

Holz-Beton Verbund mit verklebten Fertigteilen – konsequenter Trockenbau

Werner Seim
Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau
Universität Kassel, Deutschland



Jens Frohn Müller
Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau
Universität Kassel, Deutschland



Holz-Beton Verbund mit verklebten Fertigteilen – konsequenter Trockenbau

1. Einführung

1.1. Die Entwicklung der Holz-Beton Verbundbauweise

Erste Ansätze zur Holz-Beton Verbundbauweise stammen aus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. In den Krisenzeiten nach und zwischen den Kriegen waren Stahl und teilweise auch Zement knapp und teuer, und man versuchte, diese Werkstoffe zu ersetzen oder zumindest ihren Anteil an Decken- und Dachkonstruktionen zu verringern. Die Bauteilversuche von Seiler (siehe Abbildung 1) zeigen beispielhaft einen kreativen Ansatz, um den Verbund zwischen Holz und Beton herzustellen. Mit dem Ende der krisenhaften Zeiten verabschiedete man sich dann auch meist sehr schnell wieder von den materialsparenden Konstruktionen, da die Arbeitskosten gegenüber den Materialkosten bestimmend für ökonomische Bauweisen wurden.

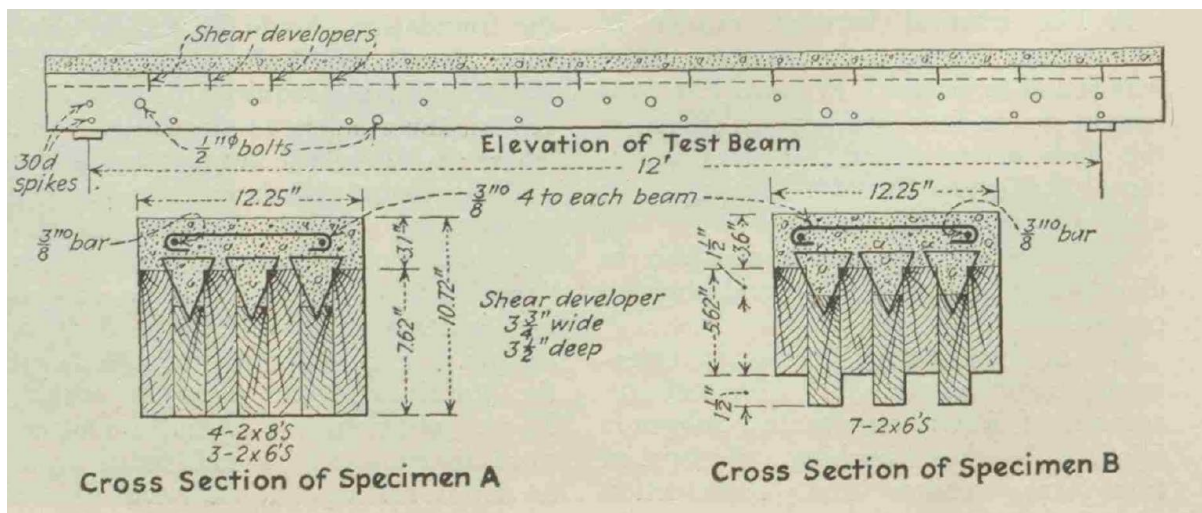


Abbildung 1: Bauteilversuche von Seiler 1934 aus [1]

Eine umfassende Darstellung zu patentierten Konstruktionen im deutschsprachigen Raum sowie zur weiterführenden Forschung findet sich bei Rautenstrauch [2]. Den internationalen Stand der Forschung am Ende des 20. Jh. hat Ceccotti [3] übersichtlich zusammengestellt. Über viele Jahre war die Holz-Beton Verbunddecke allerdings eher ein Nischenprodukt. Das änderte sich mit der Entwicklung des mehrgeschossigen Holzbaus. Dort werden die konstruktiven Anforderungen an die Geschossdecken zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten vor allem durch den Schallschutz, die Feuerwiderstandsdauer und das Schwingungsverhalten definiert - drei Felder, auf denen die klassische Stahlbetonbauweise Maßstäbe setzt, vor allem auch hinsichtlich der Kosten. Abbildung 2 zeigt anschaulich, wie ineffizient die «klassische» Holzbalkendecke im Vergleich zur Stahlbetondecke und zur Holz-Beton Verbunddecke ist, wenn man den Anteil der Masse, der sich am Lastabtrag beteiligt als Maß der Effizienz heranzieht.

Zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsprojekte der vergangenen Jahre haben sich damit befasst, wie der Verbund zwischen Holz und Beton möglichst einfach und effizient hergestellt werden kann und welche Methoden und Nachweise für eine sichere Bemessung von HBV-Konstruktionen hinsichtlich der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit auch unter Berücksichtigung des zeitabhängigen Verhaltens geeignet sind. Schänzlin [4] hat den Stand des Wissens übersichtlich zusammengestellt und seit 2021 liegt mit der CEN/TS 19103 der Entwurf eines technischen Regelwerks vor [5].

