

Verklebung als Verbund für Holz-Beton-Deckensysteme

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



Verklebung als Verbund für Holz-Beton-Deckensysteme

1. Holz Beton-Verbund im Geschossbau

Der Holzbau findet immer mehr Einzug in den urbanen, verdichteten Raum. Durch das Stapeln bzw. das dichte Zusammenführen unterschiedlicher Nutzungseinheiten wachsen auch die Anforderungen an Geschossdecken, insbesondere hinsichtlich des Schall- und Brandschutzes. Die Holz-Beton-Verbund-Decke bietet darauf mit seiner verhältnismäßig schweren mineralischen Deckschicht eine einfache Antwort. Durch den klugen Einsatz der beiden Verbundpartner sind Spannweiten möglich, die in reiner Holzbauweise nur mit einer großen Bauteilhöhe möglich sind und meist aus Gründen der geringen Wirtschaftlichkeit ausgeschlossen werden. Mit Spannweiten von 8,10 Metern und mehr werden Nutzungsarten über das Wohnen hinaus erschlossen und übliche Raster der Bildungs- und Bürobauten bedient. Die Stahlbetonplattendicken in HBV-Decken von meist 10-12 cm ergeben Deckenmassen und -steifigkeiten, mit denen die bemessungsrelevanten Verformungs-, Schwingungs- und Schallschutznachweise gut einzuhalten sind. Die Holz-Beton-Verbundbauweise ist mittlerweile Stand der Technik.

Derzeit kommen eine Vielzahl unterschiedlicher Verbindungssysteme und Herstellungsmethoden zum Einsatz. Während zum Beispiel komplett vorgefertigte HBV-Elemente aufgrund ihres Gewichts einen hohen Transportaufwand bedeuten, sind dabei Montagezeiten deutlich reduziert. Lösungen mit bauseitiger Ortbetonergänzung nutzen regionale Rohstoffvorkommen, haben aber die üblichen Beton Aushärtezeiten im Bauprozess zur Folge. Zudem ist in allen Fällen der Witterungsschutz der empfindlichen Holzbauteile zu lösen.

Es gibt Optimierungspotential u.a. in der Herstellung, der Technologie und den Kosten, mit dem sich Holzbauer und Forscher oft gemeinsam auseinandersetzen. Die Weiterentwicklung der Klebetechnik ist nach Ansicht der Verfasser besonders interessant, da sie eine quasi starre und damit hocheffiziente Verbindung ergibt, die vergleichsweise schnell und preiswert herstellbar ist. Die folgenden Ausführungen geben daher zunächst einen Überblick der Entwicklungen geklebter Holz-Beton-Verbund-Lösungen und stellen dann erste Forschungsergebnisse eines neuartigen Verbundes vor, der an der TU Berlin zusammen mit der Firma Lignotrend entwickelt wurde. Die sogenannte Granulatsplittverklebung konnte bereits erfolgreich in einem ersten Pilotprojekt in der Schweiz auf ihre Praxistauglichkeit geprüft werden, welches ebenfalls Gegenstand dieses Beitrags ist.

2. Forschungstätigkeiten zur Verklebung im HBV

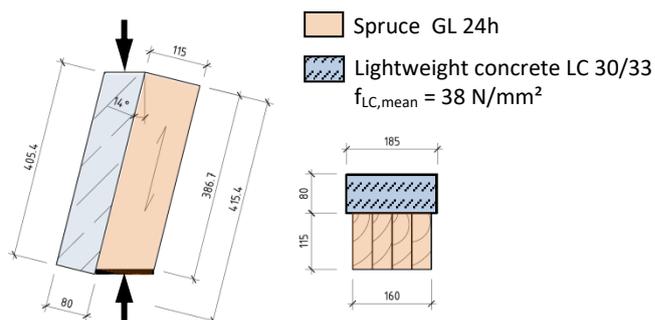
2.1. Klebetechnologie «nass-in-nass»

