

Holz-Beton-Verbunddecken – Forschung und Entwicklung an der ETH

Prof. Dr. Andrea Frangi
ETH Zürich
Institut für Baustatik und Konstruktion
Zürich, Schweiz



Holz-Beton-Verbunddecken – Forschung und Entwicklung an der ETH

1. Einleitung

Die Suche nach einer effizienten und wirtschaftlichen Sanierungs- und Verstärkungsmethode von bestehenden alten und oft historischen wertvollen Holzbalkendecken hat in den letzten 40 Jahren zur erfolgreichen Entwicklung der Holz-Beton-Verbundbauweise geführt. Holz-Beton-Verbunddecken weisen im Vergleich zu den reinen Holzdecken nicht nur eine wesentlich erhöhte Tragfähigkeit und Steifigkeit, sondern auch verbesserte Eigenschaften in Bezug auf Schallschutz und Brandschutz auf. Somit stellen Holz-Beton-Verbunddecken eine attraktive Lösung für leistungsfähige Systeme dar und finden starke Anwendung in modernen mehrgeschossigen Holzbauten.

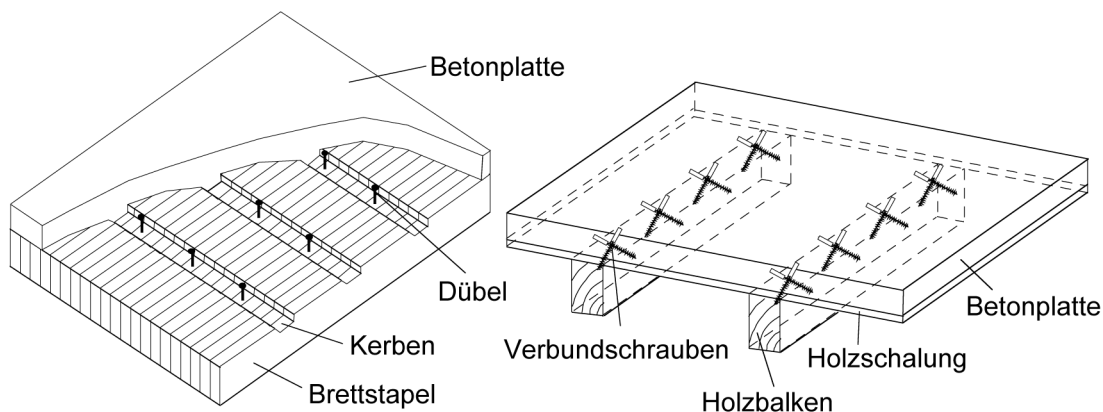


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau von Holz-Beton-Verbunddecken mit flächigen Massivholzplatten wie z.B. Brettstapel (links) bzw. mit linearen Holzbalken (rechts)

Holz-Beton-Verbunddecken bestehen aus Holzelementen (lineare Holzbalken oder flächige Massivholzplatten wie z.B. Brettstapel), welche durch mechanische Verbindungsmittel mit einer darüberliegenden Betonplatte verbunden sind und stellen einen Sonderfall der nachgiebig verbundenen Biegeträger im Holzbau dar. Der Verbindung zwischen Beton und Holz kommt somit im Hinblick auf die Tragwirkung von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen eine entscheidende Bedeutung zu, so dass verschiedene Verbundsysteme entwickelt und ihr Trag- und Verformungsverhalten experimentell und numerisch untersucht wurden. An der ETH Zürich wurden in den letzten 25 Jahren mit verschiedenen Wirtschaftspartnern mehrere Forschungsprojekte durchgeführt, die nachfolgend kurz vorgestellt werden.

2. Bemessungsgrundlagen für den Brandfall

Das erste Forschungsprojekt beschäftigte sich mit der Bemessung von Holz-Beton-Verbunddecken für den Brandfall [1-2]. Das Tragverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken im Brandfall kann im Wesentlichen auf das thermische Verhalten der Holzteile und der Verbundfuge zurückgeführt werden. Von der Vielzahl der Verbindungen zwischen Beton und Holz wurden zwei Verbundsysteme auf Brandeinwirkung untersucht: die Schubübertragung erfolgt durch ins Holz gefräste Kerven (vgl. Abbildung 1 links) oder durch ins Holz geschraubte Verbundschrauben (vgl. Abbildung 1 rechts). Zur Verbesserung der Kenntnisse über die Temperatureinwirkung auf den Verbund zwischen Beton und Holz wurden mehrere Auszieh- bzw. Scherversuche unter ISO-Normbrandeinwirkung durchgeführt. Es zeigte sich, dass das Tragverhalten der Verbundfuge mit Verbundschrauben primär von der Holztemperatur im Bereich der Verbindung abhängt. Mit zunehmender Holztemperatur nahm die Steifigkeit und Festigkeit der Verbundfuge stark ab. Das globale Tragverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken wurde mit belasteten Deckenversuchen untersucht. Alle

