

Decken für Holzhochhäuser

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



Decken für Holzhochhäuser

1. Einige Design-Kriterien für Hochhausdecken

Hochhäuser werden häufig als Büro-, Wohn- oder Mixed-Use-Gebäude genutzt. Sie haben dementsprechend größere Deckenspannweiten, die für flexible Bürogebäude heute oft 8,10 m oder weiter spannen. Im mehrgeschossigen Bauen dienen diese Decken als Wohnungstrenndecken und müssen dementsprechend sehr strenge bauphysikalische Anforderungen hinsichtlich Schall- und Brandschutz erfüllen. Insbesondere der Raum- und Trittschallschutz verlangt schwere Deckensysteme. Werden diese als Holzbetonverbund-Decken mit einer durchgehenden Stahlbetondecke von ca. 10-12 cm ausgeführt, können damit die Anforderungen des Schall- und Brandschutzes gut erfüllt werden. HBV-Systeme haben zudem den Vorteil, dass sie die, für die Bemessung maßgebenden Nachweise der Durchbiegung und der Deckenschwingungen mit geringeren Bauhöhen als mit BSP- oder Holzbalkendecken erfüllen können. Gleichzeitig schaffen HBV-Rippendecken zwischen den Rippen Platz für die Haustechnik und benötigen insgesamt deutlich weniger Holz als die extrem materialintensiven BSP-Decken.

Ein Beispiel für ein kombiniertes Büro-, Hotel- und Wohngebäude ist das mit einem Holzfachwerk ausgesteifte, 18 stöckige Mjøstårnet in Norwegen. Das Holzhochhaus wurde zunächst mit Holzdecken von bis zu 7,50 m Spannweite geplant und in den unteren Geschossen auch so mit Hohlkastendecken ausgeführt. Für die Decken in den oberen Stockwerken 12–18 mussten jedoch schwere, 30cm dicke Stahlbetondecken eingesetzt werden [1].



Abbildung 1: Konstruktion 18 stöckiger Mjøstårnet, Norwegen. Holzdecken unten und Betondecken oben

Der Grund für die Verwendung der schweren Betondecken in den Obergeschossen sind die strengen Horizontalbeschleunigungskriterien, die für Hochhäuser eingehalten werden müssen. Sie garantieren, dass auch bei stärkeren Winden eine unbeeinträchtigte Nutzung des Gebäudes ohne große Horizontalbewegungen möglich ist. Das wird im folgenden Kapitel erläutert

2. Einige Design-Kriterien für Hochhäuser

Maßgebend beim Tragwerksentwurf von Hochhäusern ist die Aussteifungskonstruktion, die die Windlasten in die Fundamente ableitet. In der Regel wird dazu der betonierte Hochhauskern genutzt. Der Wind bläst un stetig und turbulent. DIN EN 1991-1-4-Windlasten [2] beschreibt den Wind als eine Grundströmung mittlerer Windgeschwindigkeit, in die Böen unterschiedlicher Größe und Windgeschwindigkeit eingelagert sind (Abbildung 2).

