta vasta 162,63 kN voimasta toimittuaan sitkeästi alueella 150-160 kN, missä ensimmäiset taivutusmurron halkeamat syntyivät. Huomattavasti oletuksia suurempi kestävyys ai-

heutti myös tukipaineen ylittymistä palkin yläpinnassa. Koestustuloksen perusteella polyuretaaniliima voitiin todeta erittäin hyväksi korjausmenetelmäksi, mutta menetelmän käyttökeltvottomuus todellisessa tilanteessa rajaa tuloksen koskemaan liiman erinomaista kestävyyttä tartunnan onnistuessa.



Kuva 41. Polyuretaaniliimatun palkin taivutuksesta syntynyt halkeama palkin alapinnassa.

9.6 Injektointi valumattomalla epoksilla

Kuudentena koestusvuorossa oli Liimakonin valumattomalla epoksilla injektoitu palkki, jonka kestävyyden uskottiin olevan vähintään samaa luokkaa notkealla epoksilla korjatun palkin kanssa. Liimakonin työntekijöiden mukaan kyseisen tyyppisiin halkeamiin valumaton epoksi oli huomattavasti parempi vaihtoehto, sillä notkean epoksin onnistunut tartunta leveissä halkeamissa on hieman epävarmaa.

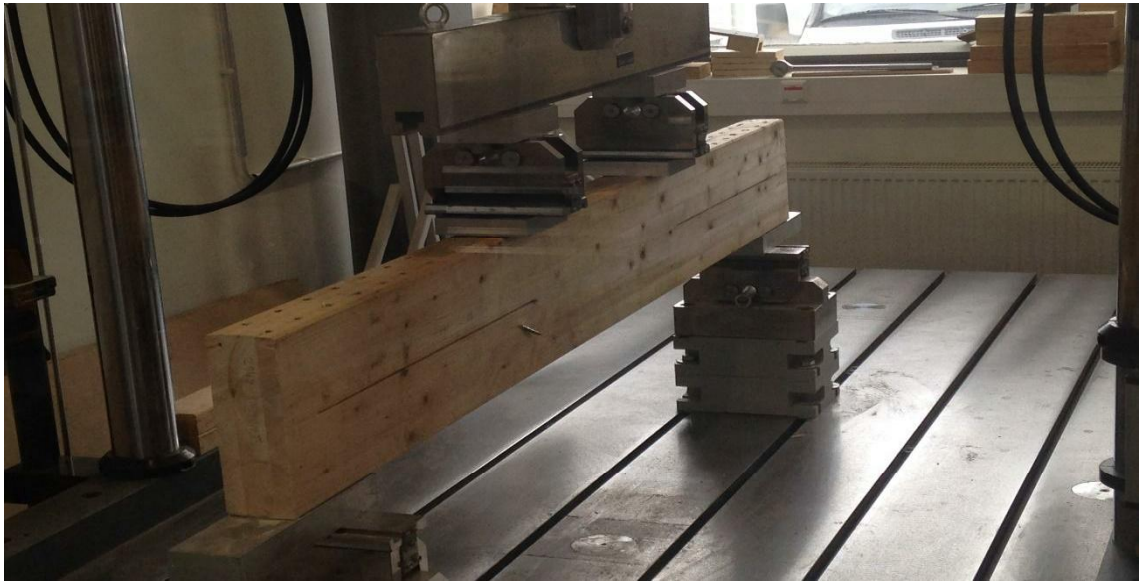
Valumattomalla epoksilla injektoidun palkin kestävyys osoittautui erinomaiseksi murto-kuorman yltäessä 156,42 kN ja murron tapahtuessa vetopuolelta taivutuksesta. Heikompana puolena pidettiin yllättävää kuorman kestävyiden alenemista eli haurasta murtoa. Palkki ei siis varoittanut lähestyvistä murrosta.



Kuva 42. Vetopuolen halkeama valumattomalla epoksilla korjatussa palkissa.

9.7 Ruuvaus 45 asteen kulmassa

Ruuvausmenetelmistä ensimmäisenä koestukseen asetettiin vinoruuvein vahvistettu palkki. Palkeille oli laskettu liukumista ja leikkautumista vastaavia ruuvimääriä ja palkit oli korjattu huomattavasti suuremmilla ruuvimäärillä, jolloin korjausmenetelmän oletettiin ohjaavan murtotavan leikkautumisesta taivutusmurtoon.



Kuva 43. Vinoruuvivahvistettu palkki koestuslaitteessa. [14.]

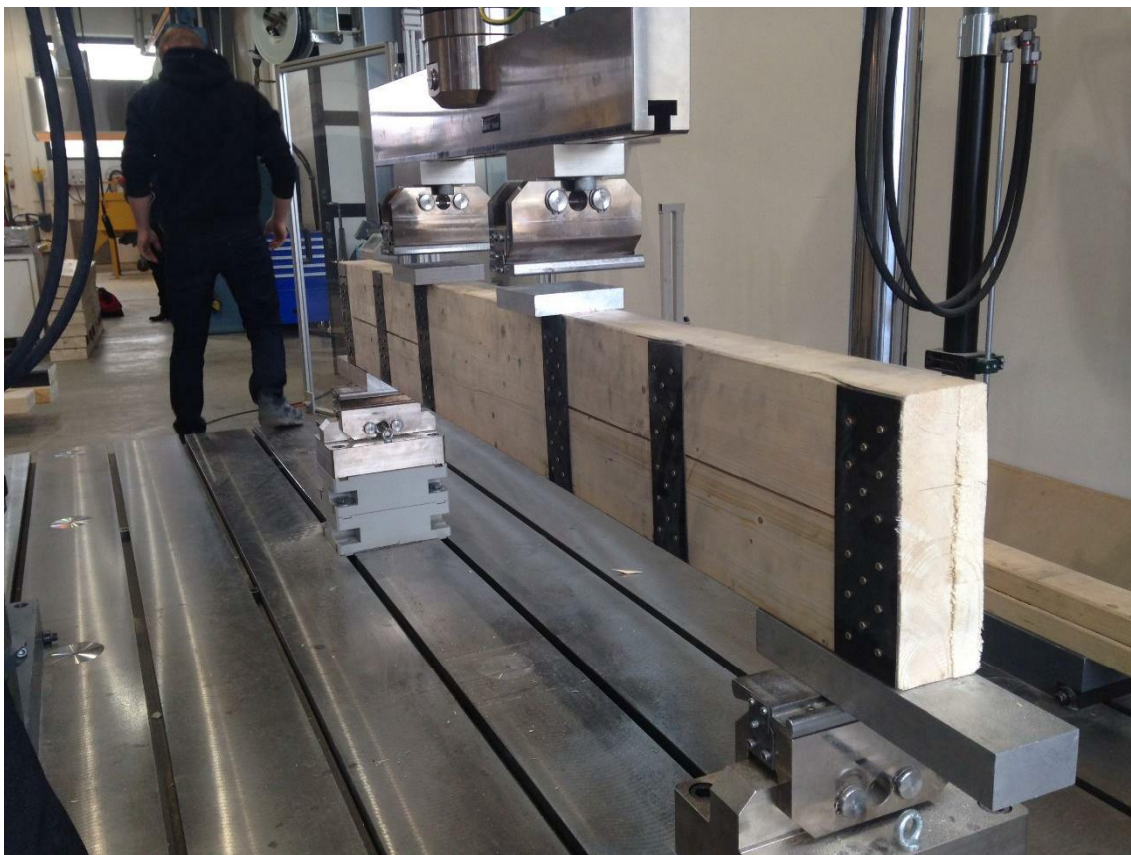
Vinoruuvivahvistettu palkin murtuminen tapahtui odotusten mukaisesti taivutuksesta kuorman ollessa 142 kN. Vinoruuvaus esti tehokkaasti lamellien välisen liukumisen ja palkin leikkausmurron. Menetelmän huonona puolena voidaan pitää sen korkeaa hintaa, joka korostuu palkkien koon kasvaessa kun ruuvien yksikköhinnat nousevat merkittävästi.



Kuva 44. Taivutuksesta syntyneitä halkeamia vinoruuvivahvistetussa palkissa.

9.8 Ruuvikiinnitteinen hiilikuitulevy

Hiilikuidun lujuus on puuhun verrattuna merkittävästi suurempi ja kaikkien hiilikuituvahvistusten kestävyysmittaavien tekijänä pidettiin kiinnityksen onnistumista ja sen kestävyttä. Ruuvatuilla hiilikuitulevyillä vahvistetun palkin murtotavaksi oletettiin ruuvien pettämisen jälkeinen palkin leikkautuminen ja kestävyys hieman ehjää palkkia korkeammaksi.



Kuva 45. Ruuvatuilla hiilikuitulevyillä vahvistettu palkki koestuslaitteessa. [14.]

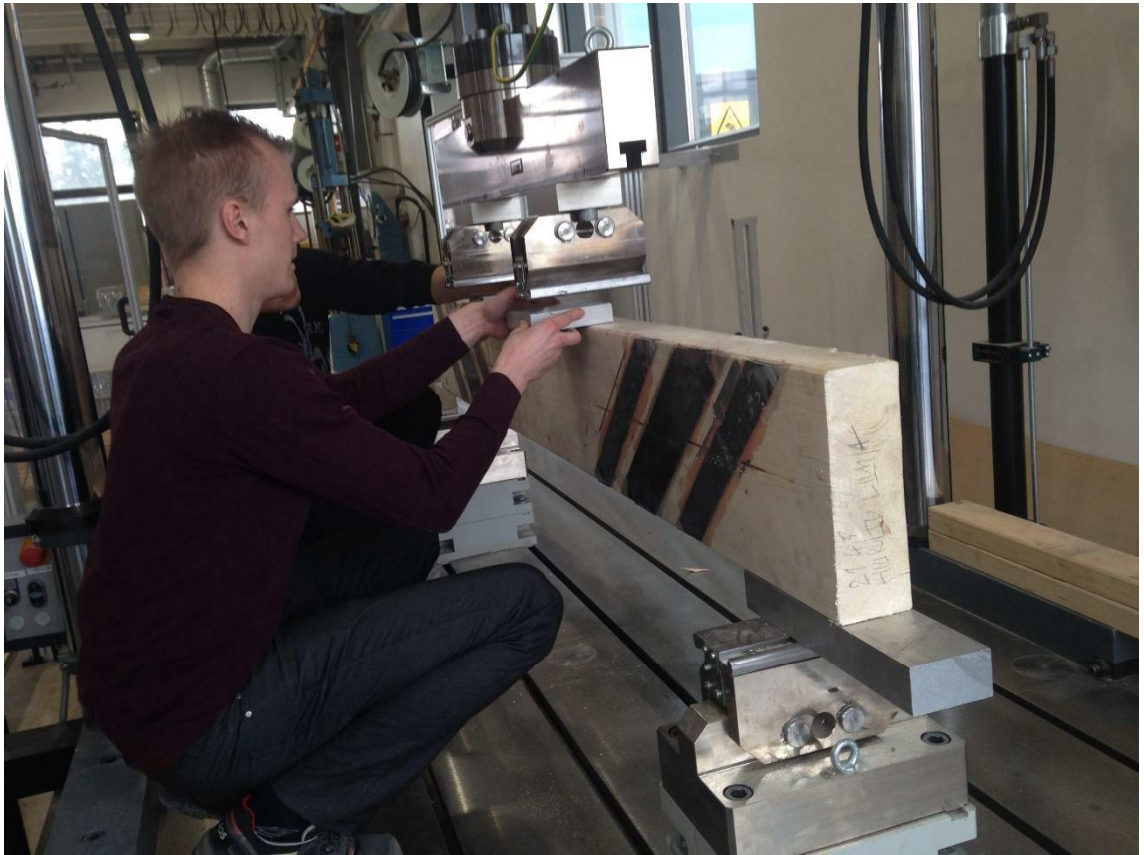
Kyseisen palkin kohdalla ruuvikiinnitys osoittautui odotettua huonommaksi. Hiilikuitulevyn ruuvit olivat liian kaukana halkeamasta, mikä mahdollisti hiilikuitulevyissä tapahtuvan muodonmuutoksen. Näin ollen kuormat eivät siirtyneet lainkaan ruuveille vaan palkki leikkautui poikkileikkauksen korkeuden puolivälistä 60,38 kN kuormalla. Liimapuupalkki toimi siis käytännössä vahvistamattoman palkin tavoin, eikä vahvistukselle saatu minäänlaista tulosta kestävyysmittaavien suhteen. Koestuksen perusteella tultiin siihen tulokseen, ettei ruuvikiinnitys toimi erityisen hyvin hiilikuitulevyjen kanssa, kun kyseessä on erittäin leveä halkeama.



