

Mikrokerben für Holz-Beton-Verbunddecken

Holz und Beton im Verbund (kurz: HBV) eignen sich hervorragend als Deckensystem. Werden die zwei Baustoffe richtig miteinander kombiniert, bringen sie jeweils ihre besten Eigenschaften zum Tragen. Text Katharina Müller | Fotos ETH Zürich

Das Holz-Beton-Verbundsystem wurde ursprünglich als Verstärkung für bestehende Holzdecken angewandt. Die Tragfähigkeit und Steifigkeit von Holzdecken konnte einfach erhöht werden, indem auf die bestehende Holzdecke eine Schicht Beton aufgegossen wurde. Besonders bei Decken mit denkmalgeschützter oder erhaltungswürdiger Unterseite eignete sich diese Verstärkungsmethode hervorragend. Seit einigen Jahrzehnten hat sich das Holz-Beton-Verbundsystem auch im Neubau etabliert und wird erfolgreich in verschiedensten Ausführungen angewendet. Von grosser Bedeutung für das Tragverhalten sind jedoch nicht nur die beiden Baustoffe Holz und Beton, sondern auch das Verbindungsmittel als dritte Komponente, mit welchem erst die optimale Tragwirkung des Systems erzielt werden kann.

Mit Unterstützung aus der Industrie im Rahmen eines Innosuisse-Projekts wird an der ETH Zürich an einem flächigen Holz-Beton-Verbundsystem mit Brettstapелеlementen geforscht. Zusammen mit dem Brettstapelerhersteller Sidler Holz AG, der das Holz-Beton-Verbundsystem seit Jahren verwendet, und der Timber Structures 3.0 AG (TS3), ein

Schwesterunternehmen der Timbatec Holzbauingenieure Schweiz AG, wird nun an der Optimierung des Systems gearbeitet. Mit Erfolg: Die Mikrokerbentechnologie und eine andere Optimierungsmethode zur Überhöhung der Holzelemente werden patentiert.

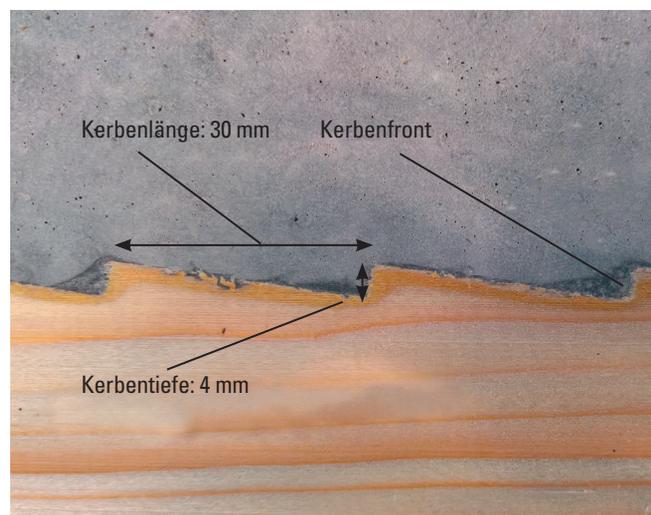
HBV mit konventionellen Kerben

Das HBV-System besteht üblicherweise aus drei Komponenten: der unteren Schicht aus Holz, die auf Zug und Biegung belastet wird, der oberen Schicht aus druckbelastetem Beton und dem Verbindungsmittel, das über die Schubkräfte in der Decke das System zusammenhält. Die Eigenschaften des Verbindungsmittels sind zentral für die Steifigkeit, Tragfähigkeit und Duktilität der HBV-Decke. Eine Vielzahl an verschiedenen Verbindungsmitteln ist sowohl Teil der Forschung wie auch in Anwendung in der Praxis. Für den Verbund von Brettstapel-Beton-Decken werden bisher konventionell Kerben in Kombination mit Schrauben eingesetzt. Dieses Verbindungssystem zeigt gute Eigenschaften, hat aber durchaus noch Verbesserungspotenzial. Die üblicherweise mehrere Zentimeter tiefen und bis zu 40 Zentimeter langen Kerben werden

bei Sidler Holz mit einer CNC-Maschine ausgefräst. Pro Kerbe muss das Fräswerkzeug mindestens viermal über den Brettstapel fahren, um beide Flanken und die Kerbenlänge zu formen. Dabei geht nicht nur Zeit, sondern auch viel Material verloren. Die Kerben sind jedoch nur ein kleiner Anteil der Kosten. Die zusätzlichen Schrauben, vertikal oder um 45 Grad geneigt als Paar angeordnet, sind sowohl teuer an Material- als auch an Arbeitskosten. Sie machen insgesamt mehr als die Hälfte der Kosten für die Verbindung aus.

