

# **Holz-Beton-Verbund: Klebeverfahren und Pilotprojekt mit Granulatsplittverklebung**

Volker Schmid  
Entwerfen und Konstruieren – Verbundstrukturen  
Institut für Bauingenieurwesen  
Technische Universität Berlin  
Berlin, Deutschland



Melf Sutter  
Entwerfen und Konstruieren – Verbundstrukturen  
Institut für Bauingenieurwesen  
Technische Universität Berlin  
Berlin, Deutschland



# Holz-Beton-Verbund: Klebeverfahren und erstes Pilotprojekt mit Granulat-splittverklebung

## 1. Materialsparende HBV-Decken

Holz-Beton Verbunddecken sind heute Stand der Technik. Sie werden gerne in Büro-, Wohn- oder Mixed-Use-Gebäuden mit Spannweiten bis 8,10m oder auch mehr angewandt. Die üblichen Stahlbetonplattendicken in HBV-Decken von 10-12 cm ergeben Deckenmassen und -steifigkeiten, mit denen die bemessungsrelevanten Verformungs-, Schwingungs- und Schallschutznachweise gut einzuhalten sind. HBV-Systeme erlauben deshalb geringere Bauhöhen als BSP- oder Holzbalkendecken (vgl. Abbildung 1). Gleichzeitig schaffen HBV-Rippendecken zwischen den Rippen Platz für die Haustechnik und benötigen insgesamt deutlich weniger Holz als die sehr materialintensiven BSP-Decken.

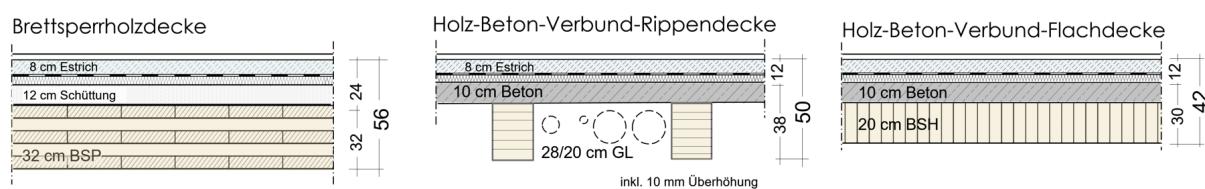


Abbildung 1: Beispiele mit Grobabbmessungen für 8,10 m weit spannende Holz- und HBV-Decken

Trotzdem haben HBV-Decken noch Verbesserungspotential in der Herstellung, der Technologie und den Kosten, mit dem sich Holzbauer und Forscher oft gemeinsam auseinandersetzen. Nach Ansicht der Verfasser ist die Weiterentwicklung der Klebetechnik dafür besonders interessant, da sie eine quasi-starre und damit hocheffiziente Verbindung ergibt, die vergleichsweise schnell und preiswert herstellbar ist. Im Folgenden werden deshalb Entwicklungen im Bereich des geklebten Verbunds zwischen Beton und Holz vorgestellt sowie das erste realisierte Pilotprojekt, das an der TU-Berlin zusammen mit der Firma Lignotrend erforscht und dann 2020 in der Schweiz umgesetzt wurde.

## 2. Geklebte Holz-Beton Verbunddecken

### 2.1. Nass-in-nass verklebte Holz-Leichtbeton Verbunddecken: Forschungen an der TU-Berlin

Im Zusammenhang mit dem multidisziplinären Forschungsprojekt LiveCycleTower entstand schon 2009 bei Arup Berlin und der TU-Berlin die Überlegung, das Transportgewicht der HBV-Fertigteile durch den Einsatz von Leichtbeton zu reduzieren. Somit könnten mehr FT-Elemente pro LKW transportiert werden. Schnell stellte sich heraus, dass für die Verbindung der Leichtbetonplatte mit den Holzträgern die üblichen Schrauben oder Kerven wenig effizient sind. Insbesondere Schrauben werden frühzeitig aus dem Leichtbeton herausgezogen, da die porösen Leichtbetonzuschläge unter den Schraubenköpfen schon bei geringen Lasten zerbrechen. Die Schubkraftübertragung zwischen Holz und Beton muss deshalb für Leichtbeton möglichst gleichmäßig und ohne Beanspruchungsspitzen erfolgen. Als Lösung wurde deshalb eine Nass-in-Nass-Verklebung vorgeschlagen, bei der der Frischbeton direkt auf die noch feuchte, unerhärzte Klebstoffschicht aufgegossen wird.

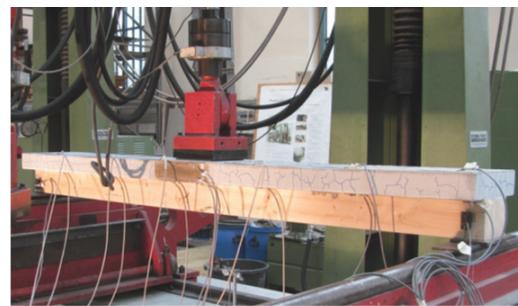
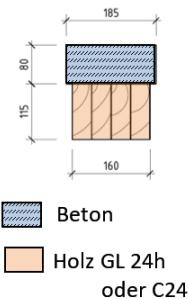
Die HBV-Decken des LCT-Projekts wurden zwar in der Folge mit Normalbetonen und Kerven ausgeführt, trotzdem führten die Überlegungen an der TU Berlin zu einem Forschungs-Projekt zur Nass-in-Nass Verklebung von Holz-Leichtbeton Verbundträgern (HLBV). Entscheidend war die Entwicklung eines geeigneter Leichtbetons LC 30/33 der Wichte  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$  mit dem Ziel einer möglichst hohen Zugfestigkeit. Grund ist, dass die Schubtragfähigkeit von unbewehrtem Beton direkt von seiner Zugfestigkeit abhängt

und nur indirekt von seiner Druckfestigkeit. Zusätzliche Längs- und/oder Querdruckbeanspruchungen erhöhen die Schubtragfähigkeit des Betons schnell auf das Doppelte oder Dreifache, während sie durch Längs- oder Querzug deutlich reduziert wird.