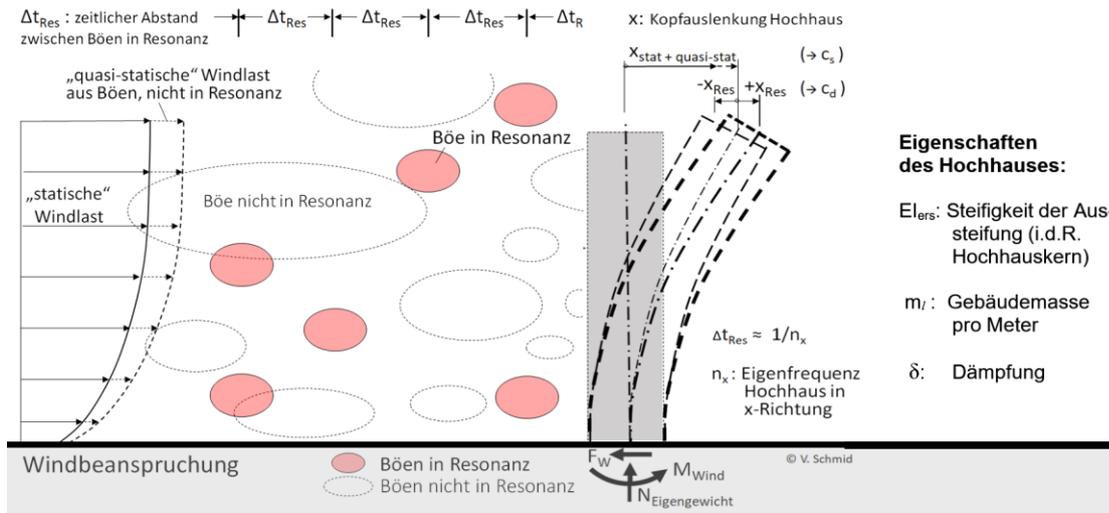


Abbildung 2: Der Wind setzt sich zusammen aus dem statischen Anteil (konstanter Wind), dem quasi-statischen Anteil aus nicht-resonanten Böen und einem resonanten Anteil aus denjenigen Böen, deren Auftrefffrequenz in etwa der Eigenfrequenz n_{1x} des Gebäudes entspricht. Nur diese Böen (hier rot gekennzeichnet) regen das Hochhaus zu Schwingungen an.

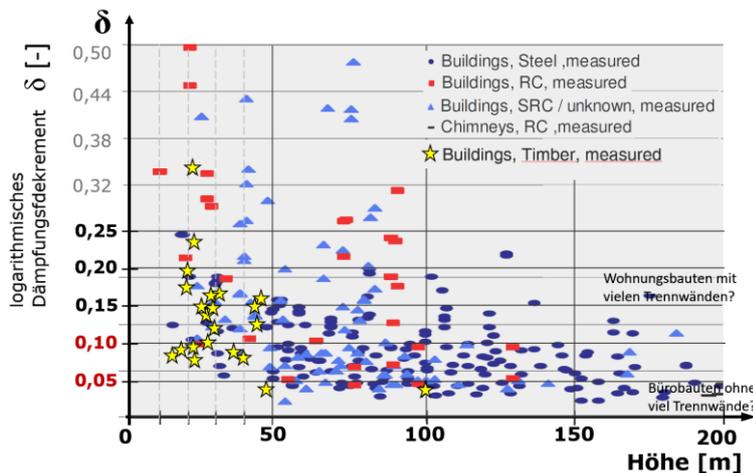


Abbildung 3: Gemessene Dämpfungen von ausgeführten Bauwerken, nach Smith and Wilford 2008 [3]

Ungünstig ist, dass einige dieser Böen das Hochhaus in einem Zeitabstand treffen, der der Schwingungsperiode des Hochhauses entspricht. Die Eigenschwingung des Hochhauses wird durch diese resonanten Böen angeregt. Das führt zum Schwingen des Hochhauses in der Eigenfrequenz, mit zusätzlichen Auslenkungen und Biegemomenten und – besonders wichtig – mit Horizontalbeschleunigungen. Diese stören die Nutzer und müssen deshalb in ihrer Größe beschränkt werden.

Für die auftretende Beschleunigung a kann folgende Proportionalität formuliert werden:

$$a \sim \frac{1}{\sqrt{m_l} \cdot \sqrt{EI_{ers}} \cdot \sqrt{\delta}} \quad (\text{Gl. 1})$$

Etwas vereinfacht dargestellt ist die Beschleunigung damit umgekehrt proportional zur Wurzel aus der Masse pro Meter Hochhaushöhe m_l [kg/m], der Wurzel der Ersatzbiegesteifigkeit der Aussteifungskonstruktion EI_{ers} und der Wurzel der Bauwerksdämpfung δ . Die Dämpfung δ von Hochhäusern nimmt mit zunehmender Hochhaushöhe ab und scheint wenig vom Baumaterial abhängig zu sein. Sie wird als logarithmisches Dämpfungsdekrement δ ab 150m Höhe meist im Bereich von 5% gemessen, manchmal auch geringer und erreicht nur bei kleinen Höhen 10% und mehr (s. Abbildung 3). Ein positiver Einfluss der Anzahl von Trennwänden auf die Dämpfung kann vermutet werden.