Brandversuche wurden an der Empa in Dübendorf durchgeführt. Die Auszieh- bzw. Scherversuche wurden auf dem 1.2m langen und 1.0m breiten Ofen, die Deckenversuche auf dem 4.85m langen und 3.0m breiten Ofen durchgeführt. Als Referenzversuche wurden auch mehrere Versuche bei Normaltemperatur durchgeführt.

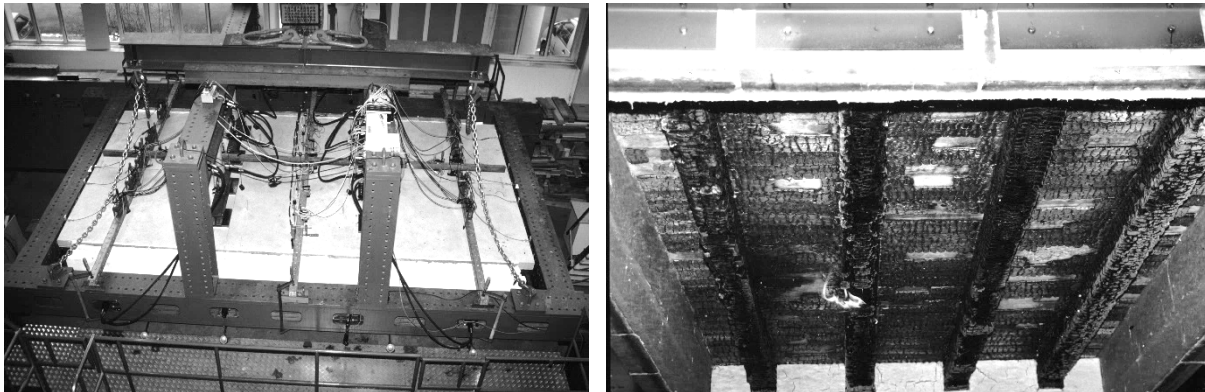


Abbildung 2: Brandversuch mit einer belasteten Holz-Beton-Verbunddecke mit ins Holz gefrästen Kernen: Übersicht der Versuchseinrichtung (links) bzw. Untersicht der Decke beim Versagen nach 63 Minuten ISO-Normbrandeinwirkung (rechts)

Unter Berücksichtigung der Resultate der durchgeführten umfangreichen experimentellen und numerischen Untersuchungen wurde eine vereinfachte Berechnungsmethode zur Bemessung von Holz-Beton-Verbunddecken im Brandfall entwickelt, die sich an der vereinfachten Bemessungsmethode mit ideellem Restquerschnitt für Holzbauteile im Brandfall gemäss Norm SIA 265 bzw. EN 1995-1-2 orientiert. Die Berechnung der massgebenden Schnittgrössen im Brandfall darf analog zur Berechnung bei Normaltemperatur am ideellen Restquerschnitt durchgeführt werden. Die temperaturbedingte Steifigkeitsabnahme für die Verbundfuge mit Verbundschrauben wird vereinfacht durch Abminderung des Verschiebungsmoduls berücksichtigt. Die Tabelle 1 gibt den Abminderungsfaktor $k_{mod,fi}$ in Abhängigkeit der seitlichen Holzüberdeckung der Verbundschrauben sowie der Brandzeit an.

Tabelle 1: Modifikationsfaktor $k_{mod,fi}$ zur Berücksichtigung der temperaturbedingten Abnahme des Verschiebungsmoduls pro Schraubenpaar für die Verbundfuge mit Verbundschrauben in Abhängigkeit der seitlichen Holzüberdeckung x in mm und der Brandzeit t in Minuten

Modifikationsfaktor $k_{mod,fi}$	gültig für	
$k_{mod,fi} = 0$	$x \leq 0.6 \cdot t$	
$k_{mod,fi} = \frac{0.2 \cdot x - 0.12 \cdot t}{0.2 \cdot t + 3}$	$0.6 \cdot t \leq x \leq 0.8 \cdot t + 3$	
$k_{mod,fi} = \frac{0.8 \cdot x - 0.6 \cdot t + 1.8}{0.2 \cdot t + 21}$	$0.8 \cdot t + 3 \leq x \leq t + 24$	
$k_{mod,fi} = 1.0$	$x \geq t + 24$	