Die Tragfähigkeiten des nass-in-nass verklebten HLBV wurden zunächst im kleinen Maßstab mit Slip-Block Tests und anschließend mit 2,3 m kurzen Biegebalken untersucht, um ein Schubversagen in der Verbundfuge zu provozieren (Abbildung 2). Anschließend wurden praxisgerechte, 5,7 m spannende HBV-Träger getestet. Wie erwartet versagten diese Träger ausschließlich auf Biegezug im Holz, lange bevor die Schubtragfähigkeit in der Fuge erreicht wurde. Im Kleinversuch trat der Bruch fugennah im Beton auf. Die erreichte Schubtragfähigkeit der 2K-Epoxid-Verklebung überstieg deutlich die Werte üblicher VerbindungsmitTEL. Sie ist in Abbildung 2 für Leicht- und Normalbetone, genähert als über die Schubfläche verschmierte, äquivalente mittlere Schubspannung  $\tau_{\text{mean}}$  [N/mm<sup>2</sup>] dargestellt.



1) Slip-Block Test



2) kurzer Biegeschub Test, l = 2,30 m

Klebeverbund			Kerven	Schrauben
Nass-in-Nass-Verkleb. Normalbeton C 25/30	Granulatsplittverkl. C 20/25 bis C50/60	Nass-in-Nass-Verkleb. Leichtbeton LC 30/33	Normalbeton	4 Schraubenpaare Normalbeton
$\tau_{\text{mean}} = 6,1^{1)} - 7,0^{1)} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$\tau_{\text{mean}} = 5,3^{2)} - 7,9^{1)} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$\tau_{\text{mean}} = 2,6^{2)} - 5,4^{1)} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$\tau_{\text{mean}} = 1,3 - 1,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$\tau_{\text{mean}} = 0,7 - 1,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Abbildung 2: Schubtragfähigkeiten aus Slip-Block<sup>1)</sup> – und Biegeschub<sup>2)</sup> – Versuchen an verklebtem HBV. Vergleich der Ergebnisse mit Normalbeton, Granulatsplittverklebung und Leichtbeton mit den Ergebnissen für Kerven und Schrauben. Tragfähigkeiten ausgedrückt als äquivalente Schubspannungen [N/mm<sup>2</sup>] im Fugenbereich

Zu beachten ist, dass die im Holzbau üblichen Schub- oder Scherversuche je nach Versuchsaufbau prinzipiell unterschiedlich hohe Schubtragfähigkeiten liefern, mit den höchsten Werten für kleinformatige Scherversuche an kleinen Würfeln. Die hier durchgeföhrten Schubversuche mit ca. 40 cm langen Slip-Block-Tests lieferten höhere Schubtragfähigkeiten als die kurzen Balkenschubversuche. Grund ist der tragfähigkeitssteigernde Querdruck in der Fuge der Slip-Block-Tests, der dort zusätzlich zum Schub und Längsdruck im Holz und Beton auftritt. Zudem war im Versagensablauf des kurzen HLBV-Biegebalkens nicht auszumachen, ob der Schubbruch vor dem Biegezugversagen des Holzbalkens auftrat oder umgekehrt. Damit würde die Schubtragfähigkeit tatsächlich etwas höher liegen als im Biegeschubversuch bestimmt.

## 2.2. Nass-in-Nass geklebte HBV-Decken mit Normalbeton

Die weiteren an der TU-Berlin durchgeföhrten Forschungsprojekte zu verschiedenen Klebevarianten für HBV-Decken wurden mit Normalbeton durchgeföhr. Normalbetone der

Güte C20/25 bis C40/50 erscheinen den Verfassern den Verfassern für die Verklebung von Brettschicht-holzbalken oder Brettsperrholzplatten am sinnvollsten. Diese Betone sind überall erhältlich und preiswert. Zusätzliche Anforderungen an Decken bezüglich Brandschutz, Schallschutz und die Schwingungsbegrenzung erfordern eher dicke Plattenstärken von ca. 10-12 cm und eine große Masse, die solche Betonplatten aus Normalbeton umsonst liefern.

Forschungen der TU Berlin zur Nass-in-Nass Verklebung zusammen mit Cordes Holzbau [6] bestätigten die Erkenntnis, dass das Versagen bei 1 mm bis 2 mm dicken, gefüllten 2K-Epoxidverklebungen entweder im Holz oder Beton auftritt. Slip Block Tests (Abb. 2) prüfen dann nur die Schubfestigkeit des Holzes oder des Betons. Die hohe Tragfähigkeit der Verklebung erlaubt es, das Epoxidharz in schmalen Streifen aufzutragen (Abbildung 3l). An den Enden muss aber immer vollflächig verklebt werden, um ein frühes Fugenversagen schon während des Abbindens des Betons innerhalb der ersten drei Tage zu verhindern. Grund dafür ist vermutlich das ausgeprägte Frühschwinden des Betons, das auch als Setzen oder Bluten bezeichnet wird und dessen Größe nicht durch die Schwindberechnungen nach EC2 abgedeckt wird. Zu diesem Thema besteht noch Forschungsbedarf.

