

Geklebte Verbindungen für weitgespannte Decken- und Dachtragwerke

Dr. Jan Wenker
Brüninghoff Group
Heiden, Deutschland



Geklebte Verbindungen für weitgespannte Decken- und Dachtragwerke

Das vorliegende Referat gliedert sich in drei Teile, die die aktuellen Aktivitäten der Brüninghoff Group im Bereich geklebter, weitgespannter Tragwerke zusammenfassend vorstellen. Geklebte Kastenelemente aus Furnierschichtholz werden bei der Brüninghoff Holz GmbH & Co. KG im Tagesgeschäft hergestellt. Darüber hinaus befasst sich die Abteilung Nachhaltigkeit & Innovation der Brüninghoff Group im Rahmen von Verbund-Forschungsvorhaben zur Produktentwicklung einerseits mit geklebten Holz-Beton-Verbundkonstruktionen und andererseits mit geklebten Knotenpunkten für aufgelöste Dachtragwerke in der Gestalt von Fachwerkträgern.

1. Geklebte weitgespannte Kastenelemente

Geklebte Kastenelemente bieten eine sehr ressourceneffiziente Möglichkeit, größere Dimensionen im Decken- und Dachbereich zu überspannen. Diese werden bei der Brüninghoff Holz GmbH & Co. KG entsprechend der Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung AbZ Z-9.1-100 gefertigt (Bescheinigung C1 in Verbindung mit DIN 1052-10:2012). Dabei kommt Fichten-Furnierschichtholz «Kerto» des Herstellers Metsä Wood zum Einsatz.

1.1. Produzierte Geometrie

Hauptsächlich produziert werden zusammengesetzte Flächentragwerke mit Rippen (beidseitig geschlossen, Kastenelemente) entsprechend Anlage 3 der AbZ Z-9.1-100 für die Anwendung im Deckenbereich. Dabei bestehen die Rippen aus Kerto LVL S-beam und die Beplankung aus Kerto LVL Q-panel. Je nach Anwendungsfall können diese Elemente bis zu einer Länge von 16 m, einer Breite von 4 m und einer Höhe von 0,9 m hergestellt werden. Die geklebten Kastenelemente liefert die Brüninghoff Holz GmbH & Co. KG als Fertigungsdienstleister für den freien Markt, aber auch für Bauprojekte aus der Brüninghoff Group. Abbildung 1 zeigt fertig produzierte Kastenelemente bei der Verladung auf Wechselbrücken für den Transport.



Abbildung 1: Kastenelemente mit 14 m Länge (Bildquelle: Brüninghoff Group)

1.2. Produktionsprozess

Die Verklebung erfolgt mittels Melamin-Harnstoff-Formaldehyd Klebstoff (MUF). Der verwendete Klebstoff Dynea Prefere 4546 mit Härter Prefere 5022 ist in dieser Kombination im Untermischverfahren mit fugenfüllenden Eigenschaften für Fugen bis 1,5 mm zugelassen. Dies bietet die notwendige Sicherheit, sollten trotz sorgfältigster Vorbereitung der Füge Teile nicht vollständig ideale Fugen entstehen. Die Auftragsmenge ist dabei so bestimmt worden, dass zur ersten visuellen Überprüfung des Verklebungsprozesses an allen Stellen Klebstoff austritt. Der notwendige Pressdruck wird durch Teilgewindeschrauben aufgebracht (Schraubenpressklebung). Hier kommen selbstbohrende Teilgewindeschrauben Würth ASSY®PLUS 4 CSMP in den Längen 6x100 mm beziehungsweise 6x140 mm zum Einsatz, je nach Stärke der Beplankung. Selbstverständlich, aber nicht oft genug zu erwähnen ist, dass der gewindefreie Teil der TG-Schraube länger sein muss als die Dicke der Beplankung um sicherzustellen, dass in der aufzuklebenden Platte kein Schraubengewinde vorhanden ist. Nur so kann Pressdruck aufgebracht werden.

Der Verklebungsprozess selbst findet auf Tischen in einer separaten Produktionshalle statt, die auch im Winter auf 20° C und 55 % relative Luftfeuchte eingestellt ist. Momentan findet der Prozess weitgehend in Handarbeit statt, allerdings sind Schritte zur Automatisierung geplant. Die nachfolgenden Bilder zeigen den Klebstoffauftrag auf die Rippen sowie die Verschraubung der Beplankung mit den Rippen.