Die temperaturbedingte Festigkeitsabnahme der Verbundfuge mit Verbundschrauben darf mit dem Abminderungsfaktor $k_{mod,fi}$ gemäss Tabelle 2 in Abhängigkeit der seitlichen Holzüberdeckung der Verbundschrauben sowie der Brandzeit berücksichtigt werden. Der Einfluss des Wärmestroms von unten auf die Steifigkeit und die Festigkeit der Verbundfuge darf vernachlässigt werden, wenn die untere Holzüberdeckung x_u mindestens 20 mm grösser als die massgebende seitliche Holzüberdeckung ist. Die im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelten Grundlagen für die experimentell abgesicherte Bemessung von Holz-Beton-Verbunddecken für den Brandfall werden in der Schweiz seit vielen Jahren mit der Lignum Dokumentation Brandschutz angewendet und werden für die laufende Revision von EN 1995-1-2 berücksichtigt.

Tabelle 2: Modifikationsfaktor $k_{\text{mod,fi}}$ zur Berücksichtigung der temperaturbedingten Abnahme des Tragwiderstandes pro Schraubenpaar für die Verbundfuge mit Verbundschrauben in Abhängigkeit der seitlichen Holzüberdeckung x in mm und der Brandzeit t in Minuten

Modifikationsfaktor $k_{\text{mod,fi}}$	gültig für	
$k_{\text{mod,fi}} = 0$	$x \leq 0.6 \cdot t$	
$k_{\text{mod,fi}} = \frac{0.44 \cdot x - 0.264 \cdot t}{0.2 \cdot t + 5}$	$0.6 \cdot t \leq x \leq 0.8 \cdot t + 5$	
$k_{\text{mod,fi}} = \frac{0.56 \cdot x - 0.36 \cdot t + 7.32}{0.2 \cdot t + 23}$	$0.8 \cdot t + 5 \leq x \leq t + 28$	
$k_{\text{mod,fi}} = 1.0$	$x \geq t + 28$	

3. Holz-Beton-Verbunddecken mit Baubuche

Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes «Ressource Holz» (NFP 66) wurde ein umfassendes Forschungsprojekt zum Thema Tragwerke aus Buchenholz durchgeführt. Im Vordergrund des Projektes stand Buchenfurnierschichtholz (Baubuche). Furnierschichtholz weist einen höheren Homogenisierungseffekt (weniger Strukturstörungen) im Vergleich zu Vollholz und Brettschichtholz auf und besitzt somit eine höhere Zuverlässigkeit der mechanischen Materialeigenschaften. Mit der Einführung von Querlagen lässt sich zudem auch die Formstabilität deutlich verbessern. Im Rahmen der Doktorarbeit von Lorenzo Boccadoro wurde eine innovative Holz-Beton-Verbunddecke mit Baubuche entwickelt [3-4], die im ETH House of Natural Resources (www.honr.ethz.ch) erstmals umgesetzt wurde. Die Verbunddecke besteht aus 40-60mm dicken Buchenfurnierschichtholzplatten und einer 100-140mm dicken Betonschicht. Die Buchenfurnierschichtholzplatten dienen zunächst als Schalung, dann als Tragelement im Verbund mit dem Beton und schliesslich bilden sie eine behagliche Deckenuntersicht. Zudem erhöht sich die Wirtschaftlichkeit der neuen Verbunddecke gegenüber herkömmlichen Holz-Beton-Verbunddecken mit Brettstapel bzw. Stahlbetonflachdecken dank der hohen mechanischen Materialeigenschaften der Buchenplatten und der damit möglichen Reduktion der Dicke des Holzquerschnittes.

Das Tragverhalten der Verbunddecke wurde mit umfassenden numerischen und experimentellen Untersuchungen (Push-out Versuche und Biegeversuche) analysiert. Die Push-out Versuche zeigten hohe Traglasten und Steifigkeiten. Die Verbundwirkung kann als starr klassifiziert werden. Zudem bei den Prüfkörpern mit Stahlfaserbeton und bei denen, wo die Kerbe eine reduzierte Breite aufwies, wurde ein duktiles Verhalten auf Traglastniveau im Bruchzustand beobachtet, das auf das Druckversagen des Vorholzes parallel zur Faserrichtung zurückzuführen ist (vgl. Abbildung 3).