In dem von Rhomberg Bau initiierten, multidisziplinären Forschungsprojekt LifeCycle Tower wurde schon 2009 von Hermann Kaufmann Architekten und Arup Berlin das HBV-Fertigteil-Deckensystem entwickelt, das 2011 im LCT1 in Dornbirn umgesetzt und heute von CREE weiterbetrieben wird. In diesem Zusammenhang entstand an der TU-Berlin die Idee, das Transportgewicht der ca. 8m spannenden und ca. 2,1 m breiten HBV-Fertigteile durch den Einsatz von Leichtbeton zu reduzieren, um so anstatt zwei nun drei FT-Elemente pro LKW transportieren zu können. 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 der Beanspruchung unterhalb der Schraubenköpfe zerbröseln. Die Schubkraftübertragung zwischen Holz und Beton muss deshalb für Leichtbeton möglichst gleichmäßig und ohne Beanspruchungsspitzen erfolgen.

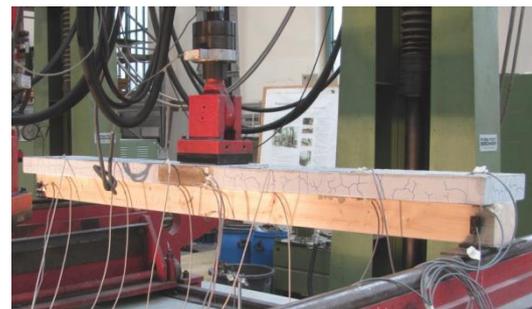
In dieser Zeit erhielt die TU-Berlin von einem Forschungspartner, der ABP Polymertechnologie, den Hinweis, dass ihr 2K-Epoxidharz-Klebstoff u.a. eingesetzt wird um Industrieestriche kraftschlüssig mit der darunterliegenden Ort betonplatte zu verkleben. Dazu wird das 2K-Epoxidharz auf die Betonrohdecke aufgebracht und noch während das Harz nass ist, wird der Estrichbeton direkt darauf gegossen.

Das LCT-Projekt wurde zwar weiterhin erfolgreich mit Normalbetonen vorangetrieben, doch an der TU-Berlin starteten diese Überlegungen ein Forschungsprojekt zur nass-in-nass Verklebung von Holz-Leichtbeton Verbundträgern (HLBV). Ein geeigneter Leichtbeton LC 30/33 mit der Wichte $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ wurde entwickelt. Entscheidend war dabei, dass die Betonmischung eine möglichst hohe Zugfestigkeit erreicht, da 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 Querkzug 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. Anschließend wurden große HBV-Träger mit praxisgerechten Dimensionen getestet. Wie erwartet versagten diese 5,7 m langen 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-Epoxidharz-Verklebung überstieg deutlich die Werte üblicher Verbindungsmittel (Abbildung 1). Sie ist in Abbildung 1 genähert als über die Schubfläche verschmierte, äquivalente mittlere Schubspannung τ_{mean} in N/mm^2 berechnet.



2) slip-block test

1) Shear failure in bending test, $l = 2,30 \text{ m}$

Bonded Connection	Notches	Screws
2 mm Epoxi leight-weight concrete LC 30/33	normal-weight concrete	4 pairs of screws normal-weight concrete
$\tau_{\text{mean}} = 2,6^{1)} - 5,4^{2)} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$\tau_{\text{mean}} = 1,3 - 1,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$\tau_{\text{mean}} = 0,7 - 1,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
		

Abbildung 1: Schubtragfähigkeiten aus Versuchen an nass-in-nass verklebtem Holz-Leichtbeton Verbund im Vergleich mit Ergebnissen für Holz-Normalbeton Versuche mit Kerben und Schrauben. Tragfähigkeiten ausgedrückt als äquivalente Schubspannungen [N/mm^2] 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 durchgeführten Schubversuche ergaben für die Slip-Block-Tests höhere Schubtragfähigkeiten als für die

kurzen Balkenversuche, da in der Fuge der Slip-Block-Tests zusätzlich zur Schubbeanspruchung beachtliche Querdruck- und Längsdruckspannungen auftreten. Außerdem war am kurzen Biegebalken nicht auszumachen, ob noch vor dem Schubbruch ein Biegezugversagen an der Balkenunterkante auftrat und damit die Schubtragfähigkeit tatsächlich etwas höher liegen würde.