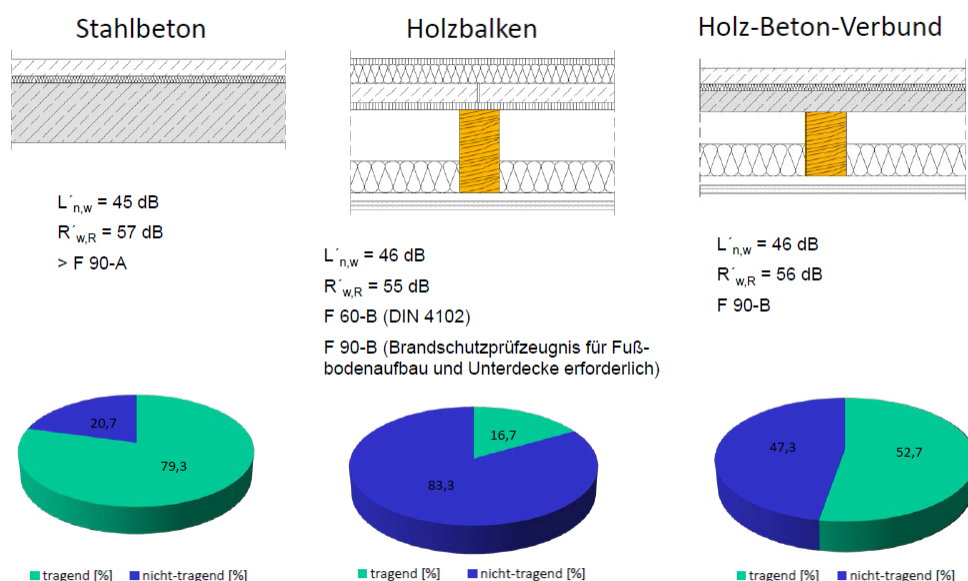


Abbildung 2: Konstruktionsvarianten für Geschossdecken im Vergleich

1.2. Die Motivation für das Kleben

Obwohl die HBV-Bauweise als Endprodukt große Vorteile aufweist und erheblich zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit des Holzbaus im mehrgeschossigen Bauen beiträgt, gibt es doch einige Nachteile, die immer wieder zu Akzeptanzproblemen führen. Hier spielt insbesondere die Störung des Bauablaufs eine entscheidende Rolle: Die Montage des Holzbaus als klassischer Trockenbau mit weitgehend gebrauchsfertigen Oberflächen (Deckenuntersicht, Stützen, Wände) wird durch das Betongewerk erheblich ausgebremst: Bewehrung muss verlegt werden, Fugen müssen abgedichtet und Oberflächen geschützt werden, der Beton muss aushärten. Das alles braucht Zeit und verzögert den Baufortschritt.

Vor diesem Hintergrund ist es erstaunlich, dass es vergleichsweise wenig Ansätze gab diese Nachteile durch die Verwendung von Stahlbetonfertigteilen zu eliminieren. Neben einem patentierten Verfahren mit in die Stahlbetonfertigteile eingelegten Kunststoffhülsen für die nachträgliche Verschraubung [6] bietet sich hier der geklebte Verbund an.

Die wichtigsten Vorteile des geklebten Verbunds sind:

- Optimales mechanisches Zusammenwirken durch starren Verbund,
- zügiger Bauablauf,
- Geringer Feuchteintrag in den Rohbau durch a) die Verwendung von Stahlbetonfertigteilen statt Ortbeton
- einfache Vorbereitung der Bauteile,
- kein Anpressdruck erforderlich bei Verwendung von Epoxidharzen,
- nach einem Tag Aushärtung tragfähig, nach sieben Tagen voll belastbar,
- flexible Herstellung auf der Baustelle oder im Werk,
- teilweise Vorwegnahme des Schwindens des Betons vor dem Verbund,
- vergleichsweise einfaches Trennen der Bauteile (Rückbau und Wiederverwendung).

2. Forschung für den geklebten HBV

Ein guter Überblick zur Entwicklungsgeschichte des geklebten Holz-Beton Verbunds findet sich bei Frohnmüller & Seim [7]. An dieser Stelle soll nochmals über die wichtigsten Meilensteine berichtet werden und es werden Zusammenhänge zwischen den Anforderungen aus der Praxis und den wissenschaftlichen Arbeiten aufgezeigt.

2.1. Die Anfänge

Über einen ersten Ansatz zum geklebten Verbund von Holz und Beton berichtet Pincus schon in den 1979er Jahren (siehe [10]). Allerdings verläuft diese Initiative im Sande. Vielleicht auch deswegen, weil bei den dort vorgestellten Bauteilen keine zwei biegesteifen Komponenten vorgesehen sind, sondern eine vergleichsweise dünne Platte einer höherfesten tropischen Holzart mit dem Beton verklebt wird. Mehr oder weniger gleichzeitig

berichten dann 2008 Schäfers & Seim [8] und Toutlemonde & Ben Mekki [9] über Versuche zum geklebten Verbund von Holz und ultra-hochfestem Beton (UHPC).

Die Arbeiten in Kassel bauen dabei auf Erfahrungen beim Kleben auf Stahlbetonoberflächen auf. Vor diesem Hintergrund werden überwiegend Epoxidharzklebstoffe verwendet, die über eine bauaufsichtliche Zulassung zum Kleben auf Beton verfügen. Hinsichtlich der Vorgehensweise wird eine Systematik entwickelt, welche für alle weiteren Arbeiten wegweisend ist. Diese beruht auf den drei Skalen:

- Kleinkörper (42 x 42 mm) zur Bewertung der grundsätzlichen Eignung von Oberflächen und Klebstoff,
- Verbundkörper (ca. 300 x 50 x 45 mm) zur Bewertung der Verbundfestigkeit und der Versagensart,
- Bauteile (Breite ca. 1,20 m, Spannweiten zwischen 4,50 und 8,00 m) zur Bewertung der Vorgehensweise bei der Herstellung und bei der Qualitätssicherung, sowie zur Validierung der Bemessungsansätze.