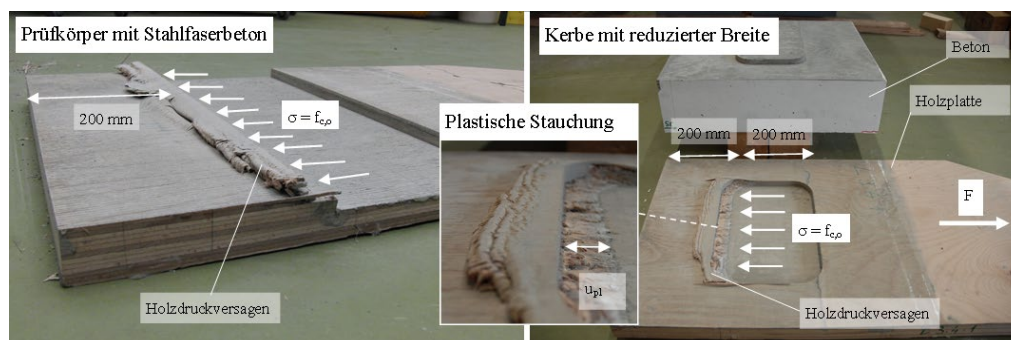


Abbildung 3: Prüfkörper mit duktilem Druckversagen des Vorholzes der Buchenplatte parallel zur Faserrichtung

Die durchgeführten Biegeversuche zeigten das grosse Potential und das günstige Tragverhalten der entwickelten Holz-Beton-Verbunddecke aus Buchenholz (vgl. Abbildung 4). Mit dem entwickelten Bemessungsmodell kann die Holz-Beton-Verbunddecke so bemessen, dass ein Zugversagen der Buchenplatte auftritt, nachdem die Bruchlast der Kerven erreicht

wird und sich die Kerven duktil verformt haben. Die Decke zeigt somit auf Gebrauchsniveau ein linear-elastisches und anschliessend ein nichtlineares duktileres Last-Verformungsverhalten bis zum Bruch der Holzplatte.

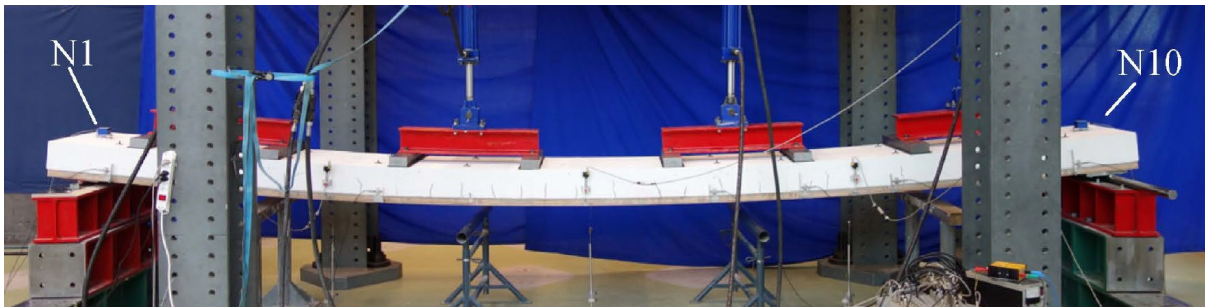


Abbildung 4: Biegeversuch mit einem Holz-Beton-Verbunddeckenelement aus Buchenholz

Die Ausführung der entwickelten Verbunddecke im ETH House of Natural Resources zeigte jedoch, dass das System im Bauzustand nicht genügend steif und somit eng gespriesst werden soll. Zudem ist die Flexibilität des Systems im Vergleich zu Stahlbetonflachdecken noch eingeschränkt, da die Kräfte (wie bei allen Holz-Beton-Verbunddecken) nur in einer Richtung abgetragen werden können. Somit erfordern diese Decken linienartige Auflager (Wände oder Unterzüge). Insbesondere in Fassadenbereichen sind solche aber aus architektonischen Gründen heutzutage meist unerwünscht.

Im Rahmen eines Innosuisse (ehemals Kommission für Technologie und Innovation KTI) Projektes mit Implenia Schweiz AG und WaltGalmarini AG wurde die Holz-Beton-Verbunddecke mit Buchenplatten weiterentwickelt [5-6]. Um die Steifigkeit der Holzplatten im Bauzustand erhöhen zu können, wird die Plattenstärke von 40 auf 60mm erhöht. Des Weiteren sollen zusätzliche Obergurte aus Buchenholz mittels Stahlrohren mit der unteren Buchenplatte verbunden werden und vorgefertigte Schalungselemente bilden. Dabei werden die Rohre mit einem Vergussmörtel auf Epoxidharzbasis mit der unteren Buchenplatte verbunden, um eine hohe Steifigkeit zu erzielen. Zwischen Holz und Beton können beliebige Füllmaterialien (z.B. Mineralwolle, Kies, usw.) verbaut werden, um unterschiedliche Deckenanforderungen zu erfüllen wie z.B. Schallschutz. Mit einer geeigneten Querverbindung der Buchenplatten wird zudem eine zweiachsige Tragwirkung ermöglicht. Das System ist aber auch anwendbar für Baustellen, wo eine Vorfabrikation der Deckenelemente bevorzugt wird. In diesem Fall verzichtet man auf die Obergurte aus Buchenholz und die Stahlrohre werden voll im Betonquerschnitt eingebunden. Auf der Baustelle werden dann lediglich die Querverbindungen angeschlossen und der Betonquerschnitt in diesen Bereichen vervollständigt. Die Abbildung 5 zeigt die Leitidee der Holz-Beton-Verbunddecke mit Buchenplatten und Stahlrohren für die Verbindung zwischen Beton und Holz.