Der entwerfende Ingenieur kann nach Gl.1 die Beschleunigung a reduzieren, indem er die Masse m_i des Hochhauses vergrößert sowie die Steifigkeit EI_{ers} der Ausaussteifung erhöht. Die Masse eines Hochhauses bilden vorwiegend die Decken und der Hochhauskern. Die Beschleunigung kann also reduziert werden, indem die Deckenmasse erhöht wird. Entscheidend ist dabei die Masse im oberen Viertel des Gebäudes. So erklären sich auch die Stahlbetondecken im oberen Gebäudeteil des Mjøstårnet.

Im Holzbau bieten sich zur Massenerhöhung vor allem HBV-Decken mit ihren bauphysikalischen Vorteilen an. Wegen ihrer hohen Längs- und Quersteifigkeit können sie zudem die strengen Durchbiegungs- und Schwingungskriterien mit geringeren Bauhöhen als Holzdecken erfüllen. Zusätzlich kann die Masse des Hochhauskerns um den Faktor 5 erhöht und gleichzeitig dessen Steifigkeit EI_{ers} verdreifacht werden, wenn der Hochhauskern in Stahlbeton statt in Holz ausgeführt wird.

Eine ausführliche Beschreibung zur Aussteifung von Holz-, Holzhybrid- und Betonhochhäusern mit Beispielrechnungen findet sich in Schmid, Nettekoven, Sutter 2018 [4]

3. Weiterentwicklung von HBV-Decken für den mehrgeschossigen Holzbau

Decken in Holz-Beton-Verbund Bauweise sind heute Stand der Technik. Insbesondere im mehrgeschossigen Wohnungsbau und bei größeren Spannweiten hilft ihre größere Masse und Steifigkeit die bemessungsrelevanten Verformungs-, Schwingungs- und Schallschutznachweise einzuhalten. Trotzdem haben HBV-Decken noch Verbesserungspotential in Herstellung, Technologie und Kosten, mit dem sich Holzbauer und Forscher oft gemeinsam auseinandersetzen. Hier liefert die Klebetechnik einen wichtigen Ansatzpunkt, da die Verklebung von Holz und Beton eine quasi starre und damit hocheffiziente Verbindung ergibt, die vergleichsweise schnell und preiswert herstellbar ist. Im Folgenden wird die Entwicklungen im Bereich des geklebten Verbunds zwischen Beton und Holz vorgestellt sowie ein realisiertes Pilotprojekt, das von der TU-Berlin zusammen mit der Firma Lignotrend erforscht und umgesetzt wurde.

3.1. Bisherige Forschungen zu geklebten HBV-Decken

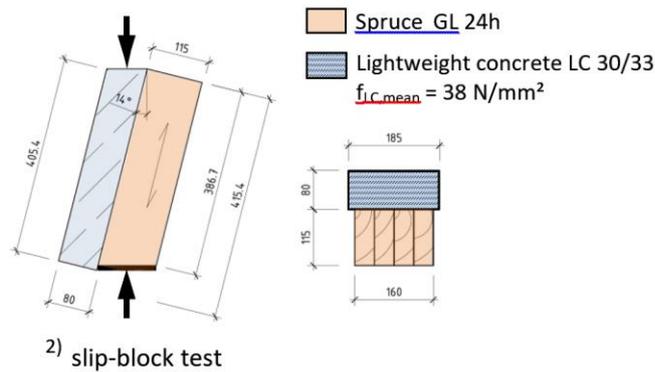
Zu geklebten HBV-Decken wird seit längerer Zeit wenig aber erfolgreich geforscht. Im Prinzip sind dabei zwei Klebverfahren zu unterscheiden.