Kuva 46. Ruuvatuilla hiilikuitulevyillä vahvistettu haljennut palkki. [14.]

9.9 Liimattu hiilikuitulevy

Liimatuilta hiilikuitulevyiltä odotettiin suurta lujuutta, sillä sekä käytetyn epoksin, että hiilikuitulevyn kestävyys ovat erittäin korkeat suhteessa puuhun, eikä työvaiheissa ollut ongelmia niiden yksinkertaisuuden vuoksi.



Kuva 47. Liimatuilla hiilikuitulevyillä vahvistetun palkin asettaminen koestuslaitteeseen. [14.]

Hiilikuitulevyt vahvistivat palkin leikkausta vastaan odotetusti, mutta laatuvaihtelu vaikutti suuresti myös tämän palkin kestävyYTEEN. Palkin kaksi alinta lamellia katkesivat veto-puolelta kuorman ollessa vasta 110,22 kN. Niinpä tässäkin tapauksessa epäiltiin huono-laatuisen palkin vääristäneen koestustulosta, eikä epoksilla liimattuja hiilikuitulevyjä voida missään nimessä väittää huonoksi korjausmenetelmäksi pelkästään tehtyjen koestusten perusteella, vaan hiilikuidulla tehtyjen korjausten tutkimista on syytä jatkaa ja laajentaa puurakenteiden osalta.



Kuva 48. Katkenneet lamellit liimatuilla hiilikuitulevyillä vahvistetussa palkissa.

9.10 Hiilikuitulaminointi palkin ympäri

Kokonaan palkin ympäri laminoitujen hiilikuitunauhojen odotettiin olevan hieman kolmelta sivulta kiinnitettyjä parempia, mutta tätäkin korjausmenetelmää varjosti hieman väärin tehty liimaus, jonka uskottiin vaikuttavan kestävyYTEEN. Riippumatta laminointikerrosten välisten kiinnitysten onnistumisesta, hiilikuitunauha muodosti palkin ympärille kotelomaisen rakenteen, joka oletettavasti toimii paremmin yhtenä vahvikkeena, kuin yläpinnastaan avoin laminointi.



Kuva 49. Ympäri laminoitu palkki koestuslaitteessa [14.]

Lopulta kolmelta sivulta ja ympäri laminoidut palkit todettiin toiminnaltaan lähes identtiksi. Ympäri laminoitu palkki murtui 118 kN kuormasta leikkautumalla ja palkin toiminta jatkui kahtena pienempänä palkkina taivutusta vastaan aina 132 kN kuormaan saakka, jolloin palkki menetti kantavuutensa taivutuksesta. Oman osansa ympäri laminoinnin toiminnan häiritsemiseen tuo kuormituspisteiden sijainti suoraan vahvikkeiden päällä. Sen voidaan olettaa edesauttavan erittäin jäykäksi epoksoidun hiilikuitukankaan lommahtamista palkin kyljistä ulos.

9.11 Ruuvaus 90 asteen kulmassa

Kohtisuoran ruuvauksen oletettiin olevan kestävyys suhteen samalla tasolla vinoruuvauksen kanssa. Palkin korjaamista varten oli laskettu vaadittava ruuvimäärä leikkausvoiman vastaanottamiseksi ja lopulta palkki vahvistettiin selvästi laskelmia suuremmalla määrällä ruuveja.



Kuva 50. Kohtisuoraan ruuvattu palkki koestuslaitteessa. [14.]

Suurilla ruuveilla tehdyn vahvistuksen yhtenä ongelmana pidettiin niiden syrjäyttämän puumateriaalin suurta pinta-alaa suhteessa poikkileikkauksen mittoihin. Kohtisuoraan ruuvattu palkki murtui 77 kN kohdalla leikkautumalla. Tarkempi tulkinta huonosta tuloksesta olisi edellyttänyt palkin perinpohjaista tutkimista, joten huonon tuloksen selityksiksi jäävät poikkileikkauksesta syrjäytetyn pinta-alan liian suuri osuus tai huonolaatuinen liimapuupalkki. Epävarmuudesta huolimatta kohtisuoran ruuvikorjauksen tekeminen on niin kallista jopa kokeessa käytettyjen palkkien kokoluokassa, ettei sitä voi suositella rakenteellista korjaamista edellyttävän palkin korjaamiseen.

9.12 Alkuperäinen ehjä palkki

Viimeisenä koestettiin alkuperäisessä kunnossa oleva ehjä liimapuupalkki, jonka laskennallinen murtokuorma oli noin 104 kN ja oletettu murtotapa leikkautuminen. Palkissa ei ollut silminnähden suuria vaurioita, joten sen uskottiin toimivan odotusten ja laskelmien

mukaisesti, joskin muut koestetut palkit olivat osoittaneet murtokuorman olevan pääsääntöisesti laskettua suurempi.



Kuva 51. Ehjä liimapuupalkki koestuslaitteessa. [14.]

Ehjän palkin lopulliseksi murtokuormaksi saatiin 138 kN ja se murtui taivutuksesta. Laskelmien mukaan taivutus- ja leikkausmurron määräämien pistekuormien ero oli kuitenkin niin pieni, että lamelleissa esiintyvät laatupoikkeamat kuten oksat, heikentävät palkkia merkittävästi juuri vetopuolelta.

Taulukko 3. Koestuksissa saadut tulokset.

Koestus nro.	Vahvistustapa	Murtotapa	Murtokuorma (kN)
1	Injektointi, notkea epoksi	Taivutus	136,44
2	Hiilikuitulaminointi, yläpinta auki	Leikkaus	117,16
3	Korjaamaton palkki	Leikkaus	90
4	Vanerointi	Leikkaus	121
5	Polyuretaaniliimaus	Taivutus	151
6	Injektointi, valumaton epoksi	Taivutus	156,42
7	Ruuvaus 45 asteen kulmassa	Taivutus	142
8	Ruuvikiinnitteinen hiilikuitulevy	Leikkaus	60,38
9	Liimattu hiilikuitulevy	Taivutus	110,22
10	Hiilikuitulaminointi, ympäri	Leikkaus	118
11	Ruuvaus 90 asteen kulmassa	Leikkaus	77
12	Ehjä palkki	Taivutus	138

10 Tulosten analyysi

Palkkien koestusten tuloksissa esiintyy merkittävää hajontaa, mikä vaikuttaa 12 palkin otannassa suuresti keskiarvoihin ja vaikeuttaa näin tulosten tulkitsemista. Laskelmilla saadut arvot poikkesivat todellisesta tilanteesta. Positiivisena puolena voidaan pitää sitä, että murtokuorma oli lähes kaikissa palkeissa suurempi kuin laskelmat osoittivat. Näissä tapauksissa oltiin siis varmalla puolella palkkien mitoituksen suhteen. Ruuveilla kiinnitettyjen hiilikuitulevyjen kohdalla on syytä epäillä virheellisesti liimattua palkkia tai ruuvikiinnityksen sopimattomuutta leveän halkeaman vahvistukseen, sillä leikkautuminen tapahtui korjaamatonta palkkia pienemmällä kuormalla ja aivan yllättäen.

Suoritettujen kokeiden perusteella korjausmenetelmistä voidaan suositella erityisesti injektointia sen käytännöllisten työtapojen, sekä menetelmällä saavutettavan kestävyysvuoksi. Työn suorittamiselle ei tässä tutkimuksessa laskettu hintaa, mikä tarkoittaa injektoinnin kustannuksissa purkillista hartsia ja kovetetta, sekä pientä määrää sulkukittiä.

Perinteinen vanerointi todettiin myös hyväksi korjaustavaksi, vaikka menetelmän esteettisyys ei ole kaikkiin tilanteisiin sopiva. Vanerointi olisi hyvä tehdä suunnitteluohjeen mukaisesti liimaruuvaamalla, sillä polyuretaaniliimalle tehty testi osoittaa sen olevan erittäin kestävä.

Hiilikuituvahvistukset toimivat pääsääntöisesti hyvin, mutta niiden tutkimista olisi syytä laajentaa. Uskoisin hiilikuitulaminoinnin soveltuvan esimerkiksi hyvin vaikkapa pilarien vahvistamiseen ja nurjahdustuentaan. Hiilikuituvahvistuksessa työmenetelmien tunteminen on ehdottoman tärkeää, sillä väärällä tavalla liimattu kangas menettää merkittävästi kapasiteettiaan verrattuna oikeilla menetelmillä liimattuun hiilikuituun.

Suurilla ruuveilla korjaamista ei pidetty lähtökohtaisesti parhaana mahdollisena menetelmänä korkean hinnan, sekä puun ja teräksen erilaisen elämisen vuoksi. Vinoruuvausta voisi käyttää pienten palkkien korjaamiseen, mutta ruuvauksen syrjäyttämä puun pinta-ala kasvaa pienilläkin ruuvimäärillä niin suureksi, että se saattaa jopa heikentää palkin kapasiteettia.

11 Yhteenveto

Liimapuurakenteiden suunnittelu vaatii suunnittelijalta hyvää ammattitaitoa ja tuntemusta puurakenteiden toiminnasta. Tämä korostuu erityisesti korjaussuunnittelussa, jossa osa menetelmistä ja tyyppiratkaisuista joudutaan sulkemaan olosuhteiden pakosta pois ja korjausmenetelmien vähäinen määrä hankaloittaa asiaa entisestään. Tässä insinööri-työssä tutkittiin perinteisiä liimapuurakenteiden korjausmenetelmiä, sekä niiden rinnalla uusia, puurakentamisessa vähemmän käytettyjä ratkaisuja.