Gleich zu Beginn unserer Beschäftigung mit geklebten HBV-Decken wurde klar, dass zu diesem Thema zwar nicht viel, aber schon seit langem erfolgreich geforscht wird. Im Prinzip sind dabei zwei Klebverfahren zu unterscheiden.

Erstens die hier beschriebene nass-in-nass Klebtechnologie, die nach Wissen des Verfassers bisher nur zusammen mit zweikomponentigen Epoxid-Klebern eingesetzt wurde. Übliche 1K oder 2K-PU-Kleber würden infolge der unvermeidbar hohen Betonfeuchte unkontrolliert aufschäumen. Veröffentlicht wurde dazu 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 2014 aus Berlin von Zauft und Schmid [4][5].

2.2. Nachträgliche Verklebung von Fertigteilen

Eine weitere Möglichkeit des Klebverbundes besteht in der nachträglichen Verklebung von Betonfertigteilen mit Holzträgern. Dazu sind prinzipiell verschiedene Klebstoffe vorstellbar. Üblich sind Epoxidharz- oder PU-basierte Klebstoffe, mit einem Vorteil für die 2K-Klebstoffe, da diese in der Regel höhere Festigkeiten erreichen. Diesbezüglich sind die Forschungen von Seim in Kassel mit aufgeklebten Fertigteilplatten aus ultrahochfestem Beton zu erwähnen [6][7]. Hackspiel von der Holzforschung Austria berichtet in [8] von HBV-Decken, die zusätzlich mit einer elastischen Zwischenschicht verklebt werden. Die Zwischenschicht soll die im Hochbau entwurfsrelevanten Schallschutzeigenschaften der Decken verbessern.

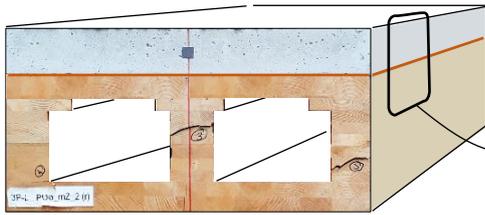
Ein Nachteil der bisherigen geklebten HBV-Bauweise sind die hohen Anforderungen an die Umgebungsbedingungen während des Verklebens, wie z.B. Einhaltung des erlaubten Temperaturbereichs, die Schmutzfreiheit und die vergleichsweise kurze Aushärtezeit der Klebstoffe. Bei Versuchen an großformatigen HBV-Platten wurde hier am Fachgebiet die Erfahrung gemacht, dass zur Herstellung einer vollflächigen Verklebung hohe Ansprüche an den Verklebevorgang bestehen. In der Praxis kann deshalb ohne großen Mehraufwand nur im Werk verklebt werden. Andererseits sind das Verkleben und das Bauen mit großen, vorgefertigten Bauteilen im Holzbau üblich und daher qualitätssicher zu bewerkstelligen.

2.3. Neuartige Granulatsplittverklebung

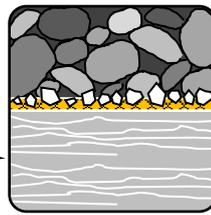
Auf Basis der vielversprechenden Ergebnisse mit verklebten Holz-Leichtbeton Verbundträgern werden an der TU-Berlin aktuell weitere Forschungsprojekte durchgeführt. Dabei werden verschiedene Klebevarianten in Kombination mit Normalbeton untersucht. Normalbeton der Güte C20/25 bis C50/60 erscheint den Verfassern für die Verklebung von Brettschichtholzbalken oder Brettsperrholzplatten für die Praxis am sinnvollsten. Diese Betone sind überall erhältlich und preiswert. Zusätzliche Anforderungen an Decken bezüglich Brandschutz, Schallschutz und die Schwingungsbegrenzung erfordern eher dickere Plattenstärken von ca. 10-12 cm und eine große Masse, die solche Normalbetonplatten umsonst liefern.