Nass-in nass-Verklebung

Bei der nass-in-nass Klebetechnologie wird der Beton direkt auf den noch feuchten, reaktionsfähigen Kleber gegossen. Nach Wissen des Verfassers werden dazu nur zweikomponentigen Epoxid-Klebern eingesetzt. Übliche 1K oder 2K-PU-Kleber würden infolge der unvermeidbar hohen Betonfeuchte unkontrolliert aufschäumen. Veröffentlicht wurde zur Nass-in-Nass-Verklebung schon in den 70er Jahren von Pincus in den USA [5], Negrao in Portugal 2004 [6] und vor allem von Brunner in der Schweiz bis 2007 [7].

Die TU-Berlin forscht zur Nass-in-Nass-Verklebung mit Normalbeton und schon seit 2004 mit Leichtbeton (Zauft und Schmid [8][9]). Dazu wurde zunächst ein geeigneter Leichtbeton LC 30/33 mit der Wichte $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ entwickelt, mit dem Ziel eine möglichst hohe Zugfestigkeit zu erreichen, denn die Schubtragfähigkeit von unbewehrtem Beton wird direkt von seiner Zugfestigkeit bestimmt und nur indirekt von seiner Druckfestigkeit.

Die Tragfähigkeit des nass-in-nass verklebten Holz-Leichtbeton-Verbunds (HLBV) wurde zunächst im kleinen Maßstab mit Slip-Block Tests und anschließend mit 2,3 m kurzen Biegebalken untersucht. Damit wurde ein Schubversagen in der Verbundfuge provoziert. Anschließend wurden praxisgerechte 5,7 m lange HLBV-Träger getestet. Wie erwartet versagten diese ausschließlich auf Biegezug im Holz, lange bevor die Schubtragfähigkeit in der Fuge erreicht wurde. In den Kleinversuch trat der Bruch fugennah im Beton auf. Die erreichte Schubtragfähigkeit der 2K-Epoxid-Verklebung überstieg deutlich die Werte üblicher Verbindungsmittel (s. Abbildung 4). Sie ist in Abbildung 4 genähert als über die Schubfläche verschmierte, äquivalente mittlere Schubspannung τ_{mean} in N/mm^2 berechnet.



Bonded Connection	Notches	Screws
2 mm Epoxi light-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 4: Schubtragfähigkeiten aus Versuchen an nass-in-nass verklebtem Holz-Leichtbeton Verbund im Vergleich mit Ergebnissen aus Holz-Normalbeton Versuchen mit Kerben und Schrauben. Tragfähigkeiten ausgedrückt als äquivalente Schubspannungen $[\text{N}/\text{mm}^2]$ im Fugenbereich

Nachträgliche Verklebung von Betonfertigteileplatten mit Holz

Die zweite Möglichkeit besteht in der nachträglichen Verklebung von Betonfertigteilen mit Holzträgern. Dazu sind prinzipiell verschiedene Klebstoffe vorstellbar. Üblich sind Epoxid- 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 Fertigteileplatten aus ultrahochfestem Beton zu erwähnen [10][11]. Hackspiel von der Holzforschung Austria berichtet in [12] von HBV-Decken, die zusätzlich mit einer elastischen Zwischenschicht verklebt werden. Die Zwischenschicht soll die im Hochbau entwurfsrelevanten Schallschutzeigenschaften der Decken verbessern.

Nachteilig für beide geklebter HBV-Bauweisen sind die hohen Anforderungen an die Umgebungsbedingungen während des Verklebens, wie die Einhaltung des erlaubten Temperaturbereichs, die Schmutzfreiheit und die vergleichsweise kurzen Aushärtezeiten der Klebstoffe. In der Praxis kann deshalb ohne großen Mehraufwand nur im Werk verklebt werden. Andererseits ist der Holzbau die Baubranche mit der größten Klebeerfahrung und baut schon lange erfolgreich und qualitätssicher mit großen, vorgefertigten Bauteilen.