Die Biegetests mit praxisgerechten Spannweiten von bis zu 8 m versagten immer auf Biegezug im Holz. Beim Nachbruchverhalten zeigte sich öfters ein Ablösen der Betonplatte vom Holzträger infolge der dann hohen Querzugkräfte (Abbildung 3r).

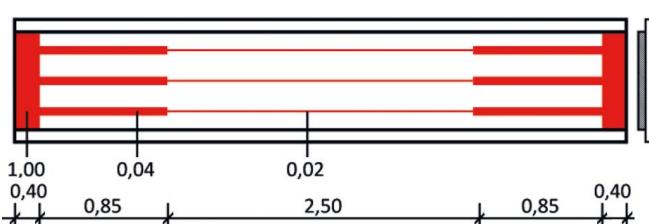


Abbildung 3: links: Klebstoffauftrag im Versuch mit einer BSP-Platte



rechts: Biegezugversagen im Holz, danach Ablösung der Betonplatte

## 2.3. Bisherige Forschungsaktivitäten zu geklebten HBV-Decken

Zu geklebten HBV-Decken wurde zwar nicht viel, aber schon seit langem erfolgreich geforscht. Im Prinzip sind dabei zwei Klebeverfahren zu unterscheiden.

Erstens die oben beschriebene Nass-in-Nass Klebetechnologie, für die in fast allen Fällen zweikomponentige Epoxid-Kleber eingesetzt werden. Übliche 1K oder 2K-PU-Kleber neigen infolge der unvermeidbar hohen Betonfeuchte zum Aufschäumen. Veröffentlicht wurde zu nass-in-nass verklebten HBV-Decken schon in den 70er Jahren von Pincus in den USA [1], Negrao in Portugal 2004 [2] und vor allem von Brunner in der Schweiz bis 2007 [3] und ab 2010 aus Berlin am Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Verbundstrukturen des Verfassers [4]-[6].

Die zweite Möglichkeit besteht in der nachträglichen Verklebung von Betonfertigteilen mit Holzträgern. Dazu sind prinzipiell verschiedene Klebstoffe vorstellbar. Üblich sind Epoxi- oder PU-basierte Klebstoffe, mit einem Vorteil für gefüllte 2K-Klebstoffe, da diese in der Regel für die notwendigen größeren Fugendicken höhere Festigkeiten erreichen. Diesbezüglich sind die Forschungen von Seim in Kassel mit aufgeklebten Fertigteilplatten aus ultrahochfestem Beton zu erwähnen [7][8], auch zusammen mit dem Fraunhofer Institut für Holzforschung in Braunschweig [9]. Hackspiel von der Holzforschung Austria berichtet in [10] von HBV-Decken, die zusätzlich mit einer elastischen Zwischenschicht verklebt werden. Die Zwischenschicht soll die im Hochbau entwurfsrelevanten Schallschutzeigenschaften der Decken verbessern.

Ein Nachteil der bisherigen geklebten HBV-Bauweise sind die hohen Anforderungen an die Umgebungsbedingungen während des Verklebens, wie z.B. Einhaltung des erlaubten Temperaturbereichs, die Schmutzfreiheit und die vergleichsweise kurze Aushärtezeit der Klebstoffe. Für die Praxis bietet sich deshalb eine Verklebung im Werk an. Andererseits ist im Holzbau das Verkleben und das Bauen mit großen, vorgefertigten Bauteilen üblich und daher qualitätssicher zu bewerkstelligen.

### 3. Forschung der TU-Berlin und Lignotrend zur neuen Granulatsplittverklebung von HBV-Decken

#### 3.1. Neues Konzept zum Klebeverbund zwischen Holz und Beton

Eine neue Variante des geklebten Holz-Beton Verbunds wurde von der TU-Berlin zusammen mit der Firma Lignotrend entwickelt und in einem von der AiF geförderten ZIM-Forschungsprojekt erforscht (Abb. 4 und 5). Bei dieser sogenannten Granulatsplittverklebung wird zunächst grober Splitt auf die Lignotrend-Deckenfertigteile geklebt und bis zur vollständigen Aushärtung gewartet. Auf die so vorbereiteten Holzelemente wird in einem zweiten Schritt der Frischbeton aufgebracht. Der Frischbeton verzahnt sich dabei mit dem aus der Klebeschicht herausstehenden Splitt und garantiert einen schubstarren, sehr tragfähigen Verbund. Der prinzipielle Aufbau der Verbundfuge ist in Abbildung 4 dargestellt.

Wird ein Klebstoff mit hoher Tragfähigkeit und ein geeigneter Splitt gewählt, tritt das Versagen oberhalb der Klebefuge im Beton ein, sofern ein niederfester Beton verwendet wird. Bei höherer Betonfestigkeit ab ca. C35 oder C40 kann das Schubversagen im Holz erwartet