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 untersucht. 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 2 dargestellt.

a) HBV-Träger



b) Detail Fuge



c) Explosionszeichnung der Verklebung

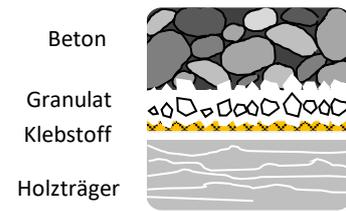
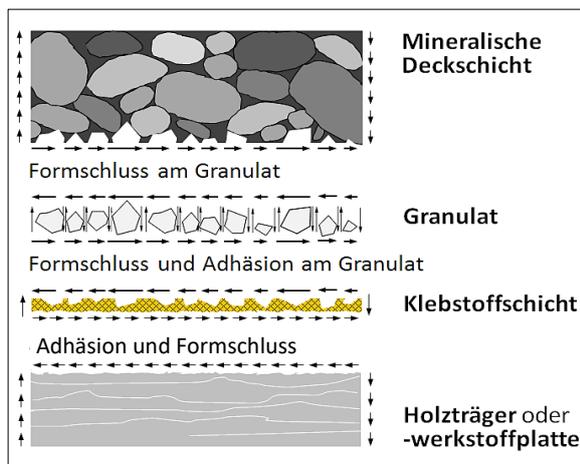


Abbildung 2: Prinzipskizze der Granulatsplittverklebung

Das Tragverhalten im Fugenbereich zeigt Abbildung 3a. Die Kraftübertragung zwischen Beton und Granulatsplitt erfolgt durch Formschluss, zwischen Granulatsplitt und Klebstoff durch Formschluss in Kombination mit Adhäsion (Kraftschluss) und zwischen Klebstoff und Holz durch Adhäsion und Formschluss.

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. C40/50 kann das Schubversagen im Holz erwartet werden. Ob ein Versagen der Klebefuge 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.

a) Prinzip der Kraftübertrag zwischen den unterschiedlichen Schichten im Fugenbereich



b) Versuchsergebnisse für unterschiedliche Klebstoffdicken und Granulatgrößen

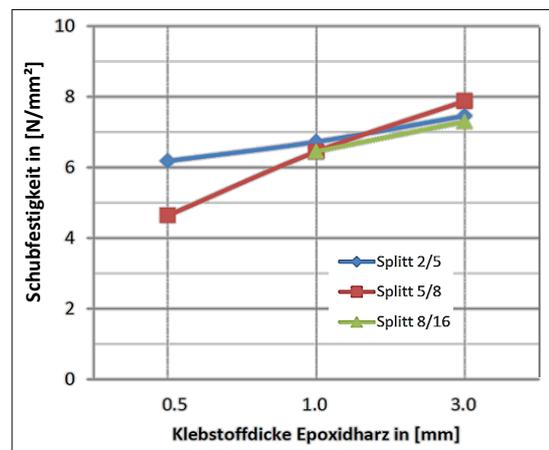


Abbildung 3: a) Tragprinzip Granulatsplittverklebung

b) mittlere Schubtragfähigkeiten im Slip-Block Versuch mit Epoxidharz

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. Dann hat er die Wahl, ebenfalls im Werk die Betonplatte aufzugießen und damit ein vorkonfektioniertes HBV-Fertigteil 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 liefern und dann vor Ort zu betonieren. Das besplittete Decken-Halbfertigteil ist im Gegensatz zu üblichen Holzträgern oder Brettsperrholzplatten durch die dichte Kleberschicht vor Wasser geschützt und damit sehr robust.

3. Erste 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 kleinformatischen Probekörpern durchgeführt um eine zuverlässige Verbundtechnologie zu entwickeln.

Als Klebstoff 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.

Die mit 2K-Epoxidharz verbundenen Probekörper versagten durchweg spröde außerhalb der Fuge 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 3b). Erst ab Bruchspannungen von ca. 6 N/mm^2 bis 7 N/mm^2 trat fast ausschließlich Schubversagen im Holz auf. Alle Serien wiesen nur geringe Streuungen von i.d.R. unter 10% auf. 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 4 zeigt am Beispiel der Versuchsserie mit unterschiedlichen Betongüten und einer Verklebung mit 2K-Epoxidharz, dass 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 darüber liegenden Betonfestigkeiten dominierte das Schubversagen im Holz.