Tutkimuksen teoriaosuus toteutettiin kirjallisuuslähteiden, sekä A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n työntekijöiden haastatteluiden avulla. Käytännön tutkimusta tehtiin Tampereen Ammattikorkeakoulun tiloissa, missä erilaisia korjausmenetelmiä toteutettiin vaurioituneisiin palkkeihin. Menetelmiä vertailtiin toteutettavuuden, kustannusten, sekä suunnittelun näkökulmasta laatimalla palkeista laskelmia, korjaamalla palkkeja laskelmien sekä arvioiden perusteella, ja lopuksi koestamalla korjatut palkit murtoon saakka.

Tutkimuksen ja koestusten perusteella vahvistus- ja korjausmenetelmiä voitiin karkeasti vertailla keskenään. Tämän vertailun ja hankitun tiedon avulla suunnittelun ohjaus helpottuu esimerkiksi niin, että sopimattomat korjausmenetelmät suljetaan pois vaihtoehtoista ja käytettäväksi valitusta menetelmästä tunnetaan alustavalla tasolla sen heikkoudet sekä hyödyt. Koestustuloksista saatujen kestävyyksien perusteella voidaan ainoastaan kohtisuoran ruuvaus todeta muita selvästi huonommaksi menetelmäksi. Sen sijaan korjausmenetelmistä edukseen erottuivat epoksi injektointi, sekä perinteinen vanerivahvistus. Tuloksia tulkittaessa on kuitenkin otettava huomioon, että korjattujen palkkien laatu vaihtelut vääristävät palkkien murtokuormia, eikä kestävyys keskiarvolla ole näin pienessä otannassa juuri minkäänlaista painoarvoa.

Liimapuupalkkien kestävyyttä saadaan kasvatettua merkittävästi suhteellisen edullisillakin korjaustavoilla ja pienelläkin korjauksella saavutetaan helposti palkin laskennallinen alkuperäiskestävyys. Korjausmenetelmät on kuitenkin syytä tuntea entuudestaan ja niiden sopivuuden määrittäminen kulloiseenkin käyttökohteeseen on suunnittelijan vastuulla.

Huolimatta pientä koestusotantaa vaivaavista laatuvirheistä, saatiin tutkimuksella arvokasta tietoa liimapuupalkkien käyttäytymisestä ja korjaussuunnittelun osa-alueista. Eten-

kin injektointityön suunnitteluun saatiin uutta näkökulmaa ja hyviä neuvoja työn suorittajalta Liimakon Oy:ltä. Uskonkin, että työn tuloksena yrityksen käyttöön laadittu suunnitteluohje, sekä liimapuupalkkien korjausmenetelmistä tehty video tulevat auttamaan liimapuun kanssa tekemisissä olevia suunnittelijoita ja opiskelijoita.

Lähteet

- 1 Liimapuukäsikirja osa 1, Suomen liimapuuyhdistys Ry ja Puuinfo Oy, 2014, Libris Oy, Helsinki, saatavissa <http://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/liimapuukasikirja>.
- 2 Liimapuukäsikirja osa 2, Suomen liimapuuyhdistys Ry ja Puuinfo Oy, 2014, Libris Oy, Helsinki, saatavissa <http://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/liimapuukasikirja>.
- 3 Liimapuukäsikirja osa 3, Suomen liimapuuyhdistys Ry ja Puuinfo Oy, 2014, Libris Oy, Helsinki, saatavissa <http://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/liimapuukasikirja>.
- 4 Puurakenteet. Liimapuu ja liimattu sahatavara. Vaatimukset, SFS-EN 14080:2013, Suomen Standardisointiliitto SFS, Rakennustuoteteollisuus RTT ry, 2013
- 5 Outinen, Salmi, Vulli, Lujuusopin perusteet, Pressus Oy, 2007, Klingendahl Paino Oy, Tampere
- 6 Varkemaa, Keijo, Kantavat puurakenteet, teknikko-opetus, Puuinformaatio Oy, 1991, Rakentajain Kustannus Oy, Helsinki
- 7 Siikanen, Unto, Rakennusaineoppi, Rakennustieto Oy, 2009, Kolofon Baltic OÜ, Viro
- 8 RIL 153 Liimapuurakenteet, Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry, 1984, Otapaino, Espoo
- 9 Puurakenteiden jäykistyksen ja halkeilun hallinta, Suunnittelu- ja valmistusohjeet, RIL 244-2007, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2007, Hakapaino Oy, Helsinki
- 10 Puurakenteiden suunnitteluohje eurokoodi EN 1995-1-1, RIL 205-1-2009, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2009, Hansaprint Oy, Vantaa
- 11 Puurakenteiden halkeilun hallinta, VTT, 2006, verkkodokumentti, saatavissa http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2006/halkeilu_2006.pdf
- 12 Hiilikuituvahvistus, Liimakon Oy, verkkodokumentti, <http://www.liimakon.fi/hiilikuituvahvistus>, luettu 25.2.2016
- 13 Liimapuupalkin halkeaman injektointi, Siltojen korjaus, Tiehallinto, verkkodokumentti, <http://alk.tiehallinto.fi/sillat/silko/kansio2/s2431.pdf>, luettu 29.1.2016
- 14 Saarinen, Olli, valokuvat, A-Insinöörit Suunnittelu Oy, 23.3.2016

- 15 iDesigner, SFS Intec, verkkopalvelu, <http://www.idesigner.biz/>, luettu 26.2.2016

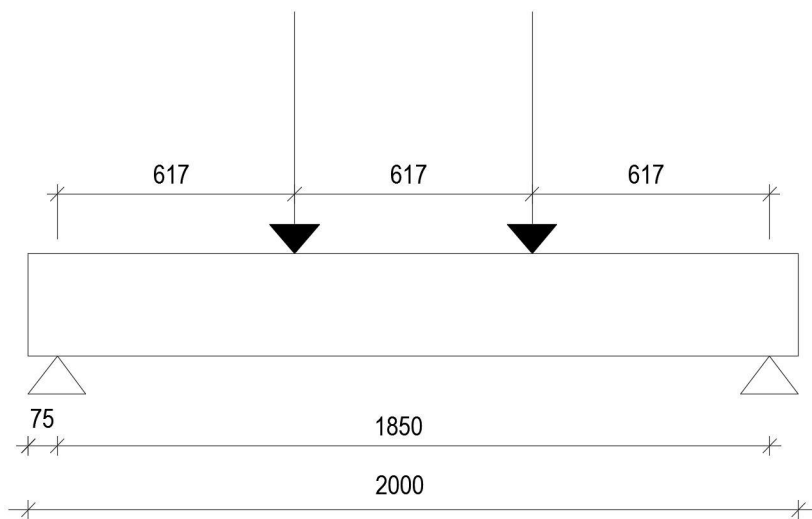
Koesarjan liimapuupalkkien valinta

Laskelmalla osoitetaan koestukseen valittujen palkkien murtumisen tapahtuminen leikkautumalla.

Palkin materiaalitiedot: Lujuusluokka: 32GLc, vastaa vanhaa L40 luokkaa

$$f_{m,k} := 32 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad f_{c,90,k} := 3.00 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{v,k} := 3.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$



Pysyvä kuorma (omapaino): $g_k := 0.1142 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Koestuslaitteen pistekuormat: $Q_{k1} := 52 \text{ kN}$

$$Q_{k2} := 52 \text{ kN}$$

Palkin poikkileikkaus ja mitat:

$L := 1850 \text{ mm}$ (tukien keskipisteiden väli)

$h := 270 \text{ mm}$

$b := 90 \text{ mm}$

Rasitukset:

Tukireaktio tuella:

$$A_y := g_k \cdot \frac{L}{2} + Q_{k1} = 52.106 \cdot \text{kN}$$

Suurin momentti:

$$M_{Ed} := A_y \cdot \frac{L}{3} + g_k \cdot \frac{L}{3} \cdot \frac{3}{2} = 32.154 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Suurin leikkausvoima:

$$V_{Ed} := A_y = 52.106 \cdot \text{kN}$$

Jännitykset:

Taivutusjännitys:

$$W := \frac{b \cdot h^2}{6} = 1.093 \times 10^6 \cdot \text{mm}^3$$

$$\sigma_{m,k} := \frac{M_{Ed}}{W} = 29.404 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Käyttöaste} := \frac{\sigma_{m,k}}{f_{m,k}} = 0.919$$

Leikkausjännitys tuella:

$$\tau_k := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{Ed}}{b \cdot h} = 3.216 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Käyttöaste}_2 := \frac{\tau_k}{f_{v,k}} = 1.005$$

Kiepahdus:

$$l_{ef} := L \quad I_z := \frac{h \cdot b^3}{12} = 1.64 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$$

$$E_{0.05} := 11100 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$G_{0.05} := 630 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\alpha := 0.263 \quad I_{tor} := \alpha \cdot h \cdot b^3 = 5.177 \times 10^7 \cdot \text{mm}^4$$

$$\sigma_{m,crit} := \frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0.05} \cdot I_z \cdot G_{0.05} \cdot I_{tor}}}{l_{ef} \cdot W} = 119.666 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\lambda_{rel,m} := \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0.517$$

$$k_{crit} := 1 \quad \text{kun} \quad \lambda_{rel,m} < 0.75$$

$$k_{crit} \cdot f_{m,k} = 32 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} > \sigma_{m,k} = 29.404 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Käyttöaste}_3 := \frac{\sigma_{m,k}}{k_{crit} \cdot f_{m,k}} = 0.919$$

Tukipaine:

$k_{c,90} := 1.5$

havupuinen liimapuu

$l_{tuki} := 150\text{mm}$

tuen leveys

$a := 0\text{mm}$

palkin pään ylitys tuelta

$l_1 := L - l_{tuki} = 1700\cdot\text{mm}$

tukien välinen sisämitta

$l_{c,90.ef} := l_{tuki} + \min\left(30\text{mm}, a, l_{tuki}, \frac{l_1}{2}\right) = 150\cdot\text{mm}$

$k_{c,ks} := \frac{l_{c,90.ef}}{l_{tuki}} \cdot k_{c,90} = 1.5$

Alaindeksi ks tarkoittaa tässä "kohtisuoraa".