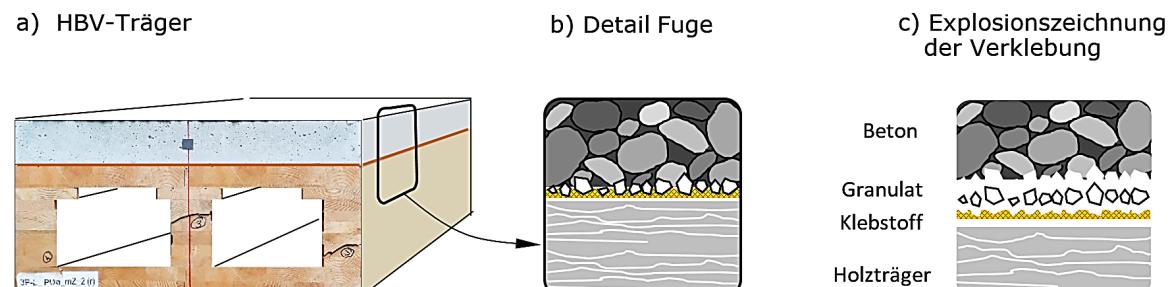


Abbildung 4: Prinzipskizze der Granulatsplittverklebung

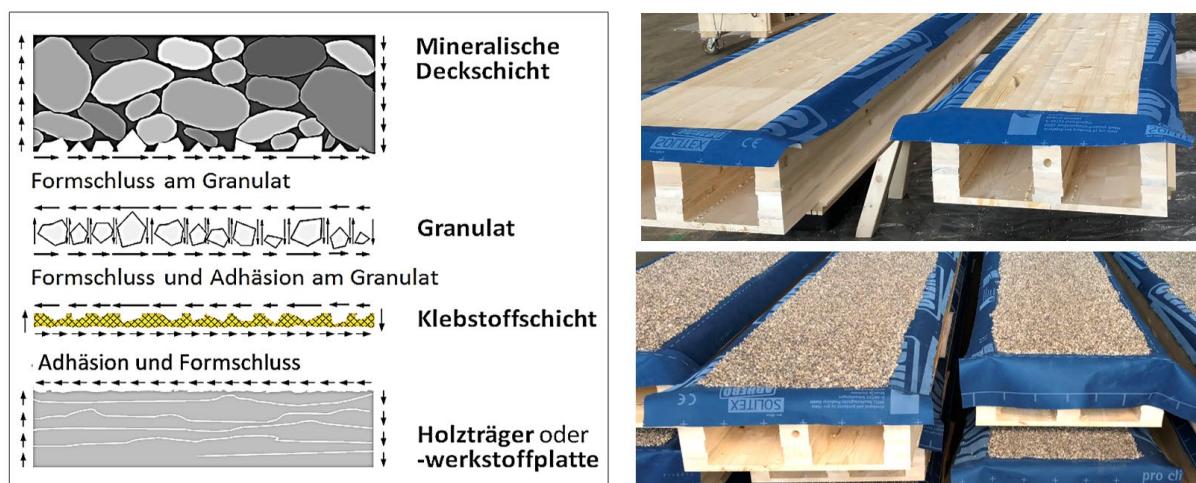


Abbildung 5: a) Tragprinzip Granulatsplittverklebung

b) Holzelemente vor und nach dem Aufbringen des Granulatsplitts. © Lignotrend

werden (vgl. Abb. 6). Ob ein Versagen in der Klebefuge selbst auftritt und wenn ja, bei welcher Schubspannung, hängt vor allem von der Tragfähigkeit des verwendeten Klebstoffs ab. Abhängig von der Ausführung der Verklebung und der Beton- und Holzqualität ist auch ein kombiniertes Versagen im Holz, Beton und der Fuge zu beobachten.

Der besondere Vorteil der Granulatsplittverklebung besteht für den Holzbauer darin, dass er die Verklebung des Splitts witterungsgeschützt und unter sauberen Bedingungen im eigenen Betrieb durchführen kann (Abb. 5b). Dann hat er die Wahl, ebenfalls im Werk die Betonplatte aufzugießen und damit ein vorkonfektioniertes HBV-Fertigteile auf die Baustelle zu liefern, das dort schnell und vergleichsweise witterungsunabhängig eingebaut werden kann. Andererseits hat er die Möglichkeit, nur das leichte, besplittete Holzelement preiswert auf die Baustelle zu transportieren und dann vor Ort zu betonieren. Das besplittete Decken-Halbfertigteile ist im Gegensatz zu üblichen Holzträgern oder Brettsperrholzplatten durch die dichte Kleberschicht vor Wasser geschützt und damit sehr robust.

### 3.2. Forschungsergebnisse zur Granulatsplittverklebung

Aus den vier am Verbundsystem beteiligten Werkstoffen Beton, Granulat, Klebstoff und Holz – und damit das Tragverhalten bestimmenden Parametern – ergibt sich eine hohe Anzahl an möglichen Kombinationen. Aus diesem Grund wurden zunächst zahlreiche Vorversuche an kleinformatigen Probekörpern durchgeführt um eine zuverlässige Verbundtechnologie zu entwickeln (vgl. Abbildung 6).

#### Slip-Block-Tests

Als Klebstoffe kamen ein 2K-Epoxidharz, ein 2K-Polyurethan (PU) und mehreren 1K-PU-Klebesysteme zur Anwendung. Dabei wurde im Wesentlichen die Klebstoffmenge variiert aber auch Parameter wie Umgebungs- und Auftragsfeuchte oder unterschiedliche Auftragsdesigns. Beim Granulat lag der Fokus auf den Sieblinien 2/5 und 5/8 mm, während erste Versuche mit Korngrößen bis 16mm nicht weiterverfolgt wurden. Dabei wurden gebrochener Granitsplitt, Flusskies und der Edelsplitt «Alpine Moräne» getestet. Während die Holzqualität, mit Fichte in C24 oder GL24, nicht variiert wurde, wurde das baupraktische Spektrum des Normalbetons in unterschiedlichen Varianten getestet.