Abbildung 3: Erste Bauteilversuche mit verklebten Bauteilen aus Holz und ultra-hochfestem Beton (UHPC) von Schäfers [10]

Eine wichtige Erfahrung mit den ersten Versuchen von Schäfers [10] war allerdings auch, dass die Verwendung von vergleichsweise dünnen Platten aus UHPC hinsichtlich der konstruktiven Anforderungen an Deckenkonstruktionen wenig Vorteile bringt. Bei den Folgeprojekten erfolgte deshalb Schritt für Schritt ein Übergang zum hochfesten und zum normalfesten Beton.

2.2. Feuchte und Dauerlast

Aufbauen auf die ersten vielversprechenden Ergebnisse, wurde an der Universität Kassel von Eisenhut & Seim [11] das Langzeitverhalten von geklebten HBV Bauteilen mit Stahlbetonfertigteilen aus HPC im Rahmen des Forschungsclusters BestKleb untersucht. Auch in Nutzungsklasse 2 und über einen Zeitraum von über zwei Jahren konnte bei unter Dauerlast ausgelagerten Bauteilen die Beständigkeit der Klebefuge gegenüber Einflüssen aus Temperatur und Feuchtigkeit nachgewiesen werden. Auch kleinformatige Verbundproben aus geklebtem HBV ($l = 300 \text{ mm}$) zeigten unter konstanter mechanischer Dauerbelastung und Wechselklima in einer Klimakammer keinen Festigkeitsverlust.

Mit dem entwickelten Berechnungsmodell auf Grundlage der Finiten Elemente konnte die Bauteilfeuchtigkeit sowie die Kriechverformung mit einer hohen Genauigkeit prognostiziert werden.

Parallel zu den umfangreichen experimentellen Untersuchungen wurden von Eisenhut [12] numerische Berechnungen durchgeführt, bei denen die zeitabhängigen Verformungen durch Feuchteänderungen mit dem Relaxationsverhalten überlagert wurden. Dabei wurden die am Bauteil aufgezeichneten Verläufe der Luftfeuchtigkeit und Temperatur als Einwirkung direkt berücksichtigt. Der Vergleich zwischen gemessener und berechneter Durchbiegung zeigt, dass das Rechenmodell zu Beginn die Verformungen überschätzt,

dass über die Zeit dann aber eine gute Übereinstimmung zwischen der gemessenen und der prognostizierten Durchbiegung erreicht wird.

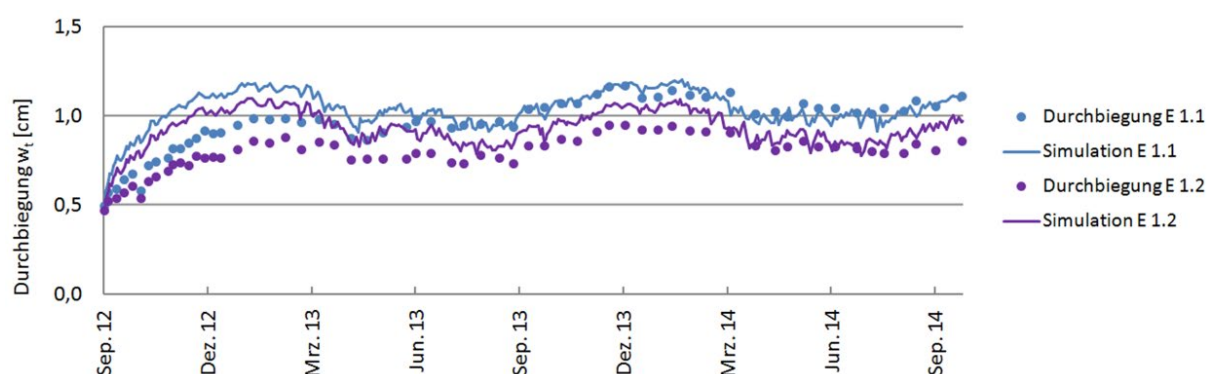


Abbildung 4: Ausgelagerte Bauteile von Eisenhut [12] mit prognostizierten und gemessenen Durchbiegungen (der konstruktive Schutz des Hirnholzes wurde für die Fotografie entfernt)

Mit der Rollschubbeanspruchung infolge zeitabhängiger Phänomene bei flächig verklebten Bauteilen befassten sich Ginz & Seim [13]. Mit umfassenden Simulationen konnte gezeigt werden, dass bei baupraktischen Randbedingungen aus Schwind- und Quellverformungen in Querrichtung die Rollschubbeanspruchung unterhalb der anzusetzenden Widerstände bleibt.

2.3. Betonoberfläche, Klebstoffauswahl und -applikation

Weitere Entwicklungsschritte wurden durch Hinweise und Anforderungen aus der Bau-praxis initiiert. Zum einen zeigte sich, dass neben dem klassischen Plattenbalken, mit einer vergleichsweise einfach herzustellenden und zu kontrollierenden Längsverklebung eine erhebliche Nachfrage an flächig verklebten Bauteilen besteht. Dies betrifft sowohl Deckenkonstruktionen im Hochbau mit Brettsperrholz bzw. mit Brettstapel oder liegenden Brettschichtholzelementen als auch den Brückenbau, wo sich die Kombination einer Stahlbetonplatte mit einem blockverklebten Holzbauteil in zahlreichen Anwendungen bewährt hat.