$\sigma_{c,90.d} := \frac{V_{Ed}}{l_{tuki} \cdot b} = 3.86 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
 $k_{c,ks} \cdot f_{c,90.k} = 4.5 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$\text{Käyttöaste}_4 := \frac{\sigma_{c,90.d}}{f_{c,90.k} \cdot k_{c,ks}} = 0.858$

Injektoidun liimapuupalkin kestävyys

Injektoidun liimapuupalkin oletetaan kestävän vähintään yhtä paljon kuormaa kuin alkuperäisen ehjän palkin. Tällöin murtokuormaa voidaan arvioida, kun:

$$\frac{\sigma_{m,k}}{f_{m,k}} = 1 \quad \text{tai} \quad \frac{\tau_k}{f_{v,k}} = 1$$

Leikkausjännityksen kautta:

$$f_{v,k} := 3.2 \frac{N}{mm^2}$$

palkin leikkauslujuus

$$\tau_k := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_k}{b \cdot h} = 3.2 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

leikkausjännitys

$$V_{k,v} := \tau_k \cdot \frac{2}{3} \cdot b \cdot h = 51.84 \cdot kN$$

leikkausvoima jännityksen kautta

$$V_{k,v} := g_k \cdot \frac{L}{2} + q_{k,1} = 51.84 \cdot kN$$

leikkausvoima kuormien kautta

$$q_{k,1} := V_k - g_k \cdot \frac{L}{2} = 51.73 \cdot kN$$

pistekuorma leikkausvoimasta

Taivutusjännityksen kautta:

$$f_{m,k} := 32 \frac{N}{mm^2}$$

palkin taivutuslujuus

$$\sigma_{m,k} := \frac{M_k}{W} = 32 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

taivutusjännitys

$$M_{k,v} := 32 \frac{N}{mm^2} \cdot W = 34.992 \cdot kN \cdot m$$

taivutusmomentti jännityksen kautta

$$M_{k,v} := A_y \cdot \frac{L}{3} + g_k \cdot \frac{L}{3} \cdot \frac{3}{2} = 34.992 \cdot kN \cdot m$$

taivutusmomentti kuormien kautta

$$A_y := \left(M_k - g_k \cdot \frac{L}{3} \cdot \frac{3}{2} \right) \cdot \frac{3}{L} = 56.708 \cdot kN$$

tukireaktio taivutusmomentista

$$q_{k,1,2} := A_y = 56.708 \cdot kN$$

pistekuorma tukireaktiosta

Murtokuorman määrää siis leikkauskestävyys. Lasketusta kestävydestä huolimatta taulukoissa ilmoitetut arvot materiaalin lujuuksille ottavat huomioon halkeilua ja muita materiaaliveirheitä. Näin ollen liimapuupalkkien todellinen lujuus on suurella todennäköisyydellä korkeampi kuin laskelmat osoittavat.

Liimapuupalkin vahvistaminen vaneroimalla

1(2)

Koesarjan halkaistu liimapuupalkki vahvistetaan vaneroimalla palkin molemmat kyljet leikkausvoiman alueelta. Kiinnitettävät vanerit ovat 12mm paksua suomalaista koivuvaneria ja ne kiinnitetään 4,2mm x 45mm täyskierteisillä ruuveilla. Lasketut pistekuorman kestävyyydet koskevat koestustilannetta, joka on esitelty raportissa.

Liimapuupalkin mitat:

$$b := 90\text{mm} \quad h := 270\text{mm} \quad \underline{L} := 1850\text{mm}$$

Liimapuupalkin GL32c leikkauskestävyys:

$$f_{v,k} := 3.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Suomalaisen 12 mm paksun koivuvanerin tasoleikkauskestävyys heikoimmassa suunnassa:

$$f_{t,k} := 2.3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Kun vanerit ruuvataan molemmin puolin liimapuupalkkia:

$$2 \cdot f_{t,k} = 4.6 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} > f_{v,k} = 3.2 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Käytetyt ruuvit ovat kooltaan Rothoblaasin HBS445 ja HBS4545 ruuvien välillä.

HBS445 on 4mm x 45mm

HBS4545 on 4,5mm x 45mm

$$R_{v,k,4} := 0.93\text{kN}$$

Yhden ruuvin leikkauskestävyys ruuville HBS445

$$R_{v,k,4,5} := 1.06\text{kN}$$

Yhden ruuvin leikkauskestävyys ruuville HBS4545

Käytetään yhden ruuvin kestävyytensä:

$$R_{v,k} := \left(\frac{1.06\text{kN} - 0.93\text{kN}}{5} \right) \cdot 2 + 0.93\text{kN} = 0.982 \cdot \text{kN}$$

Ruuveja tarvitaan siis leikkausvoimaa vastaan:

$$V_k := 51.84\text{kN}$$

ehjän liimapuupalkin kestävä leikkausvoima

$$\text{ruuvit} := \frac{V_k}{R_{v,k}} = 52.79 \quad \text{kpl}$$

Vahvistetun palkin leikkauskestävyys:

$$V_k := \frac{2}{3} \cdot b \cdot h \cdot 2 \cdot f_{t,k} = 74.52 \cdot \text{kN}$$

Vanerien kestävä leikkausvoima

$$g_k := 0.121 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Palkin oma paino

$$q_{k1} := V_k - g_k \cdot \frac{L}{2} = 74.408 \cdot \text{kN}$$

Vanerien leikkauskestävyyden rajaama suurin pistekuorma

Edellä lasketusta pistekuormasta syntyvä momentti:

$$M_k := q_{k1} \cdot \frac{L}{3} + g_k \cdot \frac{L}{3} \cdot \frac{3}{2} = 45.908 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vanerin mitat:

$$b_v := 12 \text{ mm}$$

$$h_v := 270 \text{ mm}$$

$$W_{\text{vaneri}} := 2 \cdot \frac{(b_v \cdot h_v^2)}{6} = 2.916 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3$$

Vanerien taivutuskestävyys

$$\sigma_m := \frac{M_k}{W_{\text{vaneri}}} = 157.435 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Taivutusjännitys vanereissa

Taivutusjännitys leikkauskestävyyden määäämästä pistekuormasta on huomattavasti vanerien taivutuskestävyyttä suurempi! Lasketaan vanerin taivutuskestävyyden mukainen suurin pistekuorma.

$$f_{m,k,\text{vaneri}} := 41 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vanerin taivutuskestävyys

$$M_{k,v} := 2 \cdot f_{m,k,\text{vaneri}} \cdot W_{\text{vaneri}} = 23.911 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vanerien kestävä taivutusmomentti

$$M_{k,gk} := g_k \cdot \frac{L}{3} \cdot \frac{3}{2} = 0.023 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Omasta painosta aiheutuva momentti

$$q_{k1.1} := (M_{k,v} - M_{k,gk}) \cdot \frac{3}{L} = 38.738 \cdot \text{kN}$$

Vanerien taivutuskestävyyden rajaama suurin pistekuorma

Liimapuupalkin vahvistaminen ruuvaamalla

Koesarjan halkaistuista liimapuupalkeista 2 kpl vahvistetaan ruuvaamalla. Toinen palkeista ruuvaataan kohtisuoraan vasten lamellien pituussuuntaa ja toinen 45 asteen kulmassa. Ruuvaamiseen käytetään Rothoblaasin VGZ-ruuveja. Lasketut pistekuorman kestävyys koskevat koestustilannetta, joka on esitelty raportissa.

Liimapuupalkin mitat:

$$b := 90\text{mm} \quad h := 270\text{mm} \quad L := 1850\text{mm}$$

Ruuvauksen lamellien pituussuuntaa vastaan kohtisuorassa, periaate esitetty raportissa:

Rothoblaas VGZ720

$$R_{v,k} := 4.27\text{kN}$$

Taulukoitu arvo, yhden ruuvin leikkauskapasiteetti

$$f_{v,k} := 3.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = \tau_k := 3.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

GL32c liimapuupalkin ominaisleikkauslujuus on myös suurin sallittu leikkausjännitys

$$V_k := \frac{2}{3} \cdot \tau_k \cdot b \cdot h = 51.84 \cdot \text{kN}$$

Ehjän liimapuupalkin kestävä leikkausvoima

$$g_k := 0.1142 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Liimapuupalkin omapaino

$$q_{k1} := V_k - g_k \cdot \frac{L}{2} = 51.734 \cdot \text{kN}$$

Liimapuun leikkauskestävyyden rajaama suurin pistekuorma

Otetaan koko leikkausvoima ruuveilla vastaan:

$$\frac{V_k}{R_{v,k}} = 12.141 \quad \text{kpl}$$

Ruuveja tarvittaisiin 13 kappaletta molemmille leikkausvoimien alueille.

Ruuveja on molempien leikkausvoimien alueella 23 kpl. joten ruuvien teoreettinen kapasiteetti on:

$$23 \cdot R_{v,k} = 98.21 \cdot \text{kN} > V_k = 51.84 \cdot \text{kN}$$

Ruuvien kestävyys on huomattavasti puun kestävyyttä suurempi

Tarkistetaan palkin taivutuskestävyyden ylittävä pistekuorma:

$$W := \frac{b \cdot h^2}{6} = 1.093 \times 10^6 \cdot \text{mm}^3$$

$$f_{m,k} := 32 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = \sigma_m := 32 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

GL32c liimapuupalkin ominaistaivutuslujuus on myös suurin sallittu taivutusjännitys

$$M_k := \sigma_m \cdot W = 34.992 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Ehjän liimapuupalkin kestävä taivutusmomentti

$$q_{k1.1} := \left(M_k - g_k \cdot \frac{L}{3} \cdot \frac{3}{2} \right) \cdot \frac{3}{L} = 56.71 \cdot \text{kN}$$

Liimapuun taivutuskestävyyden rajaama suurin pistekuorma

Ruuvaus 45 asteen kulmassa lamellien pituussuuntaan nähden, periaate esitetty raportissa:

Rothoblaas VGZ7340

$$R_{v,k,s} := 8.72 \text{ kN}$$

Taulukoitu arvo, yhden 45 asteen kulmaan ruuvatun ruuvin liukuminen lamelliväleillä

$$V_k = 51.84 \cdot \text{kN}$$

Ehjän liimapuupalkin kestävä leikkausvoima

Lamellit pyrkivät liukumaan toisiinsa nähden, otetaan leikkausvoima vastaan ruuveilla.

$$\frac{V_k}{R_{v,k,s}} = 5.945 \quad \text{kpl}$$

Ruueja tarvittaisiin 6 kappaletta liukumista vastaan. VGZ7340 ruuvien leikkauskestävyys on sama kuin VGZ7260:n ja koska ruueja on 23 kappaletta molemmilla leikkausalueilla, ei ruuvien leikkautuminen tai liukuminen ole todennäköistä

$$23 \cdot R_{v,k,s} = 200.56 \cdot \text{kN} > V_k = 51.84 \cdot \text{kN}$$

Palkki halkeaa leikkauksesta tai murtuu taivutuksesta huomattavasti ennen ruuvien leikkautumista tai liukumista.