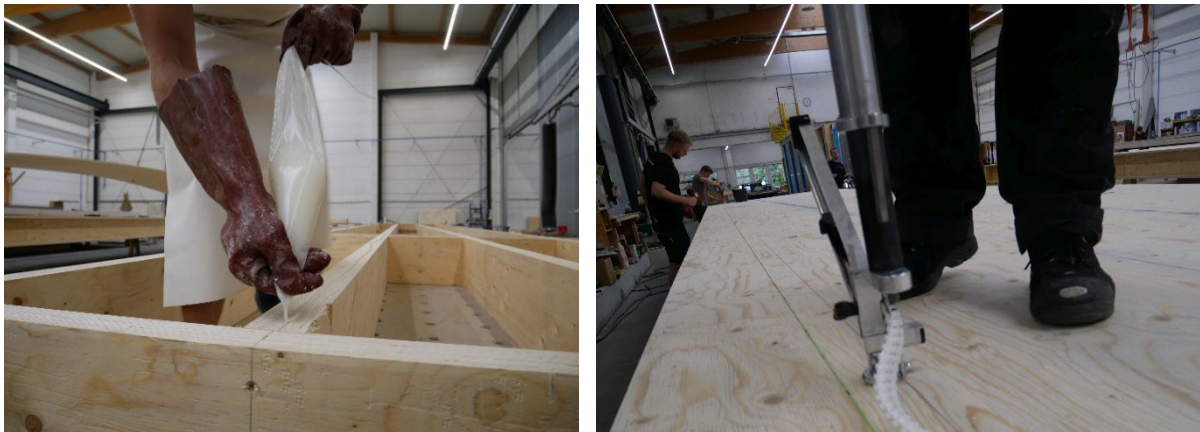


Abbildung 2: Kastenelemente – Klebstoffauftrag und Verschraubung (Bildquelle: Brüninghoff Group)

Klebstoff und Härter werden in der Leimküche im Verhältnis 100:10 Gewichtsteile gemischt und dann bauteilbezogen in Einweg-Kunststoffbeutel gefüllt. So kann die Klebstoffflotte optimal abgewogen und transportiert werden. Beutel mit ausgehärteten Klebstoffresten sind problemlos zu entsorgen. Die Einwegbeutel verursachen zwar Abfall, allerdings entfallen durch diese Methode die Reinigung von Auftragsgeräten und somit eine erhebliche Menge verunreinigten Waschwassers. Vor Ort wird eine Ecke des Beutels aufgeschnitten und die portionierte Menge kann so sehr genau entsprechend der Vorgabe von 700 g/m² auf die Rippen aufgebracht werden. Die Verschraubung erfolgt mittels Magazinschraubern, welche eine gute Ergonomie und Geschwindigkeit des Produktionsprozesses sicherstellen. Der Schraubenabstand wird mit Hilfe einer markierten Schnur eingehalten. Dieses Verfahren hat sich als sehr zielführend, prozesssicher und effizient erwiesen.

1.3. Qualitätssicherung

Entsprechend den Vorgaben der DIN 1052-10 und der AbZ Z-9.1-100 wird eine werkeigene Produktionskontrolle durchgeführt, welche ergänzt wird durch regelmäßige Fremdüberwachung der MPA Stuttgart. Neben fortlaufender und automatisierter Protokollierung des Klimas in Lager- und Produktionsräumen, regelmäßiger Kontrolle der Klebstoffauftragsmenge und Dokumentation im Leimbuch sowie Kontrolle der Klebstofffugendicke mittels Auflichtmikroskop, wird auch die Festigkeit der Verklebung regelmäßig überprüft. Für die Kastenelemente aus Furnierschichtholz werden Scherprüfungen gemäß DIN EN 14080 und Aufstechprüfungen nach Kochwechselbehandlung gemäß DIN EN 14374 durchgeführt.

Dazu ist ein entsprechendes hauseigenes Prüflabor eingerichtet, in dem sämtliche Prüfungen und Dokumentationen rechnergestützt erfolgen. Nachfolgende Abbildung 3 zeigt Teile des Qualitätssicherungsprozesses.



Abbildung 3: Qualitätssicherung – Messung der Klebstofffugendicke, Aufstechprüfung nach Kochwechselbehandlung, Ermittlung der Scherfestigkeit (Bildquelle: Brüninghoff Group)

Die Werkseigene Produktionskontrolle in Verbindung mit der Fremdüberwachung stellt sicher, dass die hohen Anforderungen an den tragenden Holzleimbau erfüllt werden.

2. Forschung an geklebten Holz-Beton-Verbunddecken

Vor dem Hintergrund von einerseits Steigerung der Leistungsfähigkeit des Bauteils und andererseits Effizienz bei der Herstellung von Holz-Beton Verbunddecken bietet die Verklebung von Holz und Beton vielversprechendes Potential. Als Hersteller von Holz-Beton-Verbunddecken ist die Brüninghoff Group daher stets bestrebt, diese Bauweise ständig weiter zu optimieren. In Zusammenarbeit mit u. a. der Technischen Universität Berlin wurden daher Versuche zur Verklebung von HBV-Rippendecken durchgeführt. In diesem Referat wird auf die Groß-Prüfkörper und Durchführung der 4-Punkt Biegeversuche mit 8,1 m Spannweite eingegangen. Über die vorangegangenen kleinmaßstäblichen Scher- und Schub-Biege-Versuche lässt sich im demnächst veröffentlichten Abschlussbericht des Vorhabens lesen (Breidenbach et al., 2022).