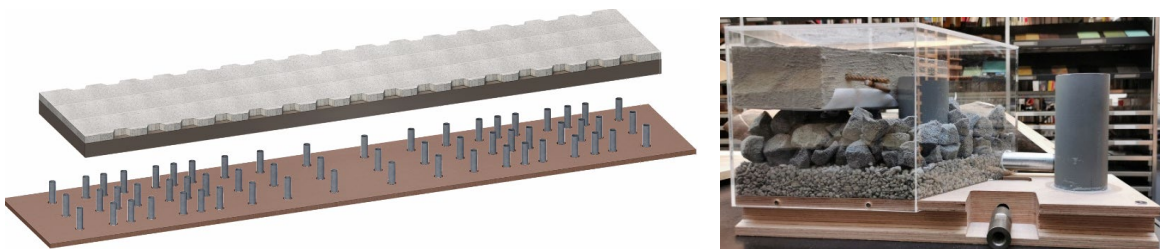


Abbildung 5: Holz-Beton-Verbunddecke mit Buchenplatten und Stahlrohren für die Verbindung zwischen Beton und Holz

Das lokale Tragverhalten der Stahlrohrverbindung wurde anhand eines umfangreichen Serie von Push-out Versuchen untersucht (vgl. Abbildung 6 links). Die Ergebnisse zeigten, dass eine ausreichende Steifigkeit nur erreicht werden kann, wenn ein Vergussystem in der Verbindung der Stahlrohre mit der Holzschicht verwendet wird. In den Push-out Versuchen wurde ein duktiler Versagensmodus beobachtet, der auf inelastische Druckverformungen im Holz und eine Umverteilung der inneren Spannungen im Beton zurückzuführen ist. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde das Tragverhalten der neuartigen Holz-Beton-Verbunddecke mit einachsigen 4-Punkt Biegeversuchen untersucht. Dabei zeigte sich, dass das globale Tragverhalten primär durch das Verbindungsverhalten bestimmt wird. Ein duktiler Versagensmodus in den Verbindungen führte zu einem bemerkenswert duktilen Tragverhalten der Holz-Beton-Verbunddecke. In einem umfangreichen Grossversuch wurde anschliessend das biaxiale Tragverhalten der Holz-Beton-Verbunddecke untersucht (vgl. Abbildung 6 rechts). Um statische und dynamische Tests am selben Prüfkörper unter verschiedenen Auflagerbedingungen durchführen zu können, wurde ein spezieller modularer Versuchsaufbau entwickelt. Eine wesentliche Erhöhung der Steifigkeit und der Eigenfrequenz bei zweiachsiger gegenüber einachsiger Tragwirkung wurde beobachtet. Zwei Berechnungsmodelle wurden entwickelt, deren Resultate gut mit den Beobachtungen aus den Experimenten übereinstimmen.