Arviot materiaalikustannuksista

Laminointi

Tuote	Pakkaus	Käytetty	Hinta / kpl	Hinta
Epilam 2017/2018	5 + 1,5 kg	0,5	110,0 €	55,0 €
Hiili UD 200 mm, 300g	1 m	12,5	4,5 €	56,3 €
Ilmanpoistotela 12x70	1	1	12,8 €	12,8 €
Yhteensä				124,1 €

Hiilikuituliimaus

Tuote	Pakkaus	Käytetty	Hinta / kpl	Hinta
Adekit H9951	0,5 + 0,31 kg	1	31,3 €	31,3 €
Hiilikuitulevy 1,2 mm	500 x 600 mm	1	105,0 €	105,0 €
Yhteensä				136,3 €

Hiilikuituruuvaus

Tuote	Pakkaus	Käytetty	Hinta / kpl	Hinta
Hobau ruuvi 4,2 x 45	500	192	0,01 €	2,4 €
Hiilikuitulevy 1,2 mm	500 x 600 mm	1	105,0 €	105,0 €
Yhteensä				107,4 €

Ruuvaus

Tuote	Pakkaus	Käytetty	Hinta / kpl	Hinta
Rothoblaas VGZ7340	25	46	2,50 €	115,0 €
Yhteensä				115,0 €

Vanerointi

Tuote	Pakkaus	Käytetty	Hinta / kpl	Hinta
Hobau ruuvi 4,2 x 45	500	200	0,01 €	2,5 €
Koivuvaneri 12 mm	12 x 1220 x 2440 mm	1,08	8,6 €	9,3 €
Polyuret. Liima	1	1	18,0 €	18,0 €
Yhteensä				29,8 €

PU liimaus

Tuote	Pakkaus	Käytetty	Hinta / kpl	Hinta
Polyuret. Liima	1	1	18,0 €	18,0 €
Yhteensä				18,0 €

Test report

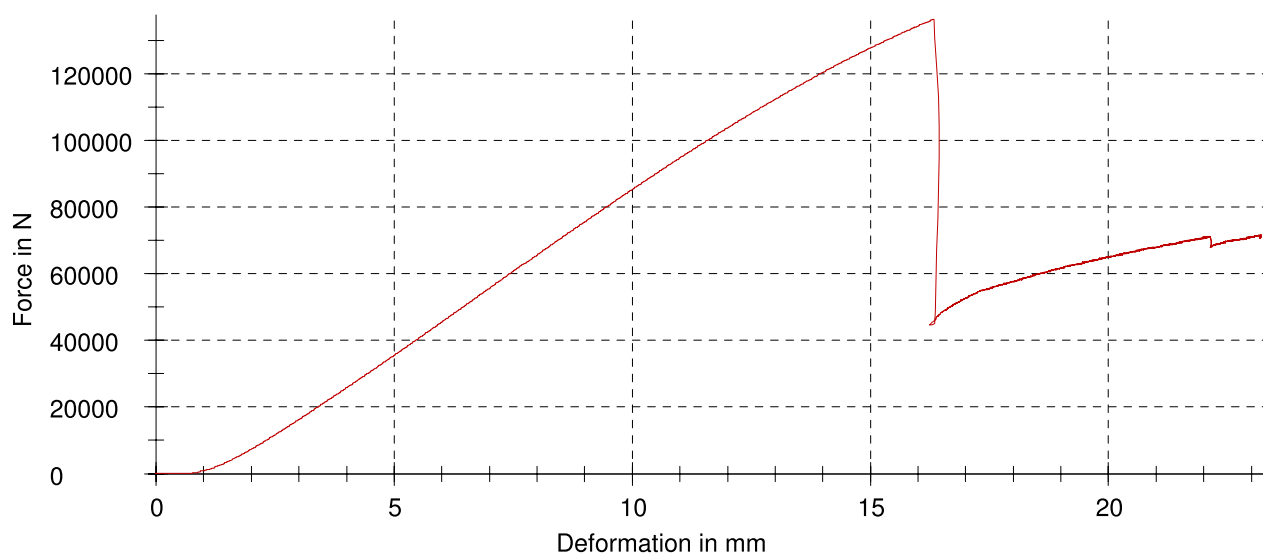
Customer : Specimen type :
Job no. : Pre-treatment :
Test standard : Tester :
Type and designation of : Note :
Material : Machine data :
Specimen removal :

Pre-load : 50 N
Speed, bending modulus : 0,08 MPa/s
Test speed : 0,08 MPa/s

Test results:

Nr	E _f MPa	σ _{0.2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
1	6870	29,6	39,0	136,44	-	-	268	90	24120,00

Series graph:



Statistics:

Series	E _f MPa	σ _{0.2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
n = 1	MPa	MPa	MPa	kN	MPa	mm	mm	mm	mm ²
\bar{x}	6870	29,6	39,0	136,44	-	-	268	90	24120,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Test report

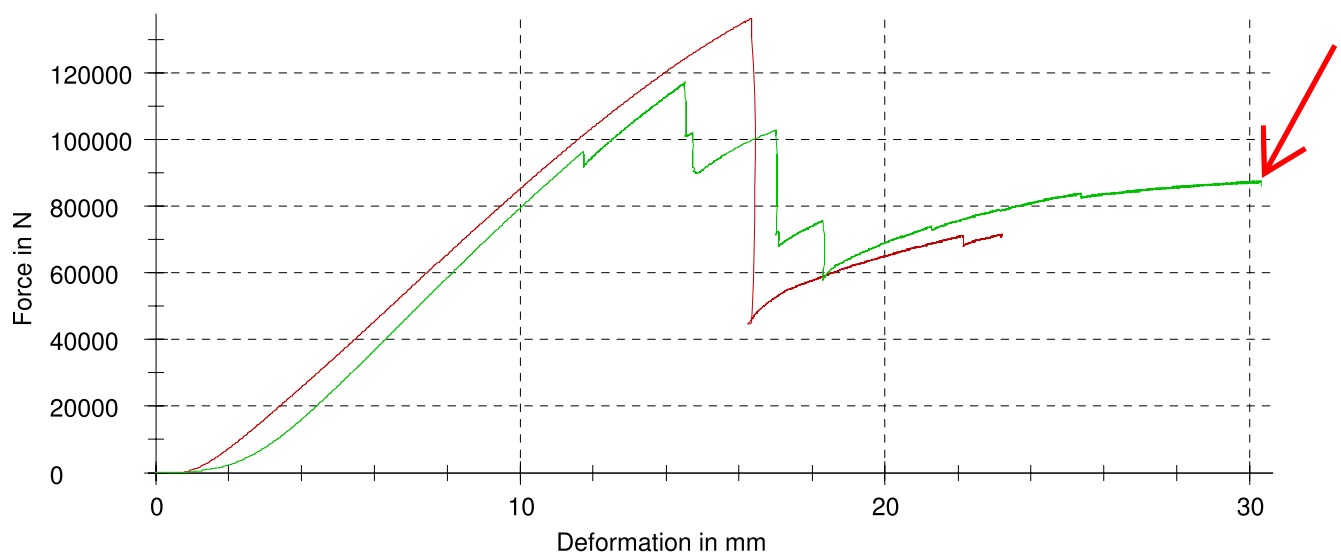
Customer : Specimen type :
Job no. : Pre-treatment :
Test standard : Tester :
Type and designation of : Note :
Material : Machine data :
Specimen removal :

Pre-load : 50 N
Speed, bending modulus : 0,08 MPa/s
Test speed : 0,08 MPa/s

Test results:

Nr	E _f MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
1	6870	29,6	39,0	136,44	-	-	268	90	24120,00
2	7350	28,9	33,5	117,16	24,6	30,3	268	90	24120,00

Series graph:



Statistics:

Series	E _f MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
n = 2	MPa	MPa	MPa	kN	MPa	mm	mm	mm	mm ²
x	7110	29,3	36,2	126,80	24,6	30,3	268	90	24120,00
s	340	0,461	3,90	13,63	-	-	0,000	0,000	0,00
v	4,78	1,57	10,75	10,75	-	-	0,00	0,00	0,00

Test report

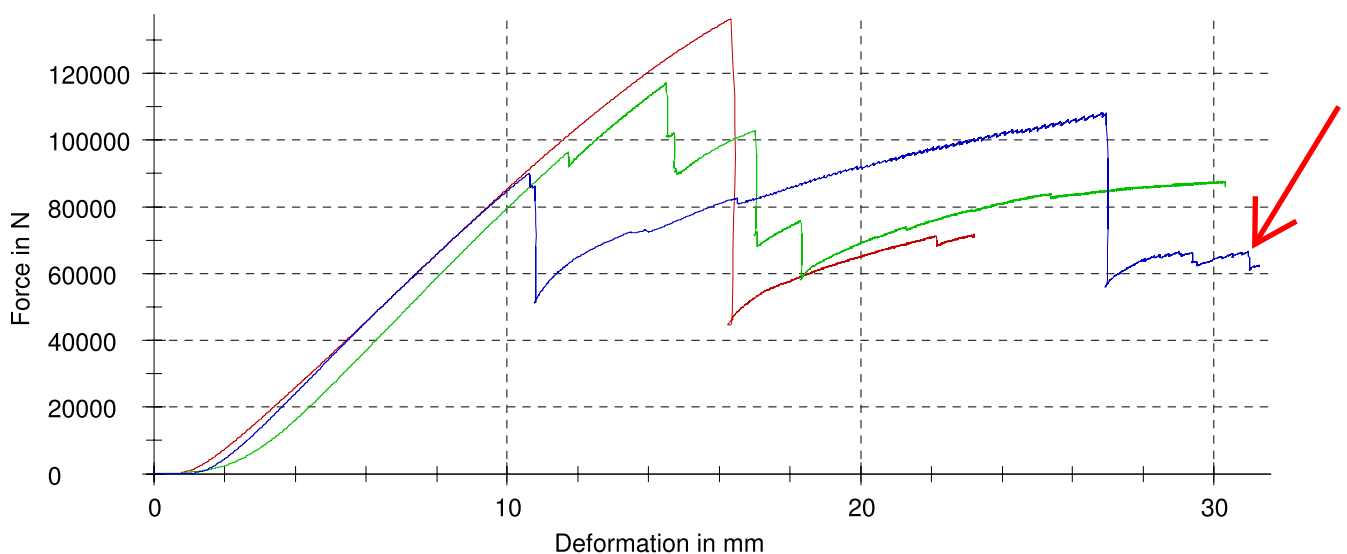
Customer : Specimen type :
Job no. : Pre-treatment :
Test standard : Tester :
Type and designation of : Note :
Material : Machine data :
Specimen removal :

Pre-load : 50 N
Speed, bending modulus : 0,08 MPa/s
Test speed : 0,08 MPa/s

Test results:

Nr	E _f MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
1	6870	29,6	39,0	136,44	-	-	268	90	24120,00
2	7350	28,9	33,5	117,16	24,6	30,3	268	90	24120,00
3	7370	20,0	30,9	108,06	-	-	268	90	24120,00

Series graph:



Statistics:

Series	E _f MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
n = 3	MPa	MPa	MPa	kN	MPa	mm	mm	mm	mm ²
x	7190	26,2	34,5	120,55	24,6	30,3	268	90	24120,00
s	283	5,35	4,14	14,49	-	-	0,000	0,000	0,00
v	3,94	20,41	12,02	12,02	-	-	0,00	0,00	0,00