An der TU-Berlin werden aktuell mehrere Forschungsprojekte zu verschiedenen Klebevarianten für HBV-Decken in Kombination mit Normalbeton untersucht. Normalbeton der Güte C20/25 bis C50/60 erscheint 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 dickere Plattenstärken von ca. 10-12 cm und eine große Masse, die solche Betonplatten aus Normalbeton umsonst liefern.

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

4.1. 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 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 5 dargestellt.

Der besondere Vorteil der Granulatsplittverklebung besteht für den Holzbauer darin, dass er die Verklebung des Splitts witterungsgeschützt und unter saubereren Bedingungen im eigenen Betrieb durchführen kann. Ob der Beton im Werk oder später auf der Baustelle auf das besplittete Holzelement gegossen wird, hängt dann von den Randbedingungen ab.

Das Tragverhalten im Fugenbereich zeigt Abbildung 6a. Wird ein Klebstoff mit hoher Tragfähigkeit und ein geeigneter Splitt gewählt, tritt das Versagen oberhalb der Klebefuge im Beton ein, sofern ein üblicher Beton verwendet wird. Bei höheren Betonfestigkeiten, ab ca. C35, kann das Schubversagen im Holz erwartet werden.

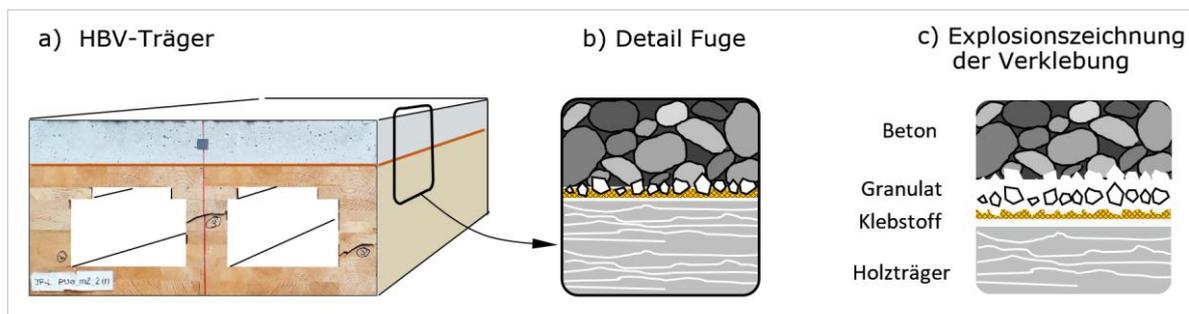


Abbildung 5: Prinzipskizze der Granulatsplittverklebung

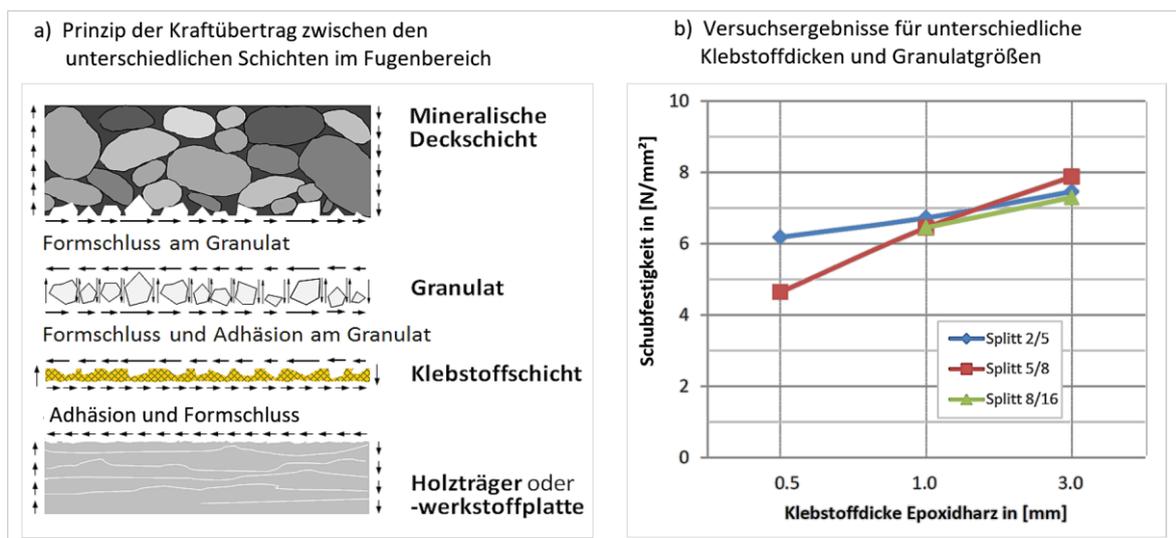


Abbildung 6: a) Tragprinzip Granulatsplittverklebung b) mittlere Schubtragfähigkeiten im Slip-Block Versuch mit Epoxidharz