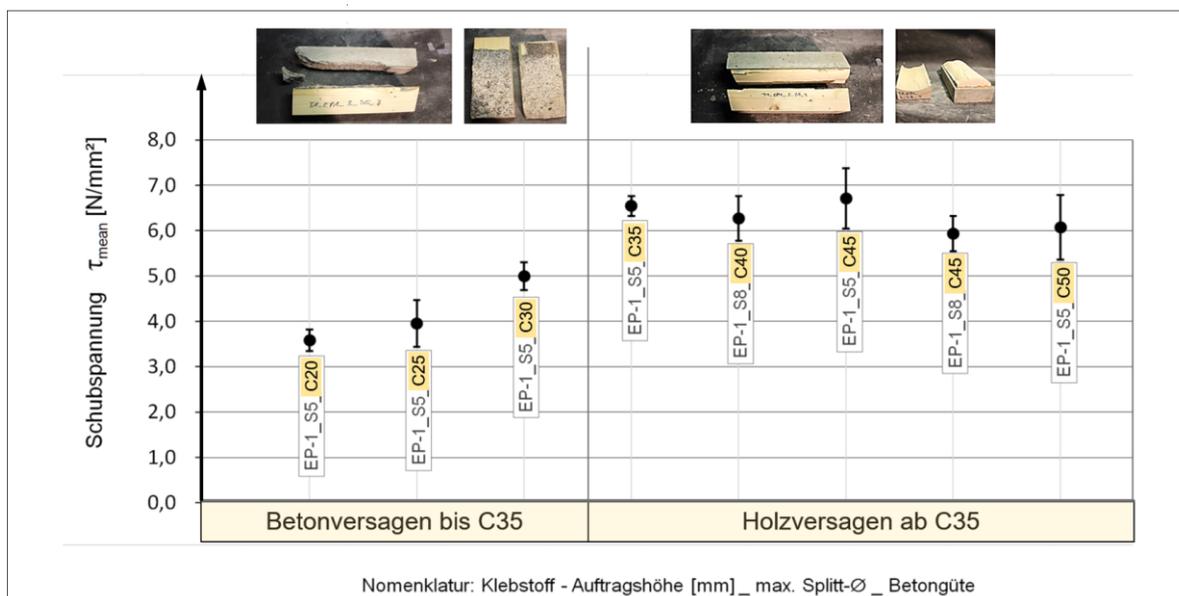


Abbildung 4: Beispiel Schubfestigkeit bei Slip-Block-Versuchen: 1 mm Epoxidharz, maximaler Granulatsplitt Durchmesser 5 und 8 mm, Betongüten zwischen C20/25 und C50/60

Die mit 1K-Polyurethan erstellten Probekörper versagten i.d.R. innerhalb der Klebstoffschicht und verhielten sich dabei duktil. Je nach Klebstofftyp und -auftragsmenge wurden Bruchspannungen τ_{mean} zwischen $0,8$ und $5,6 \text{ N/mm}^2$ ermittelt.

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 5). Es wurden Varianten mit 2K-Epoxidharz und 1K-Polyurethan bei einer Splittgröße von 2–5 mm untersucht.