Aufgrund negativer Erfahrungen bei der Applikation von vergleichsweise niedrigviskosen (fließfähigen) Klebstoffen erfolgte der Übergang zur Verwendung hochviskoser (wenig fließfähiger) Polymermörtel auf Epoxidharzbasis. Parallel dazu wurden unterschiedliche streifenförmige Auftragsverfahren untersucht, um die Grundlagen für eine sichere Applikation und eine wirtschaftliche Verwendung des Klebstoffs zu schaffen. Der Nachweis der sicheren Anwendbarkeit wurde durch vollmaßstäbliche Bauteilversuche (siehe Abbildung 5) erbracht. Die Ergebnisse dazu wurden von Frohnmüller et al. [14] dokumentiert.



a

b

Abbildung 5: (a) Bauteilversuch mit flächigen Bauteilen (b) Versuchsaufbau für Scherversuche und FE-Modell zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Oberflächen

Die Vorbereitung der Betonoberflächen erfolgt bisher standardmäßig durch Sandstrahlen, dies in Anlehnung an die Regelungen, die sich für die nachträgliche Verstärkung von Stahlbetontragwerken bewährt haben. Allerdings wurde der zusätzliche Arbeitsgang in der Vergangenheit immer wieder in Frage gestellt.

Aus diesem Grund wurden mit Scherversuchen systematische Untersuchungen zum Einfluss der Betonoberfläche auf die Verbundfestigkeit durchgeführt. Diese zeigten, dass die Festigkeiten mit und ohne Sandstrahlen in einer vergleichbaren Größenordnung liegen können. Allerdings hat die Oberfläche der Schalung einen erkennbaren Einfluss. Darüber hinaus besteht beim Verkleben ohne vorheriges Sandstrahlen die Gefahr, dass Verunreinigungen z.Bsp. durch Schalöl, welche die Adhäsionswirkung herabsetzen können, möglicherweise nicht erkannt werden.

Wenn ein geeigneter und dauerhafter Klebstoff in Verbindung mit der passenden Oberflächengestaltung und Applikationstechnik gewählt wird, kann ein Kohäsionsversagen des Klebstoff und ein Adhäsionsversagen der Grenzflächen von Klebstoff und Substraten ausgeschlossen werden. Das Versagen findet dann als Verbundversagen im Holz oder im Beton statt.

3. Nachweise GZT und GZG

3.1. Spannungsberechnung bei geklebten Verbundbauteilen

Da Holz und Beton durch die Verklebung starr miteinander verbunden sind können die Spannungen auf analytische Weise mit den Grundlagen der technischen Mechanik berechnet werden. In einem ersten Schritt wird hierzu die Lage der Spannungsnulllinie z_0 berechnet.

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i} \quad (1)$$

Die Abstände a_i zwischen dem Gesamtschwerpunkt und den Schwerpunkten der Teilquerschnitte ergeben sich aus den in Abbildung 6 dargestellten geometrischen Zusammenhängen.

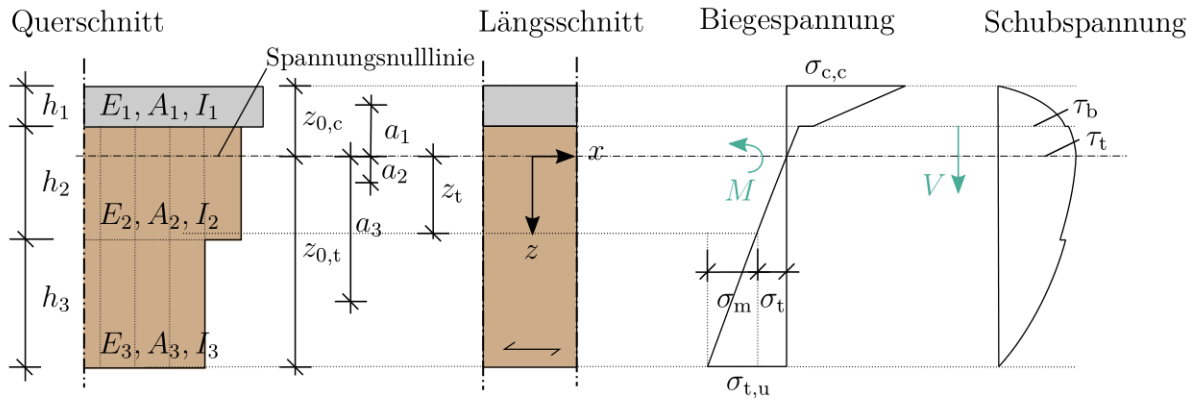


Abbildung 6: Geklebtes Verbundbauteil – Beispielhafte Geometrien und Spannungsverläufe für ein Querschnitt mit drei Teilquerschnitten

Für den Verbundquerschnitt wird eine wirksame Biegesteifigkeit $(EI)_{cal}$ berechnet und dabei die unterschiedlichen E-Moduli der Teilquerschnitte unter Anwendung des Satzes von Steiner berücksichtigt.

$$(EI)_{cal} = \sum_{i=1}^i E_i \cdot I_i + E_i \cdot A_i \cdot a_i^2 \quad (2)$$

Mit Kenntnis der wirksamen Biegesteifigkeit können die Biegespannungen an jedem Punkt des des Verbundquerschnitts berechnet werden, indem das Gesamtmoment M_{Ed} in Abhängigkeit der Steifigkeit der Teilquerschnitte aufgeteilt wird. Die maximalen Spannungswerte am oberen und unteren Rand des Verbundbauteils können ermittelt werden, indem die Abstände $z_{0,c}$ und $z_{0,t}$ für z in Gleichung (3) eingesetzt werden.

$$\sigma_i = M \cdot z \cdot \frac{E_i}{(EI)_{cal}} \quad (3)$$

Zur Berechnung der Schubspannung in der Verbundfuge ist es erforderlich, das statische Moment S_b zu ermitteln. Dieses lässt sich in der Regel am einfachsten mit Bezug zum Querschnittsteil 1 berechnen.

$$S_{b,1} = b_1 \cdot h_1 \cdot a_1 \quad (4)$$

Der maximale Schubfluss $T_{b,max}$ ergibt sich wenn die maximale Querkraft in die Gleichungen eingesetzt wird.