Eine Spannweite von 8,1 m wurde gewählt, da diese Spannweite im Hochbau häufig Anwendung findet und hier die Klebetechnik gegenüber anderen Verbindungsmitteln deutliche Vorteile mit sich bringt. Die Dimensionen der Balken wurden durch eine Tragwerksbemessung für übliche Nutzlasten in Wohn- und Bürobauten auf 24 x 28 cm² festgelegt. Die Dicke der Betonplatte wurde für Trockenverklebungen auf 12 cm festgelegt und für Nass-in-Nass Verklebungen auf 10 cm. Im Verbundbauteil ist eine Betonplatte von 10 cm statisch ausreichend, auch für die Erfüllung von Anforderungen an Schallschutz und Schwingungen. Vor dem Fügen ist eine 10 cm dicke Betonplatte mit einer Spannweite von 8,10 m allerdings nur sehr schwer zu handhaben, sodass für die Trockenverklebung eine 12 cm dicke Betonplatte verwendet wurde.

2.1. Prüfkörperherstellung

Die Verklebung von HBV kann auf zwei Weisen durchgeführt werden. Einerseits kann der Beton direkt auf den frisch aufgetragenen Klebstoff eingebracht werden – sogenannte Nass-in-Nass Verklebung – und andererseits können vorgefertigte Betonfertigteile im Nachgang auf das Holz geklebt werden. In vorangegangenen Kleinversuchen wurden beide Varianten mit verschiedenen Klebstoffen durchgeführt und geprüft, ebenso der Einfluss verschiedener Betonoberflächen und Trennmittel. In den in diesem Referat vorgestellten Großversuchen wurde die Verklebung von geschliffenen Fertigteilen mit zwei verschiedenen Klebstoffen untersucht, sowie die Nass-in-Nass-Verklebung mit einem der beiden Klebstoffe.

Die Produktion der Betonfertigteile sowie der Abbund der Brettschichtholzträger erfolgten bei Brüninghoff in Heiden. Die Verklebung von Beton und Holz fanden sowohl bei Brüninghoff als auch an der TU Berlin statt. Die Prüfkörperherstellung ist veranschaulicht in den Abbildungen 4 und 5.



Abbildung 4: Auftrag des Klebstoffs für die Trockenverklebung und Vertiefung im Balken für den flächigen Auftrag des Klebstoffs für die Nass-in-Nass Verklebung (Bildquelle: TU Berlin)



Abbildung 5: Trockenverklebung (Fertigteil-Verklebung) und Nass-in-Nass Verklebung (Betonage auf Klebstoff) (Bildquelle: TU Berlin)

Die Trockenverklebung erforderte ein Vorbereiten der Betonplatte (Schleifen), den Auftrag des Klebstoffes mittels 8 mm Zahnpachtel und das Einsetzen von Abstandshaltern zur Einhaltung einer Mindestdicke der Klebstofffuge. Anschließend wurde die Betonplatte aufgelegt und überschüssiger Klebstoff entfernt.

Bei der Nass-in-Nass Verklebung erfolge zunächst der Klebstoffauftrag in die 2 mm Vertiefung beziehungsweise Tasche des Holzbalkens, sodann das Einlegen der Bewehrung und das Einfüllen des Betons. Bei der Betonage war darauf zu achten, dass der einlaufende Beton den Klebstoff nicht schwallartig verdrängt. Schließlich wurde vorsichtig verdichtet, ohne die frische Klebstoffschicht zu beschädigen.

2.2. Versuchsdurchführung

Die Biegeversuche dienten neben der Erprobung der Klebetechnologie im Bauteilmaßstab (Prüfkörperherstellung unter Praxisbedingungen) der Ermittlung der Bauteilsteifigkeit und der Erforschung des Trag- und Bruchverhaltens unter realen Beanspruchungen. Sie wurden als 4-Punkt-Biegeversuche in Anlehnung an DIN EN 408 (DIN, 2012) durchgeführt.



Abbildung 6: Geklebter HBF-Prüfkörper mit 8,1 m Länge in der Prüfmaschine für den 4-Punkt-Biegeversuch (Bildquelle: TU Berlin)

Die Biegeversuche im Bauteilmaßstab wurden in der Großversuchshalle der TU Berlin durchgeführt (Abbildung 6).