HBV mit Mikrokerben

Genau an dieser Problematik greift das aktuelle Forschungsprojekt an. Bereits 2015 wurde in einer Masterarbeit – auch damals schon in Zusammenarbeit mit Sidler Holz und Timbatec – eine Idee entwickelt, wie nicht nur der Materialverschleiss der Kerben verhindert, sondern auch auf die Schrauben verzichtet werden kann. Die Lösung kommt in Form einer 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



Mikrokerben, gefräst (links) und im fertigen Verbund (rechts).

in der Verbundfuge auf, die nur durch Schrauben übertragen werden könnten. Bereits in der Masterarbeit zeigte sich, dass diese Verzahnung schon mit Tiefen im Millimeterbereich wirksam wird – das war die Geburt der Mikrokerben.

Verklebung ohne Klebstoff

Durch die Mikrokerben ist ein Holz-Beton-Verbundsystem entstanden, das tatsächlich nur aus Holz und Normalbeton besteht, befreit von jeglichen zusätzlichen Bauteilen: keine Schrauben, keine Trennfolie und trotzdem ein vollflächiger, steifer Verbund. Eine Verklebung ohne Klebstoff, sozusagen. Die Idee der Mikrokerben fand Anklang und das Konzept wurde seither in experimentellen Versuchen an der ETH Zürich mehrfach auf Herz und Nieren geprüft.

Die neuartige Verbindung wurde zuerst lokal analysiert und getestet. In sogenannten Push-out-Versuchen wurden verschiedenste Parameter der Mikrokerben variiert, um die optimale Konfiguration für die weiteren Untersuchungen festlegen zu können. Die Prüfkörper in Push-out-Versuchen bestehen aus zwei Holzteilen auf der Seite und einem leicht nach oben versetzten Betonteil in der Mitte. In den zwei Verbundfugen sind die Mikrokerben vorstehend angeordnet. Es werden keine zusätzlichen Schrauben eingesetzt und der normalfeste Beton ist unbewehrt. Getestet wurden als Hauptparameter die Geometrie der Kerben, die Vorbehandlung der Holzoberfläche vor dem Betonieren, die Holzart (Fichte, Esche und Buche) sowie das Verdichten des Betons. Da das Kerbensystem auch für biaxial tragende Decken verwendet werden soll, wurden die Kerben auch mit Belastung senkrecht zur Faserrichtung untersucht.

Optimale Kerbengeometrie

Aus diesen lokalen Versuchen konnte anhand der besten Kombination aus Tragfähigkeit, Steifigkeit und Duktilität die optimale Kerbengeometrie gewählt werden. Zudem wurden zu allen getesteten Parameter Erkenntnisse gewonnen. So zeigten zum Beispiel Esche und Buche eine wesentlich tiefere Haftreibung mit dem Beton als das weiche Fichtenholz. Auch konnte kein Einfluss des Bewässerns der Holzoberfläche vor dem Betonieren festgestellt werden; auch ohne Wässern ist der Beton in der Verbundfuge gut ausgehärtet und die Mikrokerben funktionierten einwandfrei. Allgemein haben die Mikrokerben ein sehr gutes lokales Tragverhalten. Sie können die im Bau üblicherweise und auch bei grossen Spannweite (bis 10 m) vorkommenden Schub-



Push-out-Versuch: Prüfeinrichtung und eingebauter Prüfkörper mit Messtechnik.

kräfte aufnehmen und ermöglichen eine fast starre Verbindung zwischen Holz und Beton.

Grossversuche an Biegeträgern

Die in den Push-out-Versuchen bestimmte optimale Kerbengeometrie wurde dann auf grössere Träger mit vier Metern Länge angewendet und in Vier-Punkt-Biegeversuchen getestet. Diese Versuchsanordnung eignet sich besonders für neuartige Verbindungsmittel, da die Schubkräfte jeweils zwischen Kräfteinleitung und Auflager konstant sind. Dadurch konnten die Prüfkörper so dimensioniert werden, dass im Versuch die Mikrokerben getestet wurden und der Träger nicht in der Mitte auf Biegezug versagte.