$$T_b = T_{b,max} = V_{max} \cdot \frac{E_1 \cdot S_{b,1}}{(EI)_{cal}} \quad (5)$$

Wenn der Klebeverbund in Spannrichtung kontinuierlich angeordnet ist (z.B. durch die Ausführung von Längsstreifen), dann kann die Schubspannung in der Verbundfuge τ_b berechnet werden indem der Schubfluss T_b durch die Verbundbreite b_b dividiert wird.

$$\tau_b = \tau_{b,max} = \frac{T_{b,max}}{b_b} \quad (6)$$

Bei einer diskontinuierlichen Anordnung des Klebeverbunds, wie Sie im Falle von Querstreifen vorhanden ist, muss die verringerte Verbundfläche beachtet werden. Je nach dem Schnittkraftverlauf der Querkraft und Anordnung und Geometrie der Verbundflächen, kann eine vom Trägerende abweichende Stelle maßgebend sein. Die maximale Schubspannung in der Verbundfuge ergibt sich daher als der größte Wert aus den für jeden Klebstoffstreifen n berechneten Verbundschubspannungen $\tau_{b,n}$.

$$\tau_b = \tau_{b,max} = \max(\tau_{b,1}, \tau_{b,2}, \dots, \tau_{b,n}) \quad (7)$$

Zur Berechnung von $\tau_{b,n}$ wird der Schubfluss entsprechend der Lasteinzugsflächen der Klebestreifen ausgeteilt.

3.2. Nachweise GZT

Zeitpunkt $t = 0$

Im GZT müssen zum Zeitpunkt $t = 0$ die Nachweise für ein Biegezugversagen im Holz, ein Druckversagen im Beton, ein Schubversagen im Holz und ein Verbundversagen in der Klebefuge geführt werden. Theoretisch können weitere Versagensmechanismen maßgebend werden wie ein Querdruckversagen des Holzes oder ein Schulterschubversagen des Betons. Da diese Versagensmechanismen in Versuchen zum geklebten HBV jedoch noch nicht beobachtet werden konnten, sind Sie im Folgenden nicht im Detail aufgeführt. Hilfreich ist an dieser Stelle der Verweis auf die Richtlinie CEN/TS 19103 [5], in der alle Nachweise für HBV Tragelemente aufgeführt sind. Zu beachten ist, dass die CEN/TS 19103 noch nicht bauaufsichtlich eingeführt ist.

Beim Biegezugnachweis ist zu beachten, dass der Teilquerschnitt des Holzes durch eine Kombination aus Zug- und Biegespannungen beansprucht wird. Der Maximalwert der Zugspannung am unteren Querschnittsrand des Holzes muss damit in eine reine Zugspannungskomponente und eine reine Biegespannungskomponente aufgeteilt werden.

$$\left(\frac{\sigma_t}{f_{t,d}} \right) + \left(\frac{\sigma_m}{f_{m,d}} \right) \leq 1 \quad (8)$$

Ein Druckversagen des Betons kann unter Annahme eines linear elastischen Materialverhaltens des Betons erfolgen, da die Bruchdehnung des Holzes im Vergleich zum Bewehrungsstahl relativ gering ist. Die Ausbildung eines Parabel-Recheck Diagramms wie es im Betonbau angenommen wird, ist daher nicht möglich.

$$\frac{\sigma_{cc}}{f_{c,d}} \leq 1 \quad (9)$$

Der Schubnachweis im Holz wird in Anlehnung an die Regelungen des Eurocode 5 geführt.

$$\frac{\tau_t}{f_{v,d}} \leq 1 \quad (10)$$

Wenn die Zugspannungen σ_{ct} am unteren Betonrand die mittlere Zugfestigkeit f_{ctm} überschreiten, dann reißt der Beton auf und die gerissene Zugzone trägt nicht mehr zur Biegesteifigkeit des Verbundquerschnitts bei. Verbundspannungen können jedoch weiter übertragen werden.

$$\frac{\sigma_{ct}}{f_{ctm}} \leq 1 \quad (11)$$

Rechnerisch kann die gerissene Zugzone berücksichtigt werden, indem eine um die gerissene Zugzonenhöhe h_{cr} reduzierte Betonhöhe $h_{1,ef}$ bei der Berechnung von $(EI)_{ef}$ angesetzt wird. Der Berechnungsablauf sollte wiederholt werden bis Gleichung (11) erfüllt ist.

Für den Nachweis des Klebeverbunds, bzw. der Verbundfuge von Holz und Beton sind bisher keine allgemein gültigen Regelungen vorhanden. Wenn hochfeste Betone verwendet werden, wurde der Nachweis bisher auf ein Versagen im Holz zurückgeführt und die Schubfestigkeit des Holzes f_v angesetzt.