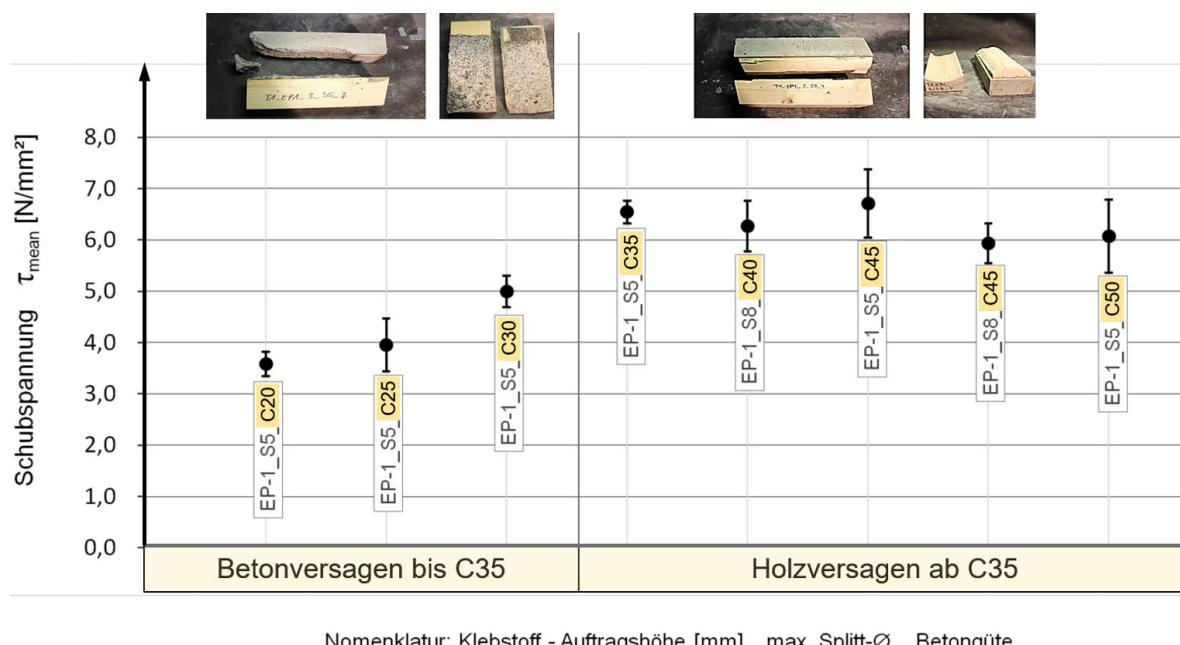


Abbildung 6: Beispiel Schubfestigkeit bei Slip-Block-Versuchen: 1 mm 2K-Epoxidharz, maximaler Granulatdurchmesser 5 und 8 mm, Betongüten zwischen C20/25 und C50/60

Die mit 2K-Epoxidharz verbundenen Probekörper versagten im Slip Block Test durchweg spröde außerhalb der Klebefuge im Beton oder im Holzquerschnitt. Im Bereich der Lastein- oder ausleitung kam es lokal zu Ablösungen zwischen Harz und Granulat. Es wurden über die Verbundfläche gemittelte Bruchschubspannungen von maximal  $\tau_{\text{mean}} = 7,9 \text{ N/mm}^2$  erreicht (Mittelwert einer Serie mit 5 Proben, vgl. Abbildung 6). Erst ab Bruchspannungen von ca.  $6 \text{ N/mm}^2$  bis  $7 \text{ N/mm}^2$  trat fast ausschließlich Schubversagen im Holz auf. Alle Serien hatten nur geringe Streuungen von i.d.R. unter 10%. Die höchsten Festigkeiten lieferten Klebstoffdicken von 3 mm, mit nur geringfügig kleineren Werten für 1 mm. Die Splitt-Sieblinien 2/5 und 5/8 erreichten nahezu identische Tragfähigkeiten. Wegen der guten Verfügbarkeit am Werk sowie der besseren Baustellentauglichkeit wurden die weiteren Untersuchungen mit einem gebrochenen Edelsplitt der Sieblinie 2-5 mm durchgeführt.

Abbildung 6 zeigt am Beispiel der Versuchsserie mit unterschiedlichen Betongüten und einer Verklebung mit 2K-Epoxidharz, dass bei 2K-Epoxi-Verklebungen nicht die Klebefuge selbst, sondern die Verbundpartner Holz und Beton die Schubtragfähigkeit limitieren. Bis zu einer Festigkeit von C35/45 kam es ausschließlich zum Versagen im Beton. Bei den höheren Betonfestigkeiten dominierte das Schubversagen im Holz. Die mit 1K-Polyurethan

erstellten Probekörper versagten hingegen i.d.R. innerhalb der Klebstoffsicht und verhielten sich dabei duktil. Je nach Klebstofftyp und -auftragsmenge wurden mittlere Bruchschubspannungen  $\tau_{\text{mean}}$  zwischen 0,8 und 5,6 N/mm<sup>2</sup> ermittelt.

### Biegeschubtests an kurzen Balken

Um den positiven Einfluss des Querdrucks auf die Holz- und Betonfestigkeit und damit die Fugentragfähigkeit auszuschließen, wurden Versuche an kurzen Balken durchgeführt, analog zu den Untersuchungen beim Leichtbeton. Die 1,9 m langen Balken wurden mittig durch eine Einzellast beansprucht, so dass sich rechnerisch ein konstanter Schubkraftverlauf über die Trägerlänge ergibt. Mit realitätsnahen Querschnittsabmessungen für Holz und Beton wurde die Verbundfuge bewusst mit geringerer Breite ausgeführt um ein Fugenversagen zu provozieren (s. Abbildung 7). Es wurden Varianten mit 2K-Epoxidharz und 1K-Polyurethan bei einer Splittgröße von 2-5mm untersucht.