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.

4.2. Forschungsergebnisse zur Granulatsplittverklebung

Die vier das Verbundsystem konstituierenden Werkstoffen Beton, Granulat, Klebstoff und Holz ergeben mit ihren unterschiedlichen Parametern eine Vielzahl an möglichen Kombinationen. Deshalb wurden zunächst zahlreiche Vorversuche an kleinformatigen 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. Die Versuche mit Korngrößen bis 16mm wurden nicht weiterverfolgt. 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 (Abbildung 6b Mittelwert aus 5 Versuchen, 3mm Fugendicke). Ab Bruchspannungen von ca. 6 N/mm^2 bis 7 N/mm^2 trat das 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 besseren Baustellentauglichkeit wurden die Untersuchungen mit einem gebrochenen Edelsplitt der Sieblinie 2-5 mm fortgesetzt.

Die Versuchsserie in Abbildung 7, mit unterschiedlichen Betongüten und einer Verklebung mit 2K-Epoxidharz, zeigen, dass nicht die Klebefuge die Schubtragfähigkeit limitiert. Bis zu einer Festigkeit von C35/45 kam es ausschließlich zum Versagen im Beton. Bei den darüber liegenden Betonfestigkeiten dominierte das Schubversagen im Holz.

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

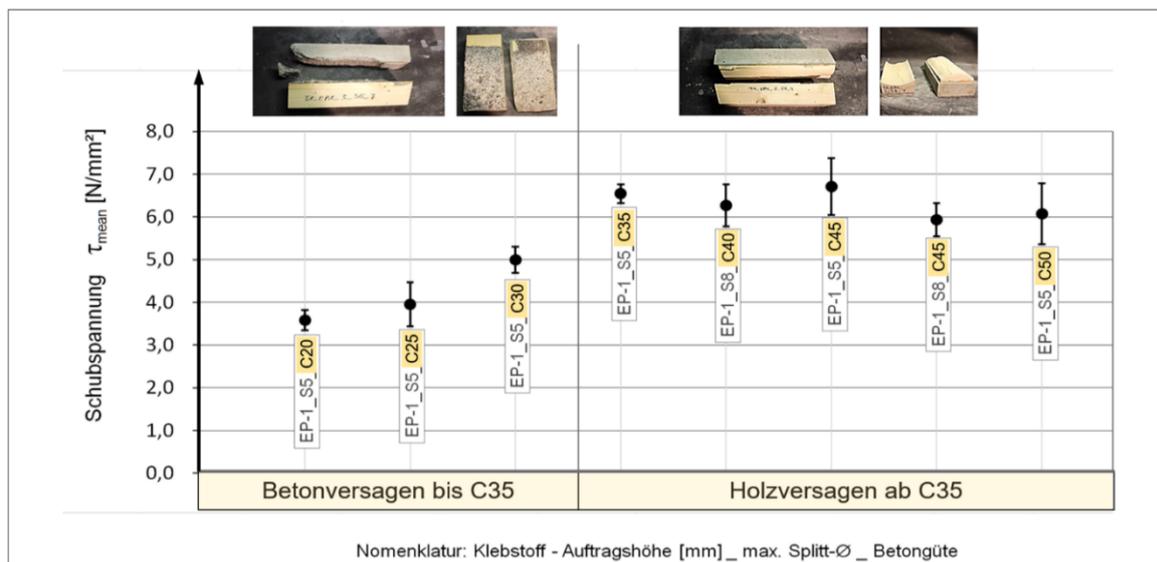


Abbildung 7: Beispiel Schubfestigkeit bei Slip-Block-Versuchen: 1 mm Epoxidharz, maximaler Granulatsplitt, maximaler Splittdurchmesser 5 und 8 mm, Betongüten zwischen C20/25 und C50/60