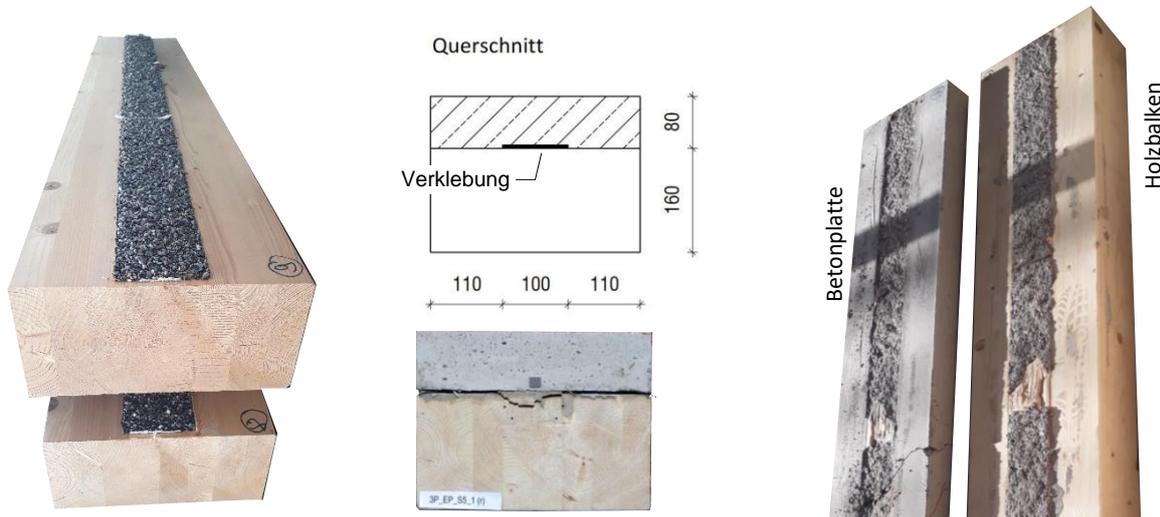


Abbildung 5: Kurze Biegeträger mit schmaler Fuge: Links: Vor dem Betonieren. Rechts: Nach den Versuchen mit Beton- und Holzversagen. Das Bild zeigt vorwiegend Betonversagen

Alle Serien erreichten Schubfestigkeiten in der Fuge von ca. $5,3 \text{ N/mm}^2$. 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.

Zur Untersuchung der Schubfestigkeit der neuen Granulatsplittverklebung in Verbindung mit den vorgefertigten Hohlkastenelementen der Fa. Lignotrend wurden zusätzlich Dreipunkt-Biegeversuche an kurzen Balken mit den Abmessungen $L \times B \times H = 190 \times 62,5 \times 31,3 \text{ cm}$ mit einer Betonplattendicke von 8 cm durchgeführt (Abbildung 6.)



Abbildung 6: Kurze, gedrungene Lignotrend-HBV-Träger nach den Drei-Punkt Biegeversuchen zum Test der Schubtragfähigkeit: Immer Schubversagen im Holz der Stege

Die Balken versagten alle ausschließlich auf Schub im Bereich der schmalen Holzstege bei rechnerischen Schubspannungen um $3,2 \text{ N/mm}^2$. Die sehr viel breitere Verbundfuge blieb bei allen Versuchen unversehrt. Offensichtlich ist in dem vorliegenden HBV-System die Verbundfuge selbst nicht bemessungsrelevant.

4. Umsetzung eines ersten Pilotprojektes

4.1. Planung des Pilotprojekts

In der Schweizer Gemeinde Sissach, im Umland von Basel gelegen, wurde ein zweistöckiger Neubau eines kommunalen Doppelkindergartens in Holzbauweise geplant und realisiert (s. Abbildung 8). Verantwortlicher Totalunternehmer war die Beer Holzhaus AG im Team mit Kast Kaeppli Architekten und dem Ingenieurbüro Pirmin Jung. Der Holzbau wurde von der Beer Holzbau AG aus Ostermundigen umgesetzt.

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

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 Nachweise der Gebrauchstauglichkeit, also die Anfangs- und Endverformungen sowie das Schwingungsverhalten, wurde die 10 cm starke Betonschicht als starr mit dem Holz verbunden in Ansatz gebracht und die Nachweise mit dem gesamten Verbundquerschnitt gerechnet. Das Holzelement allein hätte dazu nicht ausgereicht. So ergaben sich mit dem etwas überdimensionierten Querschnitt rechnerisch Durchbiegungen von 1/1000 im Anfangszustand und 1/550 unter Berücksichtigung des Kriechens. Der Schwingungsnachweis wurde mit einer rechnerischen Eigenfrequenz von 7,2 Hz in Zusammenhang mit der Erfüllung des Steifigkeits- und Beschleunigungskriteriums nachgewiesen. Nachträgliche Messungen am Bauwerk bestätigten die rechnerischen 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.