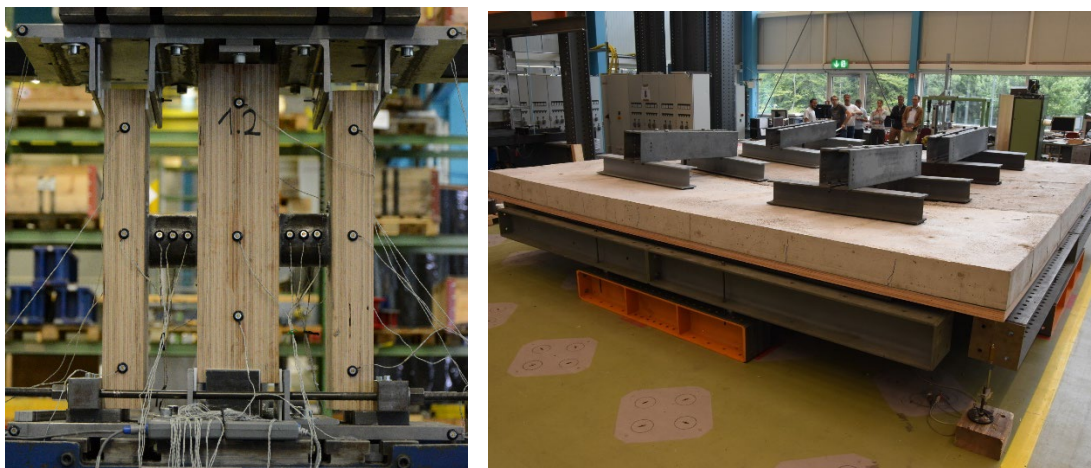


Abbildung 6: Holz-Beton-Verbunddecke mit Buchenplatten und Stahlrohren: Push-out Versuch (links) und Grossversuch an einem belasteten zweiachsigen tragenden Deckenelement (rechts)

Die umfassenden durchgeführten experimentellen und numerischen Untersuchungen zeigen das grosse Potential der zweiachsig tragenden Holz-Beton-Verbunddecke mit Buchenplatten und Stahlrohren auf. Die entwickelten Berechnungsmodelle erlauben eine zuverlässige Prognose des Tragverhaltens und eine einfache, praxistaugliche Bemessung der Holz-Beton-Verbunddecke. Implania und WaltGalmarini planen, das neue Deckensystem in den Holzhochhäusern Pi in Zug und Rocket in Winterthur einzusetzen.

4. Holz-Beton-Verbunddecken mit Mikrokerfen

Im Rahmen eines Innosuisse (ehemals KTI)-Projektes wurde mit Sidler Holz AG und Timber Structures 3.0 an einem flächigen Holz-Beton-Verbundsystem mit Brettstapelelementen geforscht. Für den Verbund zwischen Beton und Brettstapel werden bisher konventionell Kerfen in Kombination mit Schrauben eingesetzt. Die entwickelte neue Lösung ist eine Mikroverzahnung, die formschlüssig Beton und Holz über eine grosse Fläche verbindet. Der flächige Verbund sorgt für eine kontinuierliche Übertragung der Schubkräfte. Somit treten keine lokal konzentrierten Kräfte mehr in der Verbundfuge auf, die zur Anwendung der Schrauben führen. Die neuartige Verbindung wurde in einer ersten Phase mit Push-Out Versuchen untersucht. Getestet wurden als Hauptparameter die Geometrie der Kerfen, die Vorbehandlung der Holzoberfläche vor dem Betonieren, die Holzart (Fichte, Esche und Buche) sowie das Verdichten des Betons. Da das Kervensystem auch für biaxial tragende Decken verwendet werden kann, wurden die Kerfen auch mit Belastung senkrecht zur

Faserrichtung untersucht. Mit den Push-Out Versuchen konnte anhand der besten Kombination aus Tragfähigkeit, Steifigkeit und Duktilität die optimale Kervengeometrie bestimmt werden (vgl. Abbildung 7).

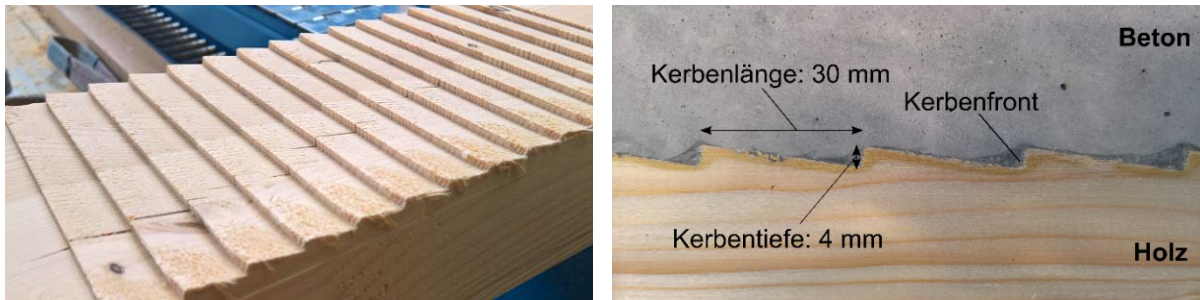


Abbildung 7: Mikrokerneln, gefräst (links) und im fertigen Verbund (rechts)