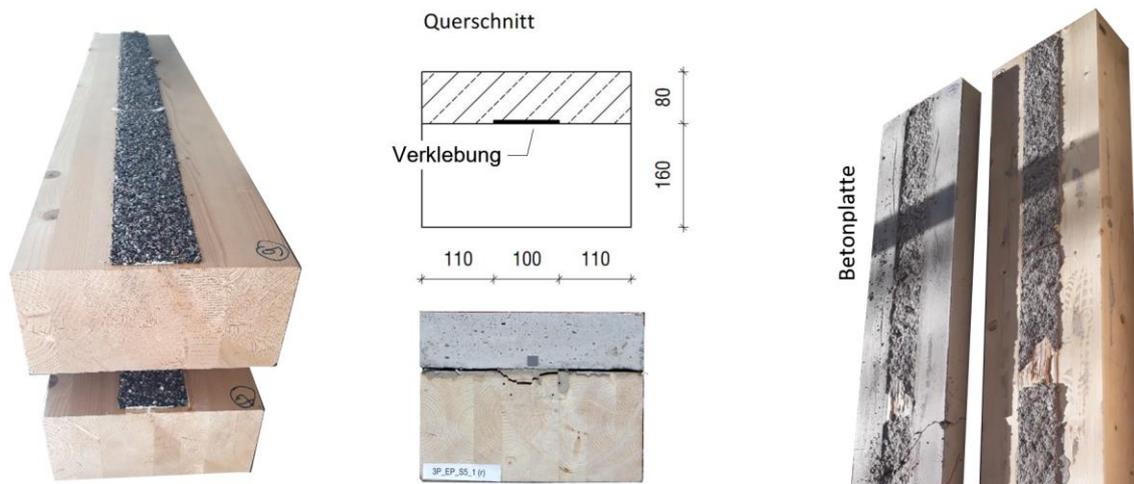


Abbildung 8: Kurze Biegeträger mit schmaler Fuge: Links: Vor dem Betonieren. Rechts: Nach den Versuchen mit Beton- und Holzversagen. Das Bild zeigt vorwiegend Betonversagen

Um den positiven Einfluss des Querdrucks auf die Holz- und Betonfestigkeit und damit die zu hohe Fugentragfähigkeiten auszuschließen, wurden weitere 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 8). 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. $5,3 \text{ N/mm}^2$. 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 vorfabrizierten Hohlkastelementen 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 9). 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.



Abbildung 9: Kurze, gedrungene Lignotrend-HBV-Träger nach den Drei-Punkt Biegeversuchen zum Test der Schubtragfähigkeit: Immer Schubversagen im Holz der Stege

5. Erstes Pilotprojekt mit Granulatsplitt verklebten HBV-Decken

5.1. Planung des Pilotprojekts

In der Schweizer Gemeinde Sissach, im Umland von Basel gelegen, wurde ein zwei-stöckiger Neubau eines kommunalen Doppelkindergartens in Holzbauweise geplant und realisiert (Abbildung 11). 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 $l/1000$ im Anfangszustand und $l/550$ 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.

Die volle Leistungsfähigkeit des Systems kann ausgeschöpft werden, wenn auch die Standsicherheit mit dem starr verbunden HBV-Querschnitt berechnet wird. Dann genügt eine Gesamthöhe von 32,2 cm (inkl. Akustikpanel) bei einer Betonschichtstärke von 8 cm. Dieser Querschnitt wurde so im Versuchsstand der TU Berlin erfolgreich getestet. Unter Ansatz des geklebten Verbunds ist damit eine Verringerung der Bauteilhöhe von mind. 6 cm gegenüber der Ausführungsvariante möglich.