2.3. Ergebnisse und Diskussion

Die Klebung von Holz-Beton-Verbundbauteilen, hier HBV-Decken, wurde innerhalb des Projekts erfolgreich durchgeführt. Die Bauteile versagten stets durch ein Überschreiten der Biegezugfestigkeit des Holzes (Abbildung 7). Ein Versagen der Fuge konnte in keinem Fall beobachtet werden. Die vorangegangenen Kleinversuche zeigen deutlich, dass die Beschaffenheit der Betonoberfläche einen entscheidenden Einfluss auf das Versagensbild der Verbindung hat. Mit geschliffenen Betonfertigteilen sowie mit Betonfertigteilen, welche mit Trennmittel geschalt und nicht weiter vorbereitet wurden, konnten positive Ergebnisse in Scherversuchen erzielt werden. Ohne Trennmittel geschalt Bauteile versagten zu großen Teilen adhäsiv oder zeigten zumindest einen hohen Anteil adhäsiver Bruchflächen. Durch vorheriges Anschleifen des Betons wurden auch große Bauteile erfolgreich geklebt. Die Verklebung von mit Trennmitteln geschalteten Betonfertigteilen wurde aufgrund derzeit unzureichender Kenntnisse über den Einfluss des Trennmittels auf die Dauerhaftigkeit der Klebung in den Bauteilversuchen nicht untersucht.

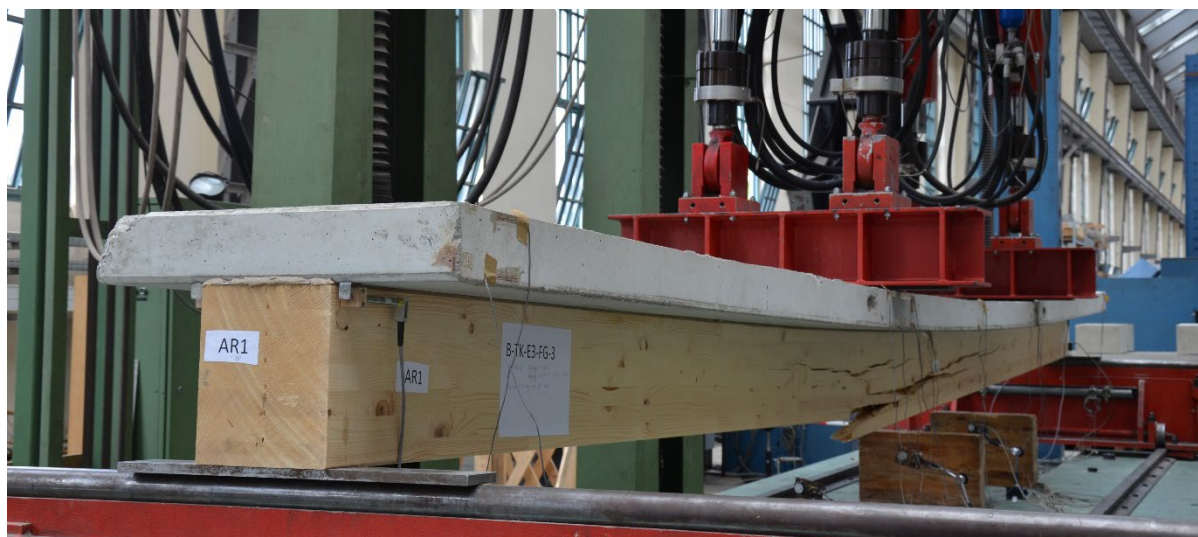


Abbildung 7: Prüfkörper nach Bruchversagen im BSH-Träger (Bildquelle: TU Berlin)

Ebenso wichtig wie die Oberflächenbeschaffenheit ist die Wahl des passenden Klebstoffs. Eine gewisse Steifigkeit des Klebstoffs ist wichtig, damit dieser nicht vom Balken abläuft oder sogar komplett aus der Fuge gedrückt wird, beziehungsweise bei der Nass-in-Nass Verklebung nicht vom Beton verschoben wird. Gleichzeitig muss der Klebstoff weich genug sein und das Holz gut benetzen, um einen schnellen, lückenlosen Auftrag zu gewährleisten. Ein grundsätzlich geeigneter aber im Hinblick auf die Verarbeitungseigenschaften ungünstiger Klebstoff birgt die Gefahren, dass einerseits durch schwierigen Auftrag die offene Zeit des Klebstoffs überschritten wird und andererseits die geplante Klebstoffmenge nicht aufgebracht werden kann. In beiden Fällen leidet die Qualität der Verklebung. Mit einer modifizierten Variante des etablierten Reaktionsharzbetons Compono (Bennert) und mit speziell für das Projekt angefertigtem Klebstoff (Rampf) konnten gleichermaßen erfolgreich Bauteile geklebt werden. Bei beiden Produkten handelt es sich um mineralisch gefüllte, zweikomponentige Epoxidharze. Die Verarbeitungseigenschaften des auf Compono basierten Klebstoffs sollten trotz genereller Eignung für die Klebung von Fertigteilen noch optimiert werden, da der Klebstoff relativ zähflüssig ist und daher mehr Zeit beim Auftrag benötigt wird. Während die Konsistenz des speziellen Klebstoffs von Rampf für die Verklebung von Fertigteilen als sehr gut eingestuft wurde, konnte bei der Nass-in-Nass-Klebung ein Verschieben des Klebstoffs beobachtet werden, sodass für diese Anwendung eine etwas steifere Mischung günstiger wäre.