Abbildung 7: Fertigung: Lignotrend-Element vor und nach dem Auftrag der Splittverklebung © Lignotrend

Die volle Leistungsfähigkeit des Systems kann ausgeschöpft werden, wenn auch die Standsicherheit mit dem gesamten Verbundquerschnitt berechnet wird. Eine Vergleichsrechnung ergab, dass in diesem Fall eine Gesamthöhe von 32,2 cm (inkl. Akustikpanel) bei einer Betonschichtstärke von 8 cm ausreichen würde. Dieser Querschnitt wurde anschließend im Versuchsstand der TU Berlin untersucht und es konnten die rechnerisch ermittelten Steifigkeiten unter Annahme eines starren Verbundes bestätigt werden. Die zum Bruch führende Biegebeanspruchung entspricht einer äquivalenten Flächenlast von 42,6 kN/m². Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verringerung der Bauteilhöhe von mind. 6 cm möglich ist.

4.2. Ausführung

Alle Hohlkastenelemente wurden inkl. einer vollflächigen Splittbestreuung werkseitig vorgefertigt und zur Baustelle geliefert. Die Bewehrung sowie die Betonschicht aus Transportbeton wurden bauseits nach der Holzmontage hergestellt. Zur Produktionskontrolle und Qualitätssicherung wurden 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 zur Zwischenstützung, der Überhöhung und zur Bewehrung der Betonplatte ohne Änderungen übernommen werden. 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 der 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 die werkseitig vorbereiteten Folien wasserdicht verklebt. Die Deckenfläche war damit



Abbildung 8: oben: Doppelkindergarten Sissach, I.: Ansicht r.: Holzlage der HBV-Decke © Beer Holzbau AG
unten: Bewehrte Granulatsplitt-Rohdecke vor und während der Betonage © Lignotrend

kurz nach dem Verlegen ohne weitere Maßnahmen vor der Witterung geschützt. Der Betonbauer fand somit nach dem «besenreinen» Säubern mit einem üblichen Baustellensauger 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 Kerfen notwendig, die sonst beim Betonieren Einschränkungen der Laufwege bedeuten, bzw. Gefahr laufen, beschädigt oder krummgetreten zu werden.

Nach Fertigstellung war der Ausführende vom schnellen und problemlosen Bauablauf des Pilotprojekts so überzeugt, dass er das System gleich für weitere Bauvorhaben anfragte.

5. Zusammenfassung

Der kurze Überblick über die bis heute vorhandenen Forschungsergebnisse zum geklebten Verbund zwischen Beton und Holz bestätigt die Leistungsfähigkeit dieser Verbindungstechnologie in Kurz- und einigen Langzeituntersuchungen. Als neue Verbindungsvariante wird hier 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 qualitäts-sicher ausgeführt werden kann. Der Versagensmechanismus wird vom entwerfenden Ingenieur durch die Wahl der Beton- und Holzgüte, sowie der Klebstoffqualität definiert. Beispielsweise tritt im Schubtest für die 2K-Epoxid-Verklebungen von Holz C24 oder GL24 mit Betonklassen bis C35/45 durchweg Betonversagen auf. Andererseits wird für die praktische Anwendung, mit für HBV-Konstruktionen typischen Spannweite, die Tragfähigkeit immer vom Biegezugbruch im Holz bestimmt werden, lange 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] Schäfers, M.; Seim, W.: Geklebte Verbundbauteile aus Holz und hoch- bzw. ultrahochfesten Betonen. Bautechnik 88 (2011), Heft 3, S. 165 - 176
- [7] Mérono, M; Seim, W. et al.: Innovative Heißklebung von tragenden Holz-Beton-Verbundelementen. Adhäsion Kleben & Dichten (2019), Volume 63, S. 30–34
- [8] Hackspiel, C.: Verklebung als Verbund für Holz-Beton-Deckensysteme. 1. Holzbau Kongress Berlin (DHK) 2020, Forum Holzbau (2020), S. 31 - 39