Frohnmüller und Seim [15] stellen einen Ansatz zur Bestimmung der Verbundfestigkeit f_b in Abhängigkeit von der Oberflächenzugfestigkeit $f_{ct,surf}$ vor. Zur Ermittlung des Bemessungswerts der Verbundfestigkeit $f_{b,d}$ müssen die Teilsicherheitsbeiwerte γ_M beider Werkstoffe, sowie die Faktoren k_{mod} und k_{cr} und für den Beton der Faktor a_{ct} beachtet werden.

$$f_{b,d} = \min(f_{v,d}; 2 \cdot f_{ct,surf,d}) \quad (12)$$

In Anlehnung an die Untersuchungen an auf Beton aufgeklebte Stahl- und CFK-Lamellen werden Beiwerte definiert, mit denen Effekte aus einem mehrachsigen Spannungszustand (Beiwert k_{b1}) und zeitabhängige Effekte (Beiwert k_{b2}) auf die Verbundfestigkeit berücksichtigt werden können. Diese Beiwerte sind derzeit Gegenstand weiterer Untersuchungen.

$$\frac{\tau_b}{k_{b1} \cdot k_{b2} \cdot f_{b,d}} \leq 1 \quad (13)$$

Nachweis $t = \infty$

Durch das unterschiedliche, zeitliche Verhalten hinsichtlich Kriechen und Schwinden von Holz und Beton muss die Tragfähigkeit zum Zeitpunkt $t = \infty$ und ggfs. auch zu einem Zeitpunkt im Bereich zwischen 3 bis 7 Jahren nachgewiesen werden. Die Nachweise werden geführt, indem die Steifigkeiten von Bauteil und Verbindungsmittel abgemindert werden. Das Schwinden des Betons kann durch indirekt durch das Aufbringen einer Ersatzlast oder in FE-Programmen als Temperaturlastfall berücksichtigt werden.

3.3. Nachweise GZG

Bei den Nachweisen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sind insbesondere die Nachweise von Verformungen und Schwingungen von Relevanz. Diese orientieren sich an den Regelungen des Eurocode 5. Der Nachweis der Schwingungen kann erfolgen, indem die Grenzwerte für Frequenz- und Steifigkeit eingehalten sind.

4. Hinweise zur Ausführung und zur Qualitätssicherung

4.1. Ausgangssituation

Die HBV-Decke mit geklebtem Verbund zwischen Holz und sandgestrahlten Stahlbetonfertigteilen wurde in einem Deckenbereich des Neubaus einer Schule in Kassel umgesetzt. Bei der restlichen Decke wurde der Verbund mittels Kernen und Ortbeton ausgeführt. Bauherr war die Stadt Kassel, hinsichtlich der Tragwerksplanung wurde das Projekt von dem Büro EFG Beratende Ingenieure in Kassel begleitet. Das statische System im Bereich der Pilotanwendung ist ein Einfeldträger mit einer Spannweite von 7,68 m. Der Bereich der Pilotanwendung und die Abmessungen des Deckenquerschnitts sind in Abbildung 7 dargestellt.

Als Klebstoff kam ein Polymermörtel auf 2EP-Basis zum Einsatz, der im Rahmen eines ZIM-Projekts an der Universität Kassel mit den Projektpartnern speziell für diese Anwendung entwickelt worden war. Der Polymermörtel weist eine mittlere Zylinderdruckfestigkeit $f_{adh,c,mean}$ im Bereich von 140 N/mm², eine Biegezugfestigkeit $f_{adh,t,mean}$ von 28,7 N/mm² und eine Haftfestigkeit auf einer sandgestrahlten Stahlplatte von 13,8 N/mm² auf. Die Klebstoffstreifen wurden quer zur Spannrichtung angeordnet und zum Auflager hin entsprechend dem Querkraftverlauf in engeren Abständen angeordnet (siehe Abbildung 7, rechts).

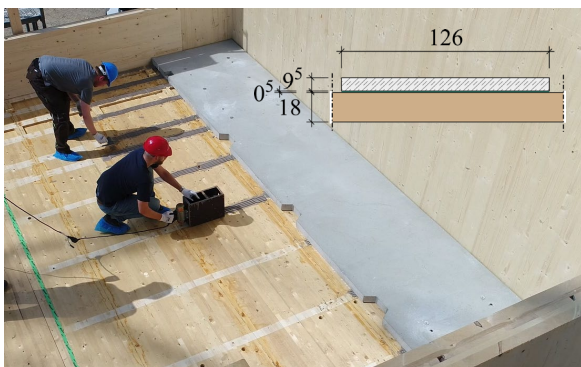


Abbildung 7: Pilotanwendung der geklebten HBV-Bauweise in einem Schul-Neubau in Kassel

Für das Holz kamen im gesamten Deckenbereich liegende Brettschichtholzquerschnitte GL28c, für die Stahlbetonfertigteile die Festigkeitsklasse C40/50 mit einer sandgestrahlten Plattenunterseite zum Einsatz. Die Würfeldruckfestigkeit $f_{cm,cube}$ konnte auf Grundlage von Prüfzeugnissen des Betonfertigteilwerks aus der internen Qualitätsüberwachung zu 58,8 N/mm² bestimmt werden. Die mittlere Oberflächenzugfestigkeit $f_{ctm,surf}$ des Betons wurde nach DIN EN 1542 [16] zu 3,0 N/mm² bestimmt.

Um eine erfolgreiche Verklebung sicherzustellen wurde der Ablauf der Arbeiten detailliert geplant und es wurde ein baubegleitendes Qualitätssicherungskonzept umgesetzt. Ziel der Qualitätssicherung ist es folgende, potenzielle Fehlerquellen auszuschließen:

- Unzureichende Adhäsionsausbildung, bzw. Haftversagen zwischen Klebstoff und Füge­teil (durch unzureichende Oberflächen­vorbereitung, zu hohe oder zu niedrige Temperatur, Luftfeuchte oder andere klimatische Verhältnisse),
- Unzureichende Tragfähigkeit des Klebstoffs durch ein fehlerhaftes Mischungsverhältnis oder gestörte Aushärtung,
- Unzureichende Tragfähigkeit der Beton- oder Holzoberflächen,
- Verschmutzung der Klebeflächen.