In Hinblick auf die Herstellungsmethode - Trockenverklebung oder Nass-in-Nass Verklebung – erwiesen sich beide Methoden als grundsätzlich geeignet. Die Trockenverklebung ist jedoch aufgrund der Vorbereitung der Fuge, der vorherigen Herstellung des Betonfertigteils und der zusätzlichen Hebeprozesse mit einem deutlichen Mehraufwand verbunden. Zusätzlich erschweren Bauteiltoleranzen das Herstellen einer vollflächigen Klebung. Diese Aspekte entfallen bei einer Nass-in-Nass Verklebung gänzlich. Diese erfordert jedoch eine größere Vorsicht bei der Betonage und einen gut abgestimmten Herstellungsprozess, da nicht nur die Verarbeitungsdauer des Klebstoffs, sondern auch die des Betons einzuhalten ist.

Es bleibt zu prüfen, ob durch stark wechselnde klimatische Verhältnisse in Holz-Beton-Verbundbauteilen Schäden durch Zwangsspannungen hervorgerufen werden können, die einen unzuträglichen Einfluss auf die Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit der Bauteile haben. Weiterhin ist das Verhalten bei Brandbeanspruchung zu untersuchen. Eine wichtige Voraussetzung für die praktische Anwendbarkeit ist, dass das Brandverhalten des Klebstoffs den Brandschutzanforderungen am Einsatzort entspricht.

Aufgrund der unverzichtbaren Forderung nach gesteigerter Nachhaltigkeit im Bauwesen rückt das Ende des Lebenszyklus immer weiter in den Fokus. Eine Wiederverwendung geklebter Verbundbauteile ist denkbar, solange sich die Planung an den aktuell üblichen Rastermaßen orientiert. Eine Trennung der Bauteile ist nicht ohne Restrückstände möglich. Die Erfahrung aus diesen Forschungsarbeiten hat gezeigt, dass die Trennung von

Holz und Beton am besten möglich ist, wenn eine Querkraft auf die Fuge wirkt. Dies führt zu einem Bruch des Betons oder Holzes knapp oberhalb der Fuge, stellenweise auch an der Grenzfläche zwischen Klebstoff und Beton. An einem der Fügeile verbleibt dann der Klebstoff sowie restliche Anhaftungen des jeweils anderen Werkstoffs. Tritt ein Versagen des Betons ein, kann das Holz knapp unterhalb der Klebschicht aufgetrennt werden, sodass die Bauteile weitestgehend sortenrein vorliegen und daher mit leichten Verlusten wiederverwendet werden können. Wie praktikabel diese Art der Trennung ist und in welcher Form sich das verbleibende Holz wiederverwenden lässt, ist Gegenstand für zukünftige Untersuchungen.

2.4. Danksagung

Die im zweiten Kapitel dieses Referats vorgestellten Forschungsarbeiten wurden vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Förderprogramms Zukunft Bau gefördert. Die Projektnummer ist 10.08.18.7-18.01. Die Arbeiten wurden zusammen mit der Technischen Universität Berlin; Institut für Bauingenieurwesen; Entwerfen und Konstruieren – Verbundstrukturen, der Arup Deutschland GmbH und der berlinovo Immobilien GmbH durchgeführt.

2.5. Weiterführende Literatur

- [1] Breidenbach, M., Behring, S., Schmid, V., Wenker, J., Hein, C., Dwan, A. Meyer, F. Karbe, K.: Integrale Holz-Beton-Decken mit geklebtem Verbund. Projektnummer 10.08.18.7-18.01. BBSR-Online-Publikation 2022, Bonn.
Demnächst online verfügbar unter <https://www.zukunftbau.de/projekte/forschungsfoerderung/1008187-1801>
- [2] Breidenbach, M.: Kerven in Holz-Beton-Verbund-Systemen mit nachträglichem Polymerbetonverguss: Experimentelle und theoretische Grundlagen. Masterarbeit, TU Berlin, 2019.
- [3] DIN EN 408:2012-10: Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften. Deutsches Institut für Normung, Oktober 2012
- [4] Arendt, S., Sutter, M., Breidenbach, M., Schlag, R., Schmid, V.: Neue Forschungsergebnisse zu Nass-in Nass geklebten Holz-Beton-Verbunddecken. Bautechnik 99 (2022), Heft 10