Test report

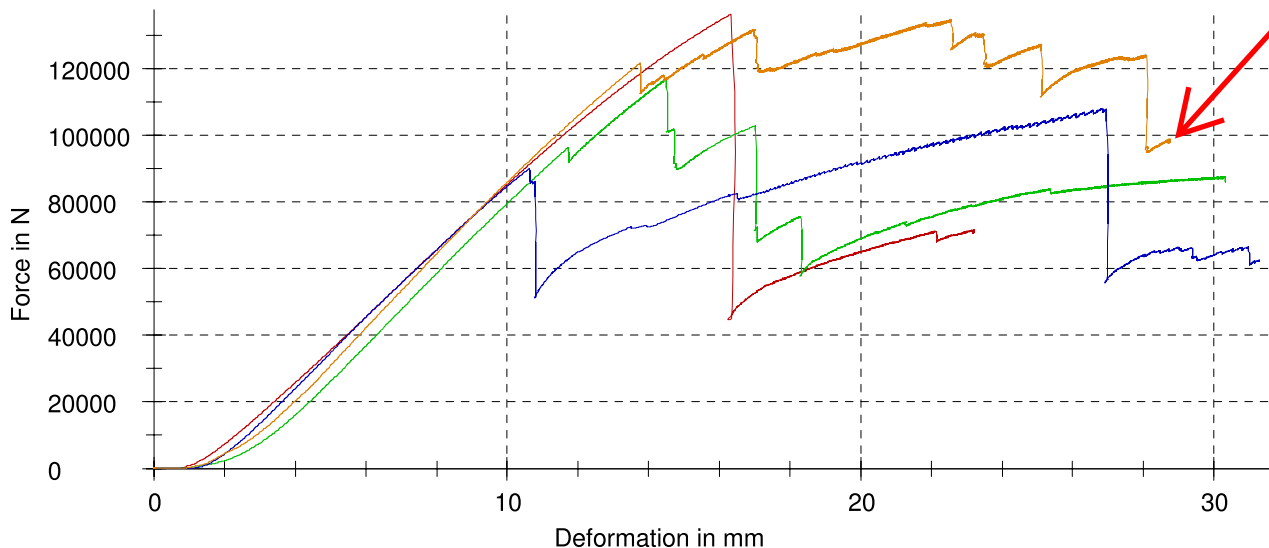
Customer : Specimen type :
Job no. : Pre-treatment :
Test standard : Tester :
Type and designation of : Note :
Material : Machine data :
Specimen removal :

Pre-load : 50 N
Speed, bending modulus : 0,08 MPa/s
Test speed : 0,08 MPa/s

Test results:

Nr	E _f MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
1	6870	29,6	39,0	136,44	-	-	268	90	24120,00
2	7350	28,9	33,5	117,16	24,6	30,3	268	90	24120,00
3	7370	20,0	30,9	108,06	-	-	268	90	24120,00
4	7830	34,2	38,5	134,74	-	-	268	90	24120,00

Series graph:



Statistics:

Series	E _f MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
n = 4									
x	7350	28,2	35,5	124,10	24,6	30,3	268	90	24120,00
s	392	5,92	3,94	13,79	-	-	0,000	0,000	0,00
v	5,33	21,00	11,12	11,12	-	-	0,00	0,00	0,00

Test report

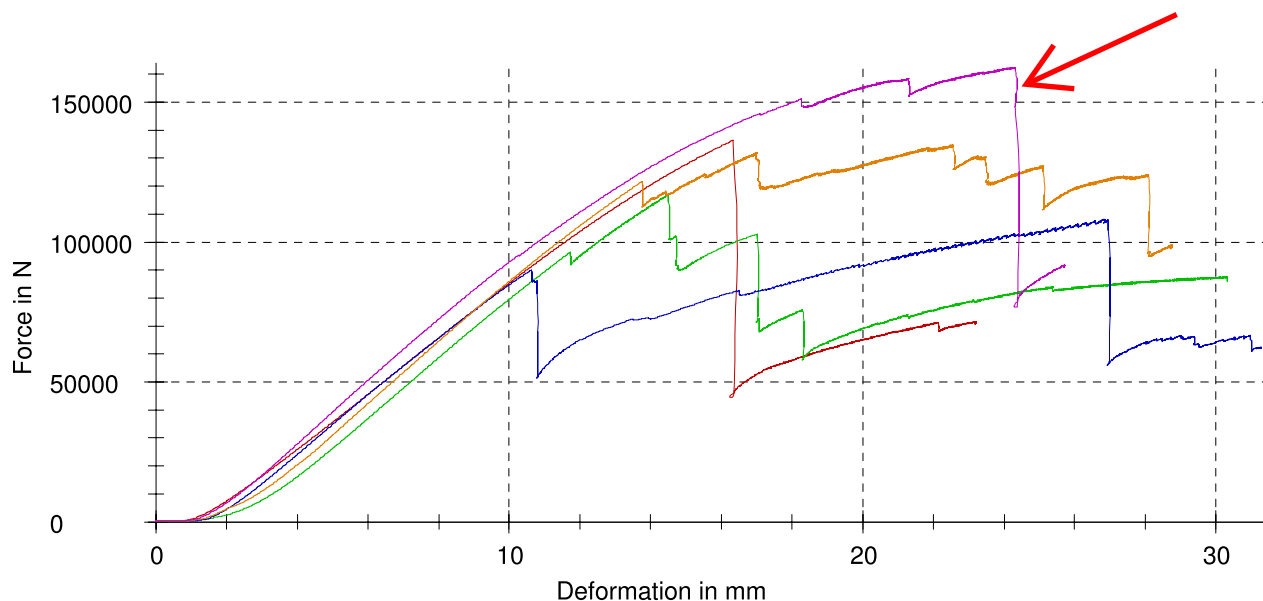
Customer : Specimen type :
Job no. : Pre-treatment :
Test standard : Tester :
Type and designation of : Note :
Material : Machine data :
Specimen removal :

Pre-load : 50 N
Speed, bending modulus : 0,08 MPa/s
Test speed : 0,08 MPa/s

Test results:

Nr	E _f MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
1	6870	29,6	39,0	136,44	-	-	268	90	24120,00
2	7350	28,9	33,5	117,16	24,6	30,3	268	90	24120,00
3	7370	20,0	30,9	108,06	-	-	268	90	24120,00
4	7830	34,2	38,5	134,74	-	-	268	90	24120,00
5	7820	44,1	46,5	162,63	-	-	268	90	24120,00

Series graph:



Statistics:

Series	E _f MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
n = 5									
x	7450	31,4	37,7	131,80	24,6	30,3	268	90	24120,00
s	399	8,76	5,99	20,97	-	-	0,000	0,000	0,00
v	5,36	27,92	15,91	15,91	-	-	0,00	0,00	0,00

Test report

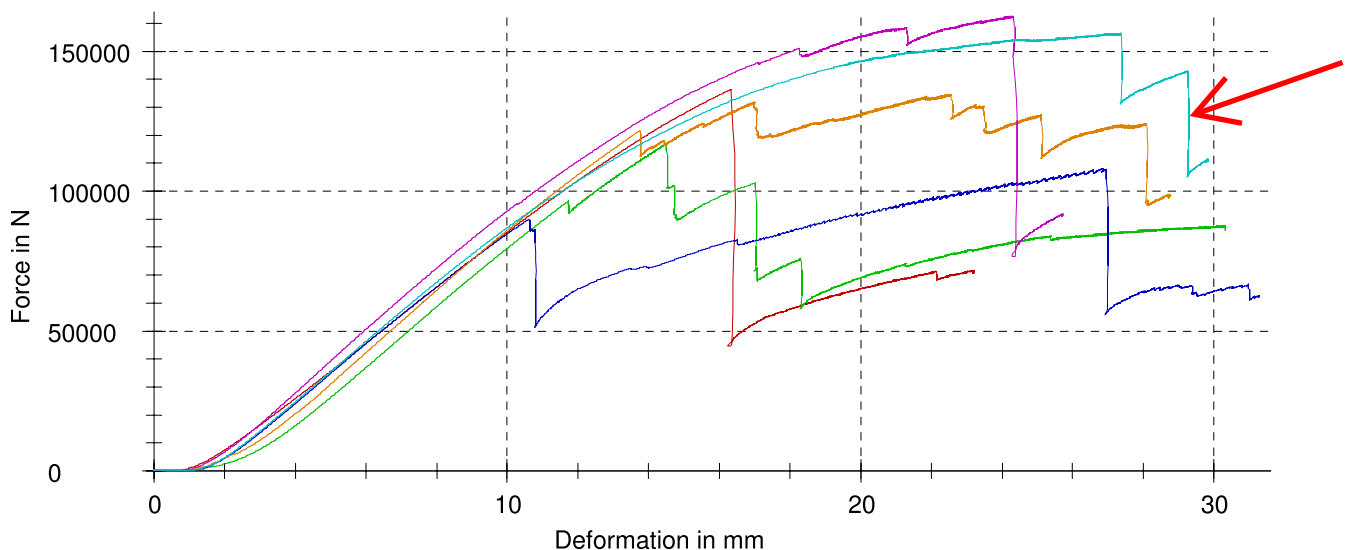
Customer : Specimen type :
Job no. : Pre-treatment :
Test standard : Tester :
Type and designation of : Note :
Material : Machine data :
Specimen removal :

Pre-load : 50 N
Speed, bending modulus : 0,08 MPa/s
Test speed : 0,08 MPa/s

Test results:

Nr	E _f MPa	σ _{0.2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
1	6870	29,6	39,0	136,44	-	-	268	90	24120,00
2	7350	28,9	33,5	117,16	24,6	30,3	268	90	24120,00
3	7370	20,0	30,9	108,06	-	-	268	90	24120,00
4	7830	34,2	38,5	134,74	-	-	268	90	24120,00
5	7820	44,1	46,5	162,63	-	-	268	90	24120,00
6	7390	41,8	44,7	156,42	-	-	268	90	24120,00

Series graph:



Statistics:

Series n = 6	E _f MPa	σ _{0.2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
\bar{x}	7440	33,1	38,9	135,91	24,6	30,3	268	90	24120,00
s	358	8,91	6,08	21,28	-	-	0,000	0,000	0,00
v	4,81	26,91	15,65	15,65	-	-	0,00	0,00	0,00