Alle Serien erreichten Schubfestigkeiten in der Fuge von ca. 5,3 N/mm<sup>2</sup>. Damit liegen diese ca. 20% unter den Ergebnissen der Slip-Block-Versuche mit Epoxidharz, was sich durch den nicht vorhandenen Querdruck erklären lässt. Während bei den Epoxidharz Systemen der Bruch außerhalb der Fuge im Beton oder Holz stattfand, versagten die PU Balken - wie im Slip-Block-Test – vor allem in der Klebefuge und erreichten die gleiche Schubtragfähigkeit wie im Slip-Block-Test. Die Kohäsionsfestigkeit innerhalb des PU-Klebstoffs scheint hier offensichtlich weitestgehend unabhängig vom Querdruck zu sein.

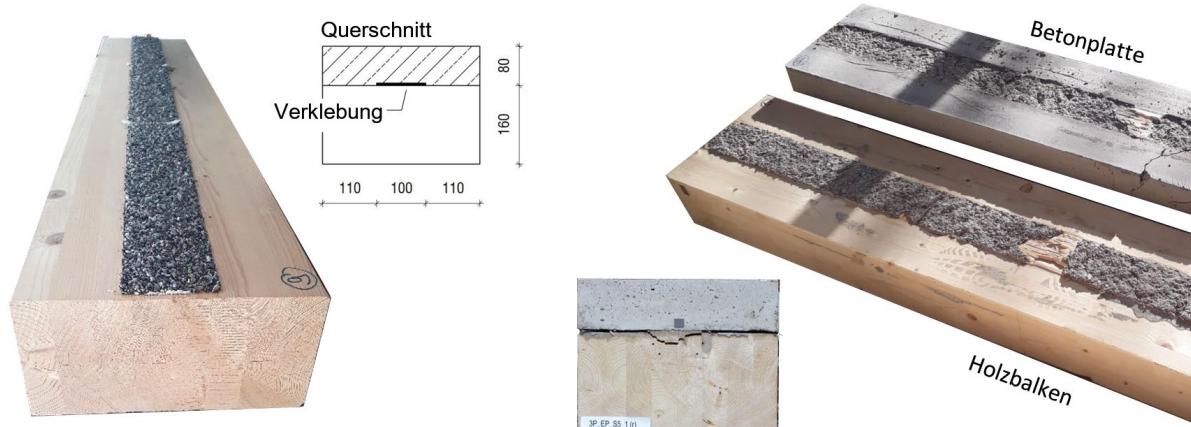


Abbildung 7: Kurze Biegeschubträger mit schmaler Fuge: Links: Vor dem Betonieren. Rechts: Nach den Versuchen mit Beton- und Holzversagen. Das Bild zeigt vorwiegend Betonversagen

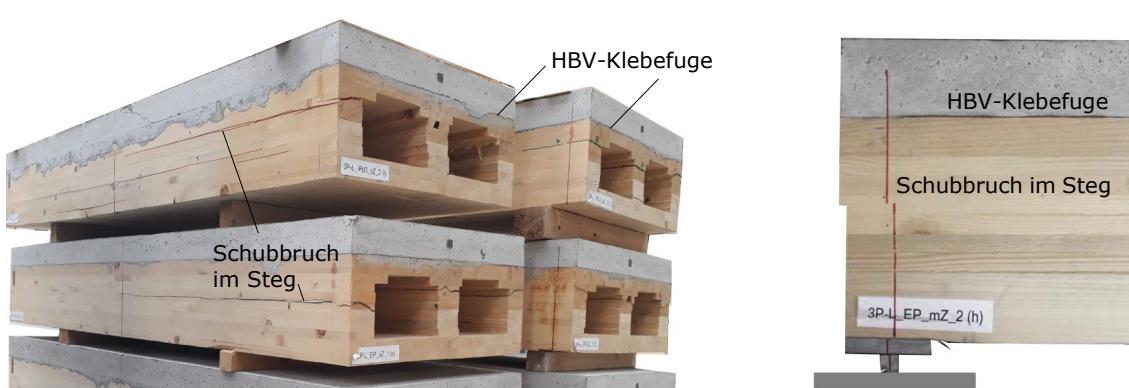


Abbildung 8: Kurze, gedrungenen Lignotrend-HBV-Träger nach den Drei-Punkt Biegeschubversuchen zum Test der Schubtragfähigkeit: Immer Schubversagen im Holz der Stege

Zur Untersuchung der Schubfestigkeit der neuen Granulatsplittverklebung in Verbindung mit den vorfabrizierten Hohlkastelementen der Fa. Lignotrend wurden zusätzlich Dreipunkt-Biegeschubversuche an kurzen Balken mit den Abmessungen L x B x H = 190 x 62,5 x 31,3 cm mit einer Betonplattendicke von 8 cm durchgeführt (Abbildung 8). Die Balken versagten alle ausschließlich auf Schub im Bereich der schmalen Holzstege bei rechnerischen Schubspannungen im Holzsteg von ca. 3,2 N/mm<sup>2</sup>. Die sehr viel breitere

Holz-Beton-Verbundfuge blieb bei allen Versuchen unversehrt. Offensichtlich ist in dem vorliegenden HBV-System die Verbundfuge selbst nicht bemessungsrelevant.

## 4. Pilotprojekt mit Granulatsplitt verklebten HBV-Decken

### 4.1. Planung des Pilotprojekts und weiterführende Tests

In der Schweizer Gemeinde Sissach, im Umland von Basel gelegen, wurde ein zweistöckige Neubau eines kommunalen Doppelkindergartens in Holzbauweise geplant und realisiert (s. Abbildung 10 oben). Verantwortlicher Totalunternehmer war die Beer Holzhaus AG im Team mit Kast Kaepeli Architekten und dem Ingenieurbüro Pirmin Jung. Der Holzbau wurde von der Beer Holzbau AG aus Ostermundigen umgesetzt.