3. Geklebte Knotenpunkte von weitgespannten Fachwerkträgern

Hölzerne Dach-Tragstrukturen für weitgespannte Bauwerke bestehen derzeit in der Regel entweder aus massiven Bauteilen aus hochkant stehendem Brettschichtholz oder aus aufgelösten beziehungsweise zusammengesetzten Tragstrukturen aus Brettschichtholz, Furnierschichtholz und/oder Konstruktionsvollholz. Massive Träger weisen einen sehr hohen Materialeinsatz auf. Solche Konstruktionen sind in keiner Weise ressourcen- und materialeffizient. Dennoch finden massive Brettschichtholzkonstruktionen im Bereich des Ingenieurholzbaus am häufigsten Anwendung in der Baupraxis. Die Brüninghoff Group, das Labor für Holzbau der Hochschule RheinMain und die Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart (Otto Graf Institut), Abteilung Holzkonstruktionen, haben daher gemeinsam eine hybride Leichtbaulösung auf Holzbasis für weitgespannte Hallentragwerke entwickelt.

3.1. Trägerdesign

Das Design des Trägers wurde unter Berücksichtigung der folgenden konstruktiven Anforderungen entwickelt:

- Spannweite 20 m bis 35 m (größere Spannweiten konzeptionell möglich)
- Trägerhöhe möglichst niedrig, Satteldachträger dabei auf Gesamthöhe optimiert
- Feuerwiderstandsklasse R 30
- Standard-Installationen bis ca. 80 cm Rohrdurchmesser müssen einfach durch das Bauteil geführt werden können
- Option für biegesteife Kopplung von Trägerabschnitten über Baustellenstoß

Dem im Folgenden vorgestellten Trägerdesign (Abbildung 8) ging eine umfangreiche Variantenuntersuchung voraus. Aufgrund des hohen Zeitaufwands zur Einbringung einer Vielzahl von mechanischen Verbindungsmitteln, z. B. Stabdübel beziehungsweise eingeklebte Stahlteile, wurde eine direktverklebte Variante mit zweiteiligen Gurten aus Laubholz favorisiert. Für diese wurden detaillierte Berechnungen erstellt, die als Grundlage für weitere Versuche dienten.



Abbildung 8: Ansicht des geklebten Fachwerkträgers mit 30 m Spannweite (Bildquelle: Brüninghoff Group)

Eine besondere Rahmenbedingung im Vergleich zu herkömmlichen Fachwerkträgern ist die Verklebung von einerseits Brettschichtholz aus Fichte und andererseits Buche-Furnierschichtholz unter einem Winkel von $63,5^\circ$. Dabei wurde angenommen, dass sich die höhere Rollschubfestigkeit des Buche-FSH positiv auf die Tragfähigkeit der Verklebung auswirkt.

3.2. Verklebungsversuche im Bauteilmaßstab

Nach vorangegangenen orientierenden Scherversuchen im Labormaßstab wurden die Klebefugen im Maßstab 1:1 untersucht. Um den Aufwand, der mit der Prüfung eines 30 m langen und ca. 2,2 m hohen Trägers verbunden wäre, zu reduzieren, wurde ein Versuchsaufbau in Anlehnung an die Veröffentlichung von Meyer und Blaß (2018) herangezogen. Nach Meyer und Blaß (2018) weisen Fachwerkknoten aufgrund der kombinierten Einleitung von Zug- und Druckkräften ein komplexes Tragverhalten auf, welches durch Versuche an vollständigen Fachwerkträgern verifiziert werden kann. Jedoch ist der material- und versuchstechnische Aufwand hierbei sehr hoch. Mit der vorgestellten Prüfmethode ist es möglich, das Trag- und Verformungsverhalten von Fachwerkträgern praxisnah zu ermitteln, ohne einen kompletten Fachwerkträger prüfen zu müssen. Der Material- und Prüfaufwand reduziert sich dadurch signifikant. Den Versuchsaufbau in Anlehnung an Meyer und Blaß (2018) zeigt Abbildung 9.