Test report

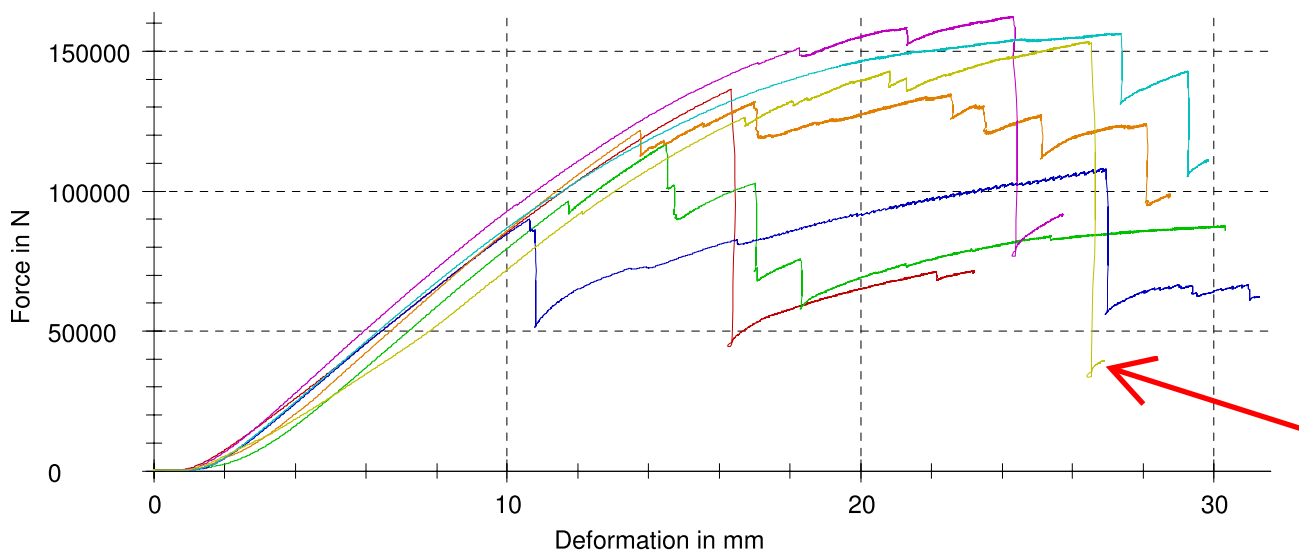
Customer : Specimen type :
Job no. : Pre-treatment :
Test standard : Tester :
Type and designation of : Note :
Material : Machine data :
Specimen removal :

Pre-load : 50 N
Speed, bending modulus : 0,08 MPa/s
Test speed : 0,08 MPa/s

Test results:

Nr	E _f MPa	σ _{0.2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
1	6870	29,6	39,0	136,44	-	-	268	90	24120,00
2	7350	28,9	33,5	117,16	24,6	30,3	268	90	24120,00
3	7370	20,0	30,9	108,06	-	-	268	90	24120,00
4	7830	34,2	38,5	134,74	-	-	268	90	24120,00
5	7820	44,1	46,5	162,63	-	-	268	90	24120,00
6	7390	41,8	44,7	156,42	-	-	268	90	24120,00
7	6720	39,2	43,9	153,69	-	-	268	90	24120,00

Series graph:



Statistics:

Series	E _f MPa	σ _{0.2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
n = 7	7330	34,0	39,6	138,45	24,6	30,3	268	90	24120,00
\bar{x}	7330	34,0	39,6	138,45	24,6	30,3	268	90	24120,00
s	425	8,45	5,88	20,55	-	-	0,000	0,000	0,00
v	5,79	24,88	14,84	14,84	-	-	0,00	0,00	0,00

Test report

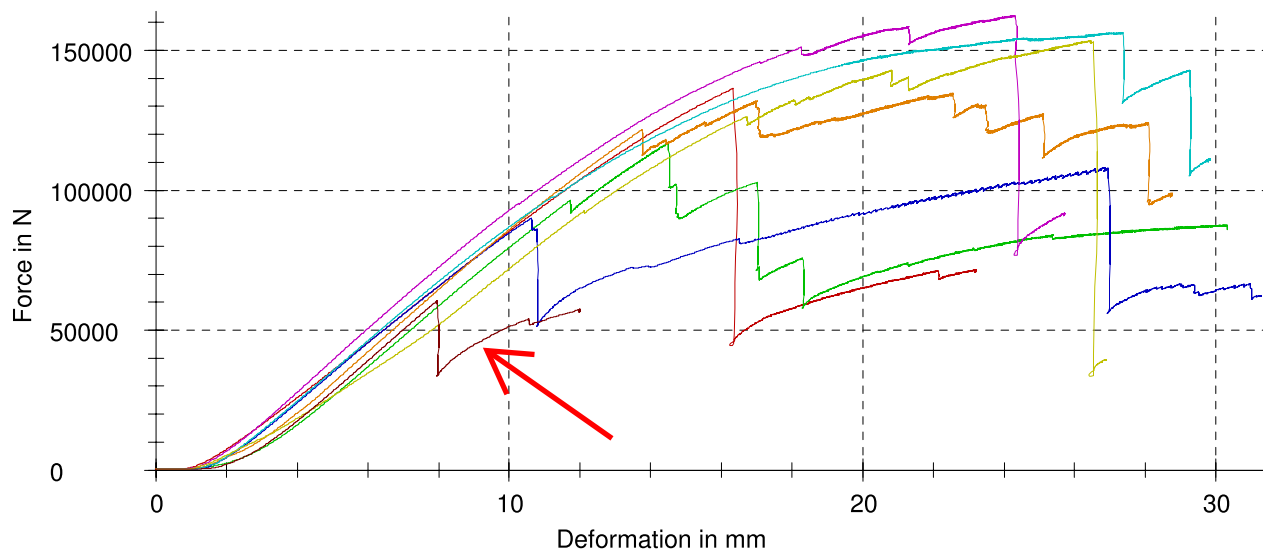
Customer : Specimen type :
Job no. : Pre-treatment :
Test standard : Tester :
Type and designation of : Note :
Material : Machine data :
Specimen removal :

Pre-load : 50 N
Speed, bending modulus : 0,08 MPa/s
Test speed : 0,08 MPa/s

Test results:

Nr	E _f MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
1	6870	29,6	39,0	136,44	-	-	268	90	24120,00
2	7350	28,9	33,5	117,16	24,6	30,3	268	90	24120,00
3	7370	20,0	30,9	108,06	-	-	268	90	24120,00
4	7830	34,2	38,5	134,74	-	-	268	90	24120,00
5	7820	44,1	46,5	162,63	-	-	268	90	24120,00
6	7390	41,8	44,7	156,42	-	-	268	90	24120,00
7	6720	39,2	43,9	153,69	-	-	268	90	24120,00
8	8000	-	17,3	60,38	-	-	268	90	24120,00

Series graph:



Statistics:

Series	E_f	$\sigma_{0.2}$	σ_{fM}	F	σ_{fB}	ε_{fB}	h	b	A_0
n = 8	MPa	MPa	MPa	kN	MPa	mm	mm	mm	mm ²
x	7420	34,0	36,8	128,69	24,6	30,3	268	90	24120,00
s	458	8,45	9,58	33,52	-	-	0,000	0,000	0,00
v	6,18	24,88	26,05	26,05	-	-	0,00	0,00	0,00

Test report

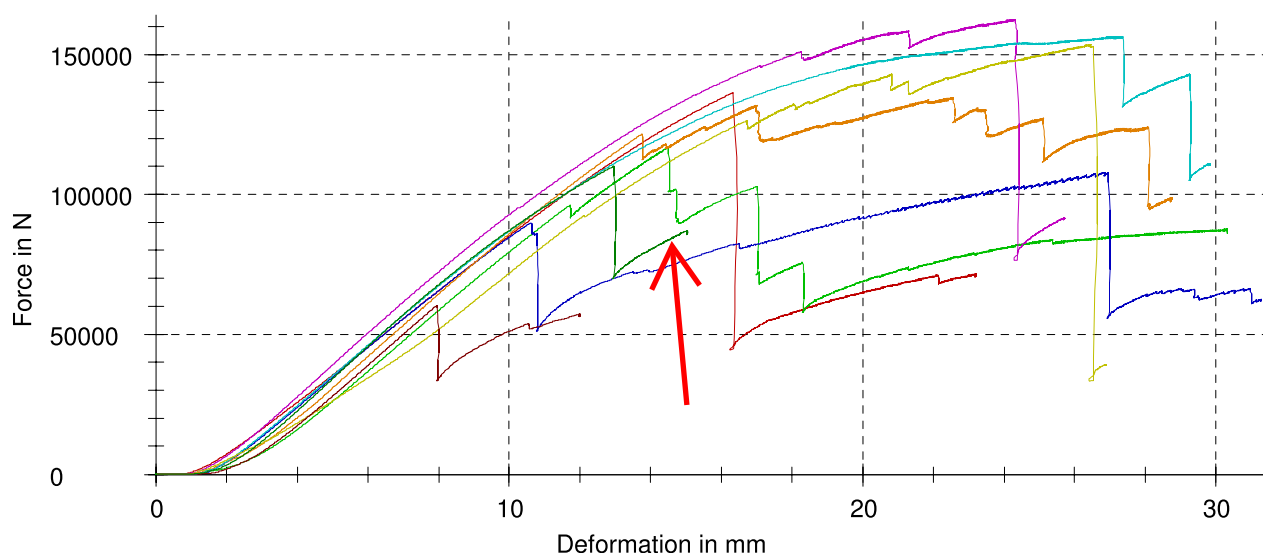
Customer : Specimen type :
Job no. : Pre-treatment :
Test standard : Tester :
Type and designation of : Note :
Material : Machine data :
Specimen removal :

Pre-load : 50 N
Speed, bending modulus : 0,08 MPa/s
Test speed : 0,08 MPa/s

Test results:

Nr	E _f MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
1	6870	29,6	39,0	136,44	-	-	268	90	24120,00
2	7350	28,9	33,5	117,16	24,6	30,3	268	90	24120,00
3	7370	20,0	30,9	108,06	-	-	268	90	24120,00
4	7830	34,2	38,5	134,74	-	-	268	90	24120,00
5	7820	44,1	46,5	162,63	-	-	268	90	24120,00
6	7390	41,8	44,7	156,42	-	-	268	90	24120,00
7	6720	39,2	43,9	153,69	-	-	268	90	24120,00
8	8000	-	17,3	60,38	-	-	268	90	24120,00
9	7900	20,6	31,5	110,22	-	-	268	90	24120,00

Series graph:



Statistics:

Series	E_f	$\sigma_{0.2}$	σ_{fM}	F	σ_{fB}	ϵ_{fB}	h	b	A_0
n = 9	MPa	MPa	MPa	kN	MPa	mm	mm	mm	mm ²
x	7470	32,3	36,2	126,64	24,6	30,3	268	90	24120,00
s	457	9,14	9,14	31,96	-	-	0,000	0,000	0,00
v	6,12	28,29	25,23	25,23	-	-	0,00	0,00	0,00