Die ursprüngliche Planung sah für die 7,30 m spannende HBV-Decke einen Querschnitt mit 14 cm Beton auf 16 cm Massivholz vor, exklusive der zusätzlichen 5,5 cm Akustikbekleidung und eine Kervenverbindung. Als Alternative wurde zunächst ein Lignotrend Element von 24,9 cm Höhe (inkl. dem Akustikpanel 3,2 cm), ebenfalls 14 cm Aufbeton und eine Verbindung durch Verschraubung geplant. Das neue Verbundsystem mit Granulatsplittverklebung konnte als Sondervorschlag des Ausführenden eingebracht werden. Damit ergab sich ein Querschnitt aus 10 cm Aufbeton und einem 28,9 cm hohen (inkl. Akustikpanel 3,2cm) Lignotrend Hohlkastenelement (Abbildung 9 mitte).

Für diese erstmalige praktische Anwendung des neuartigen Klebeverbundsystems wurde der folgende, sehr konservative Bemessungsansatz gewählt: Das Lignotrend Hohlkastenelement wurde so dimensioniert, dass es allein alle Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit erfüllt. Damit wird die Standsicherheit auch ohne den Klebeverbund gewährleistet und der Beton in dieser Betrachtung lediglich als Last aufgefasst.

Für die Gebrauchstauglichkeitsnachweise, also die Anfangs- und Endverformungen sowie das Schwingungsverhalten, wurde die 10 cm starke Betonschicht als starr mit dem Holz verbunden betrachtet und damit der Verbundquerschnitt angesetzt. Das Holzelement alleine hätte diese Nachweise nicht erfüllt. So ergaben sich mit dem etwas überdimensionierten Querschnitt rechnerisch Durchbiegungen von l/1000 im Anfangszustand und l/550 unter Berücksichtigung von Kriechen und Schwinden.

Der Schwingungsnachweis war mit einer rechnerischen Eigenfrequenz von 7,2 Hz, zusammen mit dem Steifigkeits- und Beschleunigungskriterium erfüllt. Nachträgliche Messungen am Bauwerk bestätigten die errechneten Verformungen. Die vor Ort gemessene Eigenfrequenz lieferte hingegen mit 10,9 Hz deutliche bessere Werte, obwohl dem, in der Berechnung nicht berücksichtigten, Akustikpanel i.d.R. nur 1-2 Hz Verbesserung zuzuschreiben sind. Somit wäre sogar das strenge 8 Hz Kriterium erfüllt.

Die volle Leistungsfähigkeit des Systems kann ausgeschöpft werden, wenn auch für die Standsicherheit ein starrer Klebeverbund angesetzt wird. Dann genügt eine Gesamthöhe des Verbundquerschnitts von 32,2 cm (inkl. 8 cm Beton und 3,2 cm Akustikpanel, s. Abbildung 9 rechts). Dieser reduzierte Querschnitt wurde für zusätzliche Tests gefertigt und im Versuchsstand der TU Berlin erfolgreich getestet (Abbildung 10 unten). Die Versuche bestätigten, dass die Querschnittshöhe gegenüber der konservativen Ausführung im Pilotprojekt um 6 cm reduziert werden könnte. Der Vollständigkeit halber zeigt Abbildung 9 links zusätzlich einen reinen Holzquerschnitt, der die Nachweise für diese Decke erfüllen würde.

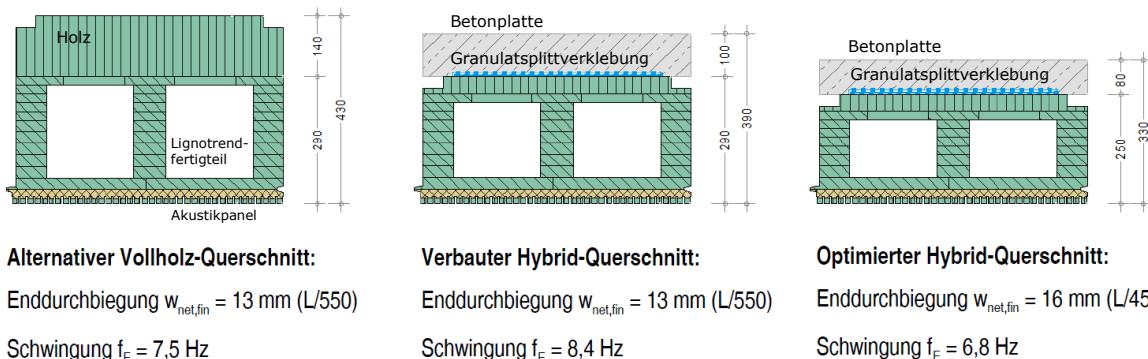


Abbildung 9: Querschnittsvarianten mit Lignotrend-FT: links: reiner Holzquerschnitt; mitte: ausgeführter HBV-Querschnitt mit Granulatsplittverklebung; rechts: optimierter Querschnitt mit Verklebung

## 4.2. Ausführung

Alle Hohlkastenelemente wurden inkl. einer vollflächigen Splittbestreuung werkseitig vorgefertigt und zur Baustelle geliefert (Abbildung 5b+10). Nach dem Verlegen der Holzdeckenelemente wurde die Bewehrung sowie die Betonschicht aus Transportbeton bauseits hergestellt. Zur Produktionskontrolle und Qualitätssicherung wurden zusätzlich kurze Biegebalken erstellt, die den gleichen Fertigungsweg, inkl. der Betonage auf der Baustelle, durchliefen und später hinsichtlich der Fugenfestigkeit werksintern geprüft wurden.