Die bestimmte optimale Kervengeometrie wurde in einer zweiten Phase mit 4-Punkt-Biegeversuchen getestet (vgl. Abbildung 8). Die Länge der Versuchskörper von 4m wurde so gewählt, dass die die Mikrokerneln bis zum Versagen getestet werden konnten (kein Versagen der Brettstapelelemente auf Biegezug). Die Versuchskörper wiesen ein sehr steifes, linear-elastisches Tragverhalten bis zum Versagen der Verbundfuge. Die beobachteten Versagensarten in den Mikrokerneln waren sowohl in den lokalen Scherversuchen als auch in den globalen Biegeversuchen eine Kombination aus mehrheitlich abgescherten Betonkerneln und stellenweise abgescherten Holzkerneln. Der Versuchskörper mit den zusätzlich eingebauten Schrauben zeigte ein sehr ähnliches Tragverhalten wie diejenigen mit nur Mikrokerneln. Die Schrauben können erwartungsgemäss weder die Steifigkeit noch die Tragfähigkeit des Systems erhöhen. Als weiteren Anwendungsbereich für Holz-Beton-Verbunddecken wurden auch Zweifeldträger getestet. Die Versuche zeigten, dass die Mikrokerneln auch in gerissenem Beton funktionieren. Um das langfristige Tragverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken mit Mikrokerneln zu untersuchen, laufen seit fast vier Jahren Versuche mit sieben Prüfkörpern mit unterschiedlichen Konfigurationen (Lastniveau, Befeuchtung, Spannweite) bei Sidler Holz in Oberlunkhofen.



Abbildung 8: Vier-Punkt Biegeversuch mit Holz-Beton-Verbunddeckenelementen mit Mikrokerneln

Die Forschungsarbeit konnte zeigen, dass Mikrokerven als Verbundmittel für Holz-Beton-Verbunddecken ein sehr steifes, annähernd starres Verbundverhalten und ausreichende Tragfähigkeit bezüglich Schubübertragung in der Verbundfuge für die Anwendung in Wohn- und Bürogebäuden für Spannweiten bis 10m aufweisen. Die Wirkungsweise von Mikrokerven ist vergleichbar mit jener von verklebten Verbindungen. Das neue Verbindungssystem mit Mikrokerven für Holz-Beton-Verbunddecken wurde auf dem Schweizer Markt unter dem Namen Sidler SHARK® eingeführt. In der Zwischenzeit wurden mehrere Bauten mit dieser Technologie realisiert. Katharina Müller, die das Forschungsprojekt führte und darüber doktorierte, wirkt mit ihrer Firma Lignolution als Ansprechpartnerin für die Umsetzung der neuen Technologie in der Praxis.

5. Verklebte Holz-Beton-Verbunddecken

Im Rahmen eines Innosuisse-Projektes (Projekt-Nr. 37233.1 IP-ENG) wurde mit Empa, Sika Technology AG und Fagus Suisse SA an verklebten Holz-Beton- und Holz-Polymerbeton-Verbunddecken mit Buchen-Stabschichtholz geforscht. Mit umfassenden experimentellen Untersuchungen an kleinen Probekörpern konnte eine geeignete Klebstofflösung für eine nass-in-nass Anwendung entwickelt werden. Des Weiteren wurden im Forschungsprojekt zwei neu entwickelte Polymerbeton-Alternativen zusätzlich zum Standard Beton untersucht. Die neu entwickelten Systeme geklebter Holz-Beton-Verbund (HBV) und Holz-Polymerbeton-Verbund (HPBV) wurden danach auf Bauteilskala experimentell als 5 m-spannende Prüfkörper unter Vierpunkt-Biegung untersucht (vgl. Abbildung 9).