4.2. Vorbereitung der Arbeiten

Vor Beginn der Verklebung wurden Anforderungen an die Bauteile selbst und an die Witterungs- und Umgebungsbedingungen in den ersten 24 h der Aushärtung des Klebstoffs auf der Baustelle festgelegt und überprüft (siehe Tabelle 1). Die Anforderungen wurden in Anlehnung an die DIN EN 14080 [17] und Teil 3 der Richtlinie des DAfStb zur Verklebung von Betonbauteilen [18] definiert.

Tabelle 1: Anforderungen an die Ausführung: Witterungs- und Umgebungsbedingungen auf der Baustelle und Eigenschaften der Bauteile Holz und Beton

Kategorie	Kriterium	Sollwert
Witterungsb.	Außentemperatur	> 8 °C
	Relative Luftfeuchtigkeit	< 75 %
Beton	Baufeuchte	< 4 %
	Oberflächentemperatur	immer 3° über dem Taupunkt
	Festigkeitsklasse (Lieferschein)	C30/37
	Oberflächenzugfestigkeit $f_{ctm,surf}$	> 2,0 N/mm ²
Holz	Holzfeuchte	< 16 %
	Sauberkeit der Oberfläche	Staubfrei und frei von losen Teilen, fettfrei
	Hobeln oder Schleifen der Oberfläche	24 Stunden vor Beginn der Verklebung
	Festigkeitsklasse (Lieferschein)	GL28c
Toleranzen	Ebenheit	< 5,0 mm (auf 2000 mm)
	Spalt zwischen Holz und Beton	< 7,0 mm

Aus Erfahrung ist die Oberflächenzugfestigkeit des Betons ein wesentlicher Faktor für den Erfolg der Verklebung. Daher wurde diese Kenngröße vor Beginn der Arbeiten überprüft. Für das Pilotprojekt wurde ein Grenzwert von 2,0 N/mm² gefordert.

4.3. Ablauf der Arbeiten

Der Ablauf der Arbeiten erfolgte derart, dass die Holzelemente mit dem Kran eingehoben und gegen Verschieben fixiert wurden. Sobald die umliegenden Wände gestellt waren, wurden die Holzoberflächen mit einem Richtmaß auf Ebenheit. Dann wurden die Betonfertigteile probeweise eingehoben und die Unebenheiten zwischen Holz und Beton mit einem Messkeil überprüft. Der gemessene Spalt lag bei maximal 2,0 mm etwa in der Mitte der Spannweite. Aus den Grenzwerten für die Ebenheit («Bautoleranzen») der Schalungsseite des Beton nach DIN EN 13747 [19] und des Holzes nach DIN 18203-3 [20] lässt sich ein maximal zulässiger Spalt zwischen Holz und Beton von 7,0 mm ableiten. Das Klebstoffsystem wurde so ausgelegt, dass diese Maßtoleranzen ausgeglichen werden können.

In einem nächsten Schritt wurde die Lage der späteren Klebestreifen angezeichnet und anschließend mit einer Hobeltiefe von etwa 1 mm frisch gehobelt. Nachdem die Klebeflächen gehobelt waren, wurde bei den Arbeiten sorgfältig darauf geachtet, dass kein Schmutz, Staub oder Fettreste auf die Klebeflächen gelangten. Dies wurde durch das Tragen von Einweg-Handschuhen und Einweg-Überziehern für die Schuhe erreicht. Nach der Reinigung mit Staubsauger wurde der Klebstoff angemischt und bereichsweise für jeweils ein Betonfertigteile aufgetragen. Die Verarbeitungszeit des Klebstoffs wurde dabei durch eine Zeitmessung kontrolliert. Anschließend wurden die Betonplatte aufgelegt und mit 12 Montageschrauben je Betonfertigteile durch eingebaute Hülsen im Fertigteile auf dem Holzteil fixiert.

Begleitend zu den Verklebungsarbeiten wurden vor Ort von jeder Klebstoffcharge ausgewählte Prüfkörper hergestellt, siehe (Tabelle 2).

Tabelle 2: Qualitätssicherung - Prüfungen während der Verklebung

Kategorie	Kriterium	Sollwert
Klebstoff	Biegezugfestigkeit	2 je Charge
	Haftzugfestigkeit auf sandgestrahlter Stahlplatte	3 je Charge
Verbund zum Beton	Oberflächenzugfestigkeit der Betonoberfläche unter Baustellenbedingungen mit Polymermörtel	3 je Charge

Die Anzahl der hergestellten Probekörper der Biegezugprismen orientiert sich an der Bauaufsichtlichen Zulassung Z-10.7-282 [21]. Je Klebstoffcharge sollten mindestens zwei Probekörper nach DIN EN 12350-1 [22] hergestellt und nach 7 Tagen Aushärtung nach DIN EN 12390-5 [23] geprüft werden. Da alle Gebinde im Produktionswerk in einer Charge hergestellt wurden, wären aufgrund der verhältnismäßig kleinen Fläche und der daraus resultierenden geringen Klebstoffmenge theoretisch zwei Probekörper ausreichend gewesen. Um eine aussagekräftige Probenzahl zu erhalten, wurde im vorliegenden Fall entschieden, je angemischtem Gebinde Proben zu entnehmen. Bei den Haftzugversuchen auf einer sandgestrahlten Stahlplatte wurde analog verfahren und es wurden drei Proben pro Mischung hergestellt. Auf einer separaten Betonplatte wurde die Oberflächenzugfestigkeit des Betons ebenfalls erneut überprüft, um zu überprüfen, ob der Klebstoff einen ausreichenden Verbund zum Beton ausbildet. Die Oberflächenzugfestigkeit lag mit 3,4 N/mm² über dem zuvor bei der Kontrolle ermittelten Wert von 3,0 N/mm².