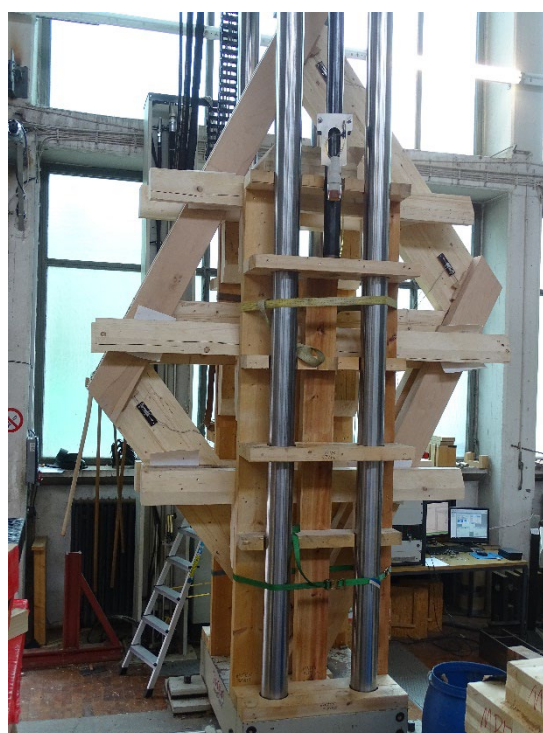
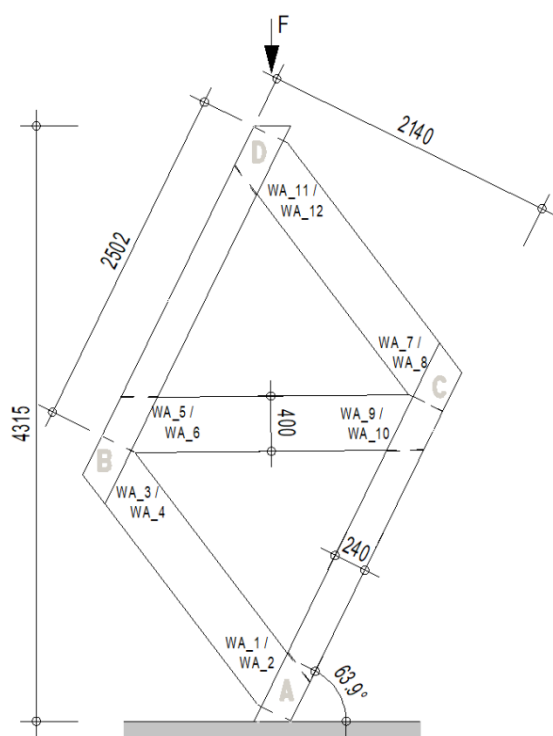


Abbildung 9: Prüfaufbau in Anlehnung an Meyer und Blaß (2018) (Bildquelle: MPA Stuttgart)

3.3. Ergebnisse und Diskussion

Die Druckprüfungen wurden in Wegsteuerung mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1,5 mm/min durchgeführt. Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurde, neben der Last und der vertikalen Lastpunkt-/ Kolbenverschiebung, an jedem Knoten die Relativverschiebung der Klebeverbindung mit zwei ohmschen Wegaufnehmern (einer je Klebefuge) gemessen. Die Anordnung der Wegaufnehmer ist beispielhaft in Abbildung 9 gezeigt.

Das globale Last-Verschiebungsverhalten in vertikaler Richtung war bis zum Bruch nahezu linear. Die Bruchlasten der vier Prüfkörper lagen minimal bei 311 kN und maximal bei 381 kN. Der Mittelwert ($\pm$ Standardabweichung) betrug 350 ± 29 kN, und der Variationskoeffizient $V = 8,3 \%$. Das Versagen trat bei allen Prüfkörpern in einem der beiden mittleren Knoten (Knoten B und C), vorrangig in einer Klebefläche der mittleren, horizontal angeordneten Diagonale auf. Bei einigen Prüfkörpern versagte zusätzlich eine mit der äußeren Diagonale verbundenen Klebefuge.

Die aus den Versuchen im Labormaßstab zuvor gewonnenen positiven Erkenntnisse konnten durch die Versuche im Bauteilmaßstab nur teilweise bestätigt werden. Aufgrund von in den Klebefugen der Fachwerkknoten auftretenden lokalen Spannungsspitzen ist für Prüfkörper im Bauteilmaßstab und zu einem späteren Zeitpunkt für den gesamten Träger eine Angabe der mittleren Scherfestigkeit bezogen auf die Klebefläche nicht sinnvoll. Daher können die Ergebnisse aus den Bauteilversuchen in Anlehnung an die Methode von Meyer und Blaß (2018) nicht mit den ermittelten Scherfestigkeiten der Versuche im Labormaßstab verglichen werden. Hinzu kommt ein wirkendes Moment im Bauteil, das durch das nicht ideale Fachwerk erzeugt wird – die Schwerelinien der Diagonalen schneiden sich nicht im Kreuzungspunkt des Fachwerkknotens. Aus diesen Gründen kann von der Scherfestigkeit der Prüfkörper im Labormaßstab nicht unmittelbar auf die Tragfähigkeit des neu entwickelten geklebten Fachwerkknotens geschlossen werden.