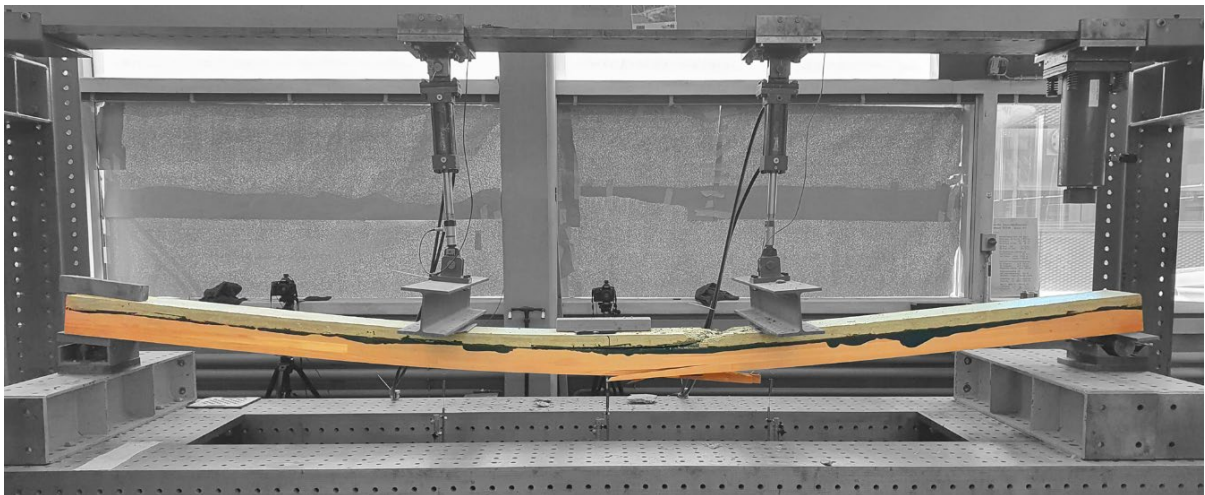


Abbildung 9: Vier-Punkt Biegeversuch mit verklebten Holz-Beton-Verbunddeckenelementen

Die Untersuchungen zum Tragverhalten der drei neuartigen verklebten HBV und HPBV Systeme mit Stabschichtholz aus Buchenholz konnten zeigen, dass das γ -Verfahren nach Anhang B des Eurocode 5 (EN 1995-1-1) mit $\gamma=1$ ein geeignetes Bemessungsmodell für die kurzzeitigen Last-Verformungsbeziehungen darstellt (Zeitpunkt $t=0$). Numerische Methoden werden ebenfalls empfohlen. Bemessungswerte für den Grenzzustand der Tragfähigkeit können aus den jeweiligen Produktdatenblätter der Teilkomponenten entnommen werden. Für die Klebefugen sollte verifiziert werden, dass die Bemessungsschubspannungen ca. 1 N/mm^2 nicht überschreiten.

Mit den neu entwickelten Systemen können schlanke Querschnitte für Holz-Beton-Verbunddecken im Hochbau entworfen werden. Weitere Anforderungen wie z.B. Schallschutz sollten jedoch berücksichtigt werden und können zu grösseren Querschnitten führen.

Um das langfristige Tragverhalten von verklebten Holz-Beton-Verbunddecken zu untersuchen, laufen Versuche mit Prüfkörpern mit unterschiedlichen Konfigurationen. Die entwickelten verklebten Systeme sind versatil in der Anwendung und eignen sich z.B. auch für andere Formen von verklebten Holz-Beton-Verbunddecken wie vorgefertigte Deckenelemente, Rippendeckenelemente und mit der Verwendung von Buchen-Stabsperrholz für Decken mit biaxialer Tragwirkung.

6. Zusammenfassung

An der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit Wirtschaftspartnern konnten in den letzten 30 Jahren mehrere Forschungsprojekte zum Thema Holz-Beton-Verbunddecken durchgeführt werden. Die Forschungsprojekte führten zur Entwicklung und Umsetzung von neuen Lösungen für leistungsfähige Holz-Beton Verbund-Deckensysteme für moderne mehrgeschossige Bauten.

7. Literatur

- [1] Frangi A., Brandverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken, Dissertation, ETH Zürich, 2001.
- [2] Frangi A., Knobloch M., Fontana M., Fire design of timber-concrete composite slabs with screwed connection, *Journal of Structural Engineering (ASCE)* 2010; 136: 219–228. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000101.
- [3] Boccadoro L., Timber-concrete composite slabs made of beech laminated veneer lumber with notched connection, Dissertation, ETH Zürich, 2016.
- [4] Boccadoro L., Zweidler S., Steiger R., Frangi A., Calculation model to assess the structural behavior of LVL-concrete composite members with ductile notched connection, *Engineering Structures* 2017; 153: 106–117. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.10.024.
- [5] Kreis B., Two-Way Spanning Timber-Concrete Composite Flat Slabs Made of Beech Laminated Veneer Lumber with Steel Tube Connection, Dissertation, ETH Zürich, 2020.
- [6] Kreis B., Kübler W., Frangi A., Development and investigation of an innovative, lightweight, two-way spanning timber-concrete composite slab, *Engineering Structures* 2023; 286: 116087. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.11608.
- [7] Müller K., Timber-Concrete Composite Slabs with Micro-Notches, Dissertation, ETH Zürich, 2020.
- [8] Müller K., Frangi A., Micro-notches as a novel connection system for timber-concrete composite slabs, *Engineering Structures*, 2021; 245: 112688. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112688.
- [9] Grönquist P., Tragverhalten von verklebten Holz-Beton- und Holz-Polymerbeton-Verbunddecken mit Buchen-Stabschichtholz, Tagungsband Von der Forschung zur Praxis - Sicher mit Holz, Swiss Wood Innovation Network, 2022.