Für die Montage konnten die ursprünglichen Vorgaben der Tragwerksplaner von Pirmin Jung, wie die Zwischenstützung, die Überhöhung und die Bewehrung der Betonplatte, ohne Änderungen übernommen werden. Auch an dem, in der Betonschicht geplanten, Leitungsverzug der Haustechnik konnte ebenfalls ohne Änderung festgehalten werden. Bei der Montage der Deckenelemente wurde eine temporäre Zwischenstützung an den Drittelpunkten eingerichtet. Diese diente zur Herstellung einer Überhöhung von 10 mm zur Vorwegnahme der Verformung durch Eigengewicht und nahm die Lasten aus dem Frischbeton bis zum Aushärten des Betons auf.

Nach dem Verlegen der Holzelemente wurden die Stöße mit Koppelbrettern verbunden und mit werkseitig vorbereiteten Folien wassererdicht verklebt. Die Deckenfläche war damit kurz nach dem Verlegen ohne weitere Maßnahmen vor der Witterung geschützt. Der Betonbauer fand somit nach dem «besenreinen» Säubern mit einem üblichen Baustellensauber eine ebene, feste, besplittete Fläche vor, die den sonstigen mineralischen Umgebungen im Betonbau ähnelte. Beim Verlegen des Stahls und dem Betonieren konnten die üblichen Routinen aus dem Betonbau ohne Einschränkung genutzt werden. Insbesondere war keine besondere Rücksichtnahme auf Verschraubungen oder Kerven notwendig, die sonst beim Betonieren Einschränkungen der Laufwege bedeuten, bzw. Gefahr laufen, beschädigt oder krummgetreten zu werden. Der Bauablauf der HBV-Decken verlief schnell und problemlos. Weitere Projekte sind bereits in Planung.



Abbildung 10: oben: Doppelkindergarten Sissach, li: Ansicht re: Holzlage der HBV-Decke ©Beer Holzbau AG unten links: Träger im Biegeversuch unten rechts: Träger mit Granulatsplitt vor dem Betonieren

## 5. Zusammenfassung

Der kurze Überblick über die Forschungen zum geklebten Verbund zwischen Beton und Holz bestätigt die Leistungsfähigkeit dieser Verbindungstechnologie in Kurz- und einigen Langzeituntersuchungen. Als neue Verbindungsvariante wird hier ausführlich die Granulatsplitt-Verklebung vorgestellt, die von der Firma Lignotrend zusammen mit der TU-Berlin entwickelt und erforscht wurde. Sie hat den Vorteil, dass damit der Verbund zwischen Beton und Holz sowohl im Werk als auch auf der Baustelle qualitätssicher ausgeführt werden kann. Der Versagensmechanismus wird vom entwerfenden Ingenieur durch die Wahl der Beton- und Holzgüte, sowie der Klebstoffqualität definiert. So tritt z.B. im Schubtest mit 2K-Epoxid-Verklebungen von Holz C24 oder GL24 mit Betonklassen bis C35/45 durchweg Betonversagen auf. Andererseits versagen HBV-Konstruktionen mit üblichen Spannweiten, geeignetem Klebstoff, Verklebung über die Balkenbreite und sorgfältiger Ausführung in der Praxis immer auf Biegezug im Holz bevor die Schubtragfähigkeit in der Verbundfuge erreicht ist.

Die Forschungspartner TU-Berlin und Lignotrend danken dem Bundesministerium für Wirtschaft für die Unterstützung der Forschung im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM). Außerdem gilt der Dank dem Totalübernehmer Beer Holzhaus AG, dem Tragwerksplaner Pirmin Jung und dem ausführenden Holzbauunternehmen Beer Holzbau AG für die reibungslose und erfolgreiche Umsetzung des Pilotprojekts in der Schweiz.

## 6. Literatur

- [1] Pincus, G.: Behaviour of Wood-Concrete Composite Beams. Journal of the Structural Division, Proceedings American Society of Civil Engineers, (1970), S. 2009–2019
- [2] Negrao, J. H., Oliveira, F. M., Oliveira, C. L.: Investigation on Timber-Concrete Glued Composites. 9th World Conference on Timber Engineering, Portland, (2006)
- [3] Brunner, M., Romer, M., Schnüriger, M.: Timber-concrete-composite with an adhesive connector (wet on wet process). Materials and Structures 40 (2007), S 119-126
- [4] Zauft, D.: Untersuchungen an geklebten Verbundkonstruktionen aus Holz und Leichtbeton. Dissertation. Heftreihe des Instituts für Bauingenieurwesen TU-Berlin, Shaker Verlag (2014),
- [5] Zauft, D.; Schmid, V.; Polak, M. A.; Bonded Timber-concrete composite floors with lightweight concrete; World Conference on Timber Engineering; TU Wien, (2016)
- [6] 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
- [7] Frohnmüller, J.; Seim, W.: Geklebter Holz-Beton-Verbund. Stand des Wissens und der Forschung. Bauen mit Holz, Jg.123, Nr. 3, (2021), S.30-35
- [8] Frohnmüller, J.; Fischer, J.; Seim, W.: Full-scale testing of adhesively bonded timber-concrete composite beams. Materials and Structures 54, (2021), S. 1–21.
- [9] Mérono, M. et al.: Innovative Heißklebung von tragenden Holz-Beton-Verbundelementen. Adhäsion Kleben & Dichten (2019), Volume 63, S. 30–34
- [10] Hackspiel, C.: Verklebung als Verbund für Holz-Beton-Deckensysteme. 1. Holzbau Kongress Berlin (DHK) 2020, Forum Holzbau (2020), S. 31 - 39