5. Zusammenfassung und Dank

Der Zeitraum zwischen den ersten Tastversuchen zum geklebten Holz-Beton-Verbund und der baupraktischen Umsetzung beträgt ca. 15 Jahre. In dieser Zeit wurden umfassende Erfahrungen gesammelt in einer intensiven und fruchtbaren Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Praxis. Die Arbeiten wären nicht möglich gewesen, ohne die im Folgenden aufgeführten finanziellen Förderungen:

- IGF Forschungsvorhaben Nr. 17274 N «Neuartige geklebte hybride Bauteile aus Holz und Beton – Untersuchungen zur Verbundfestigkeit bei thermisch-hygrischer Beanspruchung der Klebefuge», CLUSTER «BestKleb» (Beständigkeit von Klebungen verstehen und berechnen). Abgeschlossen 2015
- ZIM Forschungsvorhaben Nr. KF2512006KI4 «Entwicklung eines Verfahrens zur Vorfertigung einspuriger Schwerlastbrücken aus geklebtem Holz-Beton-Verbund mit bis zu 16 m Länge» (Kooperationsprojekt mit Schaffitzel Holzbau GmbH & Co. KG). Abgeschlossen 2017
- IGF Forschungsvorhaben Nr. 19417 N «Wirtschaftliche Herstellung hochwertiger Holz-Beton-Verbundelemente unter Anwendung einer innovativen Schnellklebtechnik und Einsatz von Laubholz - SpeedTeCC». Abgeschlossen 2020
- ZIM Forschungsvorhaben Nr. ZF4147005EB9 «Entwicklung einer Schnellbaumethode für HBV-Decken mittels Verklebung vorgefertigter Betonelemente» (Kooperationsprojekt mit BEWO – Betonwerk Oberessendorf GmbH & Co. KG). Abgeschlossen 2022

Die Autoren bedanken sich bei den fördernden Stellen, den im Literaturverzeichnis benannten Kollegen und nicht zuletzt bei den Vertretern, der in den Projekten bzw. den zugehörigen projektbegleitenden Ausschüssen vertretenen Unternehmen für ihre Beiträge.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Seiler, J.F.; New type of composite beam, Wood Preserving News Vol XI, 19
- [2] Rautenstrauch, K.; Entwicklung der Holz-Beton-Verbundbauweise. In: Holz-Beton-Verbund, Hrsg. König Holschemacher Dehn, F., Bauwerk-Verlag 2004.
- [3] Ceccotti, A; Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. In: STEP 2 Holzbauwerke nach Eurocode 2, Hrsg. Informationsdienst Holz, 1995.
- [4] Schänzlin, J; Eurocode 5: 2022 – Zur Bemessung von Holz-Beton-Verbunddecken. Karlsruher Tage 2018-Holzbau: Forschung für die Praxis, Karlsruhe, 2018.
- [5] CEN/TS 19193:2021; Eurocode 5: Design of Timber Structures – Structural design of timber-concrete composite structures – Common rules and rules for buildings, 2021.
- [6] ETA-13/0029; Würth FT-Verbinder.
- [7] Frohnmüller, J; Seim, W.; Geklebter Holz-Beton-Verbund – Stand des Wissens und der Forschung. Bauen mit Holz, 2021
- [8] Schäfers, M., Seim, W.; Development of adhesive bonded Timber-UHPC Composites– Experimental and theoretical investigations. *WCTE, Miyazaki, Japan*. 2008.
- [9] Toutlemonde, F., Ben Mekki, O.; Experimental study of a new bridge structure: A 10 m-span composite UHPFRC-carbon fibres-timber bridge. 8th International symposium on utilization of high-strength and high-performance concrete. 2008.
- [10] Schäfers, M.; Entwicklung von hybriden Bauteilen aus Holz und hochfesten bzw. ultrahochfesten Betonen. Experimentelle und theoretische Untersuchungen. Dissertation, Universität Kassel, 2010.
- [11] Eisenhut, L., Seim, W.; Langzeitverhalten geklebter Bauteile aus Holz und hochfestem Beton bei natürlichem Klima. Bautechnik, 2016.
- [12] Eisenhut, L.; Geklebter Verbund aus Holz und hochfestem Beton-Untersuchungen zum Langzeitverhalten. Dissertation, Universität Kassel, 2015.
- [13] Ginz, A, Seim, W; Moisture induced internal stress within adhesive-bonded timber-concrete composites, *WCTE 2018, Seoul*.
- [14] Frohnmüller, J., Fischer, J., Seim, W.; Full-scale testing of adhesively bonded timber-concrete composite beams. *Materials and Structures*, 2021.
- [15] Frohnmüller, J; Seim, W.; Geklebter Holz-Beton-Verbund auf schalglatten Betonoberflächen. Doktorandenkolloquium Stuttgart. 2020
- [16] DIN EN 1542; Prüfverfahren – Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch; Deutsche Fassung EN 1542:1999
- [17] DIN EN 14080; Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen; Deutsche Fassung EN 14080:2013
- [18] DafStb-Richtlinie Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung: Ausführung; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin, März 2012
- [19] DIN EN 13747; Betonfertigteile – Deckenplatten mit Ortbetonergänzung; Deutsche Fassung EN 13747:2005+A2:2010
- [20] DIN 18203-3; Toleranzen im Hochbau – Teil 3: Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen, 2008-08
- [21] Z-10.7-282; Polymerverguss zur Verstärkung von Holzbauteilen, Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, DIBt Berlin; 2021
- [22] DIN EN 12350-1; Prüfung von Frischbeton – Teil 1: Probenahme und Prüfgerät; Deutsche Fassung EN 12350:2019
- [23] DIN EN 12390-5; Prüfung von Festbeton – Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-5:2019