Mit dem entwickelten Träger wurde im Rahmen eines Verbund-Forschungsvorhabens (Diehl et al., 2021) ein material- und ressourceneffizienterer Ansatz für den Bau von weitgespannten Hallentragwerken untersucht. Im Vergleich zu herkömmlichen Fachwerkträgern wurden breitere Querschnitte für die Diagonalen gewählt, welche mit Gurten aus Buche-FSH tragend verklebt wurden. Die Klebeverbindungen zwischen den Gurten aus Buche-FSH und den Diagonalen aus Fichte-BSH hielten in Versuchen hohen Belastungen stand. Dennoch konnten die durch umfangreiche Berechnungen ermittelten statischen Anforderungen für den Einsatz des Trägers in Bauwerken nicht vollständig erfüllt werden. Ursächlich für das Versagen der Klebeverbindungen sind Spannungsspitzen in den verklebten Bereichen.

Obwohl der entwickelte Träger die Anforderungen eines Einsatzes in Bauwerken aufgrund der Überschreitungen der rechnerisch ermittelten Bemessung noch nicht umfassend erfüllt, können Teilergebnisse des gemeinsamen Forschungsvorhabens in Kombination mit zusätzlicher Optimierung weiterverwendet werden. Die entwickelte Geometrie, die in Abbildung 10 zu sehen ist, soll nun durch weitere Optimierung zum technischen Erfolg geführt werden. Als Abschluss des gemeinsamen Forschungsprojektes wurde ein 16 m langer Demonstrator mit zwei Trägerhälften zu je 8 m hergestellt. Dieser dient als proof-of-concept der praktischen Herstellung des entwickelten Trägers und des zugehörigen Kopplungsstoßes sowie für Bewitterungstests, um eine mehrwöchige Bauphase zu simulieren (Abbildung 10).



Abbildung 10: Demonstrator des entwickelten Trägers mit 16 m Länge (Bildquelle: Brüninghoff)

3.4. Danksagung

Die im dritten Kapitel dieses Referats vorgestellten Forschungsarbeiten wurden aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Das Förderkennzeichen ist 22007818.

Die Arbeiten wurden zusammen mit der Hochschule RheinMain, Labor für Holzbau, durchgeführt, Förderkennzeichen 22023017. Ausgewählte Großversuche wurden an der Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart (Otto Graf Institut), Abteilung Holzkonstruktionen, durchgeführt.

3.5. Weiterführende Literatur

- [1] Diehl, F., Wenker, J. L., Bletz-Mühldorfer, O., Bathon, L., Schuff, M., Sieverdingbeck, K., Schneermann, J.: Hybrid-Leichtbauträger für weitgespannte Hallentragwerke. Schlussbericht, FNR Verbundforschungsvorhaben Förderkennzeichen 22023017/22007818, 2021
- [2] Meyer, N.; Blaß, H. J.: Eine neue Prüfmethode für Fachwerkknoten aus Holz. Bautechnik, 95: 793-800, 2018, <https://doi.org/10.1002/bate.201800061>
- [3] Sieverdingbeck, K.: Kopplungsstöße von aufgelösten Trägern. Bachelorthesis, Fachhochschule Aachen, Fachbereich Bauingenieurwesen, 2019
- [4] Stimpfle, L.; Tapia, C.; Wenker, J.L.; Aicher, S.: Experimental and numerical investigations on glued joints for wide-span timber trusses. Otto-Graf-Journal Vol. 20, 2021

4. Über Brüninghoff

Die Brüninghoff Group umfasst sechs Gesellschaften aus den Bereichen Bauen, Produzieren und Services. Für unsere Kund*innen entwickeln und planen wir Bauprojekte. Selbstverständlich realisieren wir diese auch als Generalunter- bzw. -übernehmer. Wir schaffen Energielösungen und kümmern uns um Gebäudebestände. Zu unseren Kernkompetenzen zählt zudem die Realisierung und Verarbeitung vorgefertigter Bauelemente aus Beton, Stahl, Aluminium – und vor allem Holz – in Kombinationen.

Fast 700 Mitarbeiter*innen tragen mit ihrem Know-how dazu bei, dass wir europaweit zu den Vorreiter*innen der Baubranche zählen. Projekte wie das H7 und das HAUT sind erst der Anfang. Denn mithilfe integraler Planungsprozesse und einer eigenen Produktentwicklung engagieren wir uns für nachhaltige und ressourceneffiziente Bauteil- und Gebäude-lösungen. In unseren eigenen Werken setzen wir auf eine klimaverträgliche Produktion und auf innovative Lösungen im Sinne der Kreislaufwirtschaft.

Die Brüninghoff Group ist in fast allen Branchen tätig. Wir realisieren zahlreiche Gebäudetypen – von Industriehallen über Verwaltungsgebäude und mehrgeschossige Wohnbauten bis hin zu Reitanlagen. Dabei beraten und begleiten wir Investor*innen, Projektentwickler*innen, Architekt*innen, Ingenieur*innen, aber auch Bauherr*innen wie zum Beispiel Geschäftsführer*innen mittelständischer Unternehmen sowie von Konzernen.