Test report

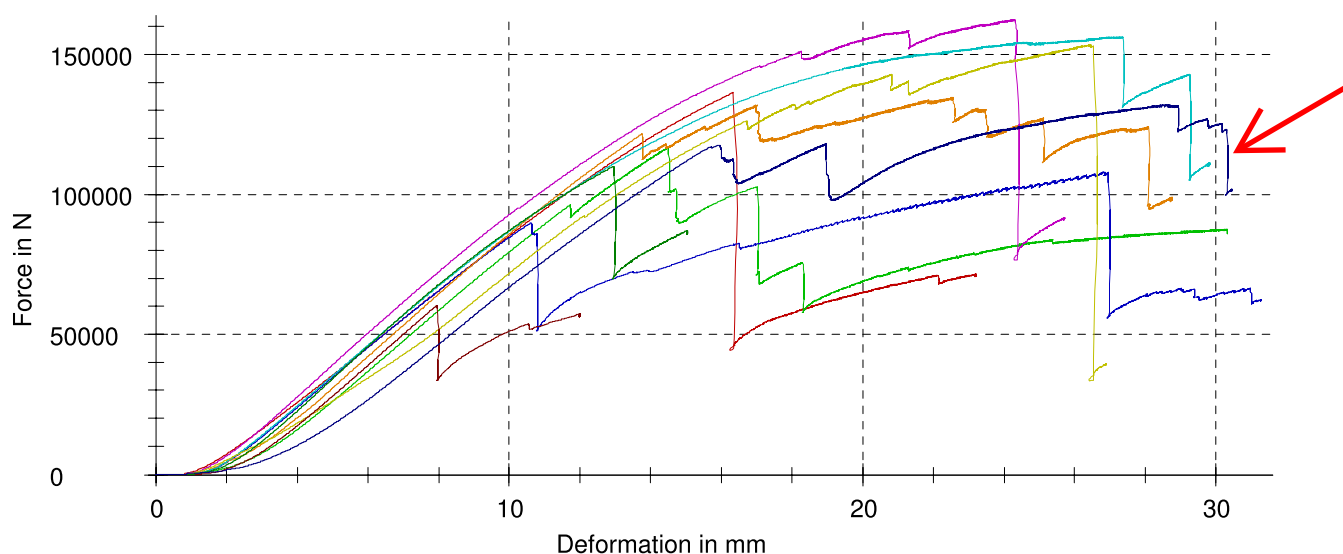
Customer : Specimen type :
Job no. : Pre-treatment :
Test standard : Tester :
Type and designation of : Note :
Material : Machine data :
Specimen removal :

Pre-load : 50 N
Speed, bending modulus : 0,08 MPa/s
Test speed : 0,08 MPa/s

Test results:

Nr	E _f MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
1	6870	29,6	39,0	136,44	-	-	268	90	24120,00
2	7350	28,9	33,5	117,16	24,6	30,3	268	90	24120,00
3	7370	20,0	30,9	108,06	-	-	268	90	24120,00
4	7830	34,2	38,5	134,74	-	-	268	90	24120,00
5	7820	44,1	46,5	162,63	-	-	268	90	24120,00
6	7390	41,8	44,7	156,42	-	-	268	90	24120,00
7	6720	39,2	43,9	153,69	-	-	268	90	24120,00
8	8000	-	17,3	60,38	-	-	268	90	24120,00
9	7900	20,6	31,5	110,22	-	-	268	90	24120,00
10	6920	31,6	37,7	132,00	-	-	268	90	24120,00

Series graph:



Statistics:

Series n = 10	E_f MPa	$\sigma_{0.2}$ MPa	σ_{fM} MPa	F kN	σ_{fB} MPa	ϵ_{fB} mm	h mm	b mm	A_0 mm ²
x	7410	32,2	36,4	127,17	24,6	30,3	268	90	24120,00
s	465	8,55	8,63	30,18	-	-	0,000	0,000	0,00
v	6,27	26,54	23,73	23,73	-	-	0,00	0,00	0,00

Test report

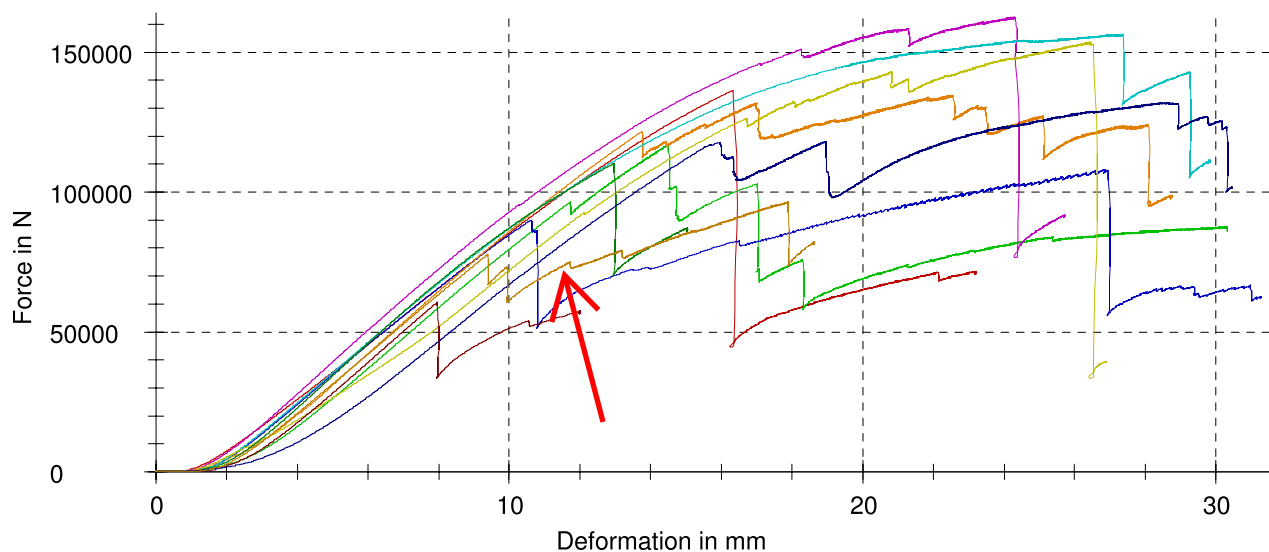
Customer : Specimen type :
Job no. : Pre-treatment :
Test standard : Tester :
Type and designation of : Note :
Material : Machine data :
Specimen removal :

Pre-load : 50 N
Speed, bending modulus : 0,08 MPa/s
Test speed : 0,08 MPa/s

Test results:

Nr	E _f MPa	σ _{0.2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
1	6870	29,6	39,0	136,44	-	-	268	90	24120,00
2	7350	28,9	33,5	117,16	24,6	30,3	268	90	24120,00
3	7370	20,0	30,9	108,06	-	-	268	90	24120,00
4	7830	34,2	38,5	134,74	-	-	268	90	24120,00
5	7820	44,1	46,5	162,63	-	-	268	90	24120,00
6	7390	41,8	44,7	156,42	-	-	268	90	24120,00
7	6720	39,2	43,9	153,69	-	-	268	90	24120,00
8	8000	-	17,3	60,38	-	-	268	90	24120,00
9	7900	20,6	31,5	110,22	-	-	268	90	24120,00
10	6920	31,6	37,7	132,00	-	-	268	90	24120,00
11	6860	24,4	27,6	96,48	-	-	268	90	24120,00

Series graph:



Statistics:

Series n = 11	E_f MPa	$\sigma_{0.2}$ MPa	σ_{fM} MPa	F kN	σ_{fB} MPa	ϵ_{fB} mm	h mm	b mm	A_0 mm ²
x	7360	31,4	35,6	124,38	24,6	30,3	268	90	24120,00
s	472	8,43	8,60	30,09	-	-	0,000	0,000	0,00
v	6,41	26,83	24,19	24,19	-	-	0,00	0,00	0,00

Test report

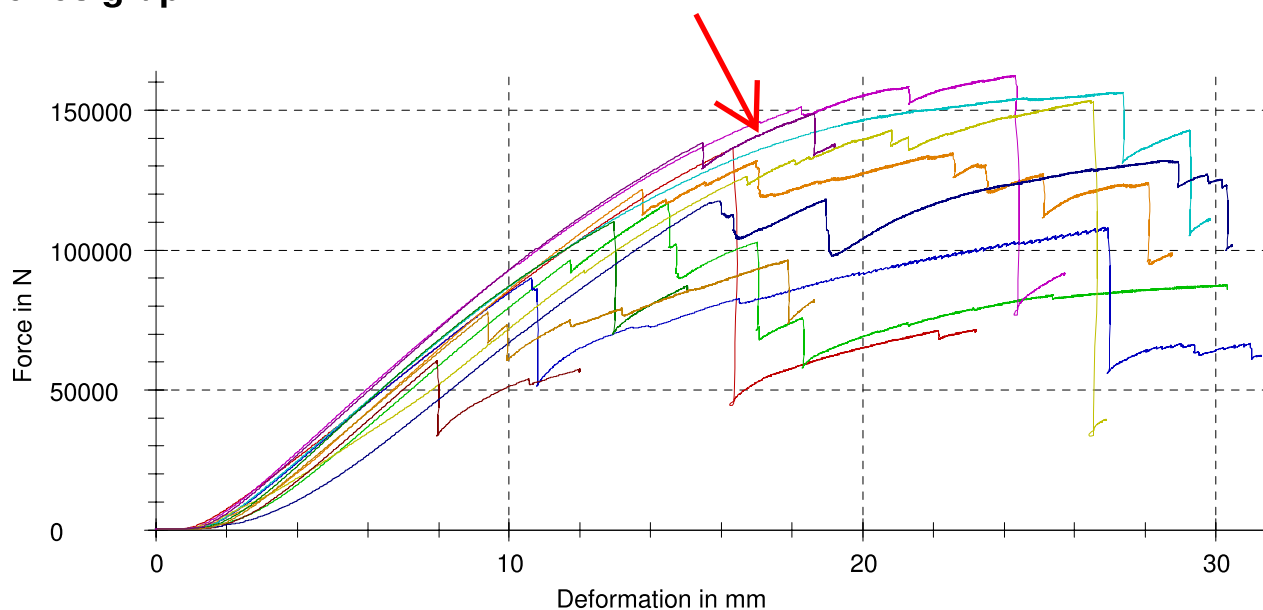
Customer : Specimen type :
Job no. : Pre-treatment :
Test standard : Tester :
Type and designation of : Note :
Material : Machine data :
Specimen removal :

Pre-load : 50 N
Speed, bending modulus : 0,08 MPa/s
Test speed : 0,08 MPa/s

Test results:

Nr	E _f MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{fM} MPa	F kN	σ _{fB} MPa	ε _{fB} mm	h mm	b mm	A ₀ mm ²
1	6870	29,6	39,0	136,44	-	-	268	90	24120,00
2	7350	28,9	33,5	117,16	24,6	30,3	268	90	24120,00
3	7370	20,0	30,9	108,06	-	-	268	90	24120,00
4	7830	34,2	38,5	134,74	-	-	268	90	24120,00
5	7820	44,1	46,5	162,63	-	-	268	90	24120,00
6	7390	41,8	44,7	156,42	-	-	268	90	24120,00
7	6720	39,2	43,9	153,69	-	-	268	90	24120,00
8	8000	-	17,3	60,38	-	-	268	90	24120,00
9	7900	20,6	31,5	110,22	-	-	268	90	24120,00
10	6920	31,6	37,7	132,00	-	-	268	90	24120,00
11	6860	24,4	27,6	96,48	-	-	268	90	24120,00
12	7740	40,1	42,6	148,94	-	-	268	90	24120,00

Series graph:



Statistics:

Series n = 12	E_f MPa	$\sigma_{0.2}$ MPa	σ_{fM} MPa	F kN	σ_{fB} MPa	ε_{fB} mm	h mm	b mm	A_0 mm ²
x	7400	32,2	36,1	126,43	24,6	30,3	268	90	24120,00
s	463	8,42	8,45	29,55	-	-	0,000	0,000	0,00
v	6,26	26,12	23,37	23,37	-	-	0,00	0,00	0,00