Abbildung 10: Fertigung: Lignotrend-Element vor und nach dem Auftrag der Splittverklebung © Lignotrend

5.2. Ausführung

Alle Hohlkastenelemente wurden inkl. der vollflächigen Splittbestreuung werkseitig vorgefertigt und zur Baustelle geliefert (Abbildung 10 und 11). Die Bewehrung sowie die Betonplatte wurde mit Transportbeton bauseits hergestellt. Zur Produktionskontrolle und Qualitätssicherung wurden kurze Biegebalken erstellt, die den gleichen Fertigungsweg, inkl. der Betonage auf der Baustelle, durchliefen und später werksintern geprüft wurden. Für die Montage konnten die ursprünglichen Vorgaben der Tragwerksplaner von Pirmin Jung zur Zwischenstützung, zur 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 aus Eigengewicht und nahm die Lasten aus dem Frischbeton bis zum Aushärten des Betons auf.

Nach dem Verlegen der Holzelemente wurden die Stöße mit Koppelbretter verbunden und die werkseitig vorbereiteten Folien (s. Abbildung 10) wasserdicht 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 Baustellensauger eine ebene, feste, besplittete Fläche vor, die den sonstigen mineralischen Umgebungen im Betonbau ähnelt. 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 Kerben 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.



Abbildung 11: oben: Doppelkindergarten Sissach, l.: Ansicht r.: Holzlage der HBV-Decke © Beer Holzbau AG
unten: Bewehrte Granulatsplitt-Rohdecke vor und während der Betonage © Lignotrend

6. 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.

7. Literatur

- [1] Abrahamsen, R.: Mjøstårnet – Construction of an 81 m tall timber building. 23. Internationales Holzbau-Forum IHF 2017, Garmisch. Forum Holzbau (2017)
- [2] DIN EN 1991-1-4 Allgemeine Einwirkungen - Windlasten. (2010). Beuth Verlag
- [3] Smith, R.; Wilford, M.: Damping in tall buildings - uncertainties and solutions. IABSE Conference Chicago, IABSE 2008
- [4] Schmid, V.; Nettekoven, T.; Sutter, M.: Hochhäuser in Holzbauweise – Konstruktions-prinzipien, dynamisches Verhalten, Verbundbau. 24. Internationales Holzbau-Forum IHF 2018, Garmisch. Forum Holzbau (2018)
- [5] Pincus, G.: Behaviour of Wood-Concrete Composite Beams. Journal of the Structural Division, Proceedings American Society of Civil Engineers, (1970), S. 2009–2019
- [6] Negrao, J. H., Oliveira, F. M., Oliveira, C. L.: Investigation on Timber-Concrete Glued Composites. 9th World Conference on Timber Engineering, Portland, (2006)
- [7] 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
- [8] Zauft, D.: Untersuchungen an geklebten Verbundkonstruktionen aus Holz und Leichtbeton. Dissertation. Heftreihe des Instituts für Bauingenieurwesen TU-Berlin, Shaker Verlag (2014)
- [9] Zauft, D.; Schmid, V.; Polak, M. A.; Bonded Timber-concrete composite floors with lightweight concrete; World Conference on Timber Engineering; TU Wien, (2016)
- [10] Schäfers, M.; Seim, W.: Geklebte Verbundbauteile aus Holz und hoch- bzw. ultrahochfesten Betonen. Bautechnik 88 (2011), Heft 3, S. 165 – 176
- [11] Mérono, M; Seim, W. et al.: Innovative Heißklebung von tragenden Holz-Beton-Verbundelementen. Adhäsion Kleben & Dichten (2019), Volume 63, S. 30–34
- [12] Hackspiel, C.: Verklebung als Verbund für Holz-Beton-Deckensysteme. 1. Holzbau Kongress Berlin (DHK) 2020, Forum Holzbau (2020), S. 31 - 39