Wieder wurden verschiedene Parameter an den Prüfkörpern getestet: die Hinterschneidung der Kerbenfront, das Befeuchten der Holzoberfläche vor dem Betonieren sowie der Einfluss von zusätzlichen Schrauben. Gemessen wurden die globalen Durchbiegungen des Trägers, die aufgebrachten Zylinderlasten sowie die Relativverschiebungen zwischen Holz und Beton an sieben massgebenden Stellen. Die Materialeigenschaften des Holzes (Dichte, Holzfeuchte, E-Modul) sowie des Betons (Dichte, Festigkeiten, E-Modul) wurden separat vor den Versuchen oder am Tag der Prüfung bestimmt.

Wie nach Plan versagten fast alle Prüfkörper in der Verbundfuge durch Überschreiten der Schubfestigkeit der Mikrokerben, wodurch deren Tragverhalten bezüglich Ver-



Push-out-Versuch: Scherversagen von Beton und Holz gleichzeitig.

bundeigenschaften analysiert werden konnte. In der Verbundfuge passiert das Gleiche wie in den lokalen Push-out-Versuchen: Die kombinierte Belastung von Schub und Zug quer zur Faser an der Kerbenfront überschreitet die Festigkeit des Holzes und führt zum Versagen der Mikrokerben. Sobald die Verbundfuge auf einer Seite versagt, bildet sich ein kleiner Spalt, da die Betonplatte über die Holzplatte geschoben wird. Ein Abheben der Betonplatte von der Holzplatte ist aber theoretisch nicht möglich: Die Biegesteifigkeit der Betonplatte ist geringer als die der Holzplatte, daher liegt die Betonplatte immer auf der unteren Holzplatte auf, selbst wenn der Verbund durch die Kerben vollständig gelöst ist. Um diese Bedingung einzuhalten, darf das Verhältnis von Betonhöhe zu Holzhöhe einen gewissen Wert nicht überschreiten.

Beeindruckende Ergebnisse

Die Steifigkeit des Systems bis zum Versagen der Mikrokerben ist beeindruckend: Das System ist quasi starr, das heisst, zwischen Holz und Beton besteht ein fast voller Verbund – eine vollflächige Verklebung würde die zwei Baustoffe nur minimal steifer verbinden. Auch die Tragfähigkeit, die Maximallast, die die Mikrokerben aufnehmen können, ist höher als die Prognose, die mit den Werten aus den Versuchen zum lokalen Tragverhalten berechnet wurde. Hier würde zwar eine Verklebung höhere Werte erzielen, diese werden aber gar nicht benötigt. Die Mikrokerben können den

Schubkräften, die in einer üblichen HBV-Decke von bis zu zehn Metern Spannweite durch Eigengewicht, schweren Bodenaufbau und grosse Nutzlasten verursacht werden, problemlos standhalten. Zudem: In einer für die Praxis dimensionierten HBV-Platte wird nicht das Versagen der Kerben massgebend. Schon bei tieferen Traglasten versagt nämlich zuerst die Holzplatte in Feldmitte unten auf Biegezug.

Auch der Prüfkörper mit den zusätzlich eingebauten Schrauben (Verbundschrauben, um 45° geneigt und kreuzweise angeordnet) zeigt ein sehr ähnliches Verhalten wie diejenigen mit reinem Mikrokerbenverbund. Die Schrauben können erwartungsgemäss weder Steifigkeit noch Tragfähigkeit des Systems erhöhen. Auch in puncto Duktilität nützen sie wenig: Vernachlässigbar wenig plastische Verformung konnte zusätzlich gemacht werden, bevor das Biegezugversagen im Holz folgte.

Die Resultate aus den Versuchen zum lokalen und globalen Tragverhalten der Mikrokerben als Verbindungsmittel für HBV-Decken sind erfreulich. Die Mikrokerben zeigen ein sehr gutes Verbundverhalten bezüglich Steifigkeit und Tragfähigkeit. Die optimale Geometrie konnte schon festgelegt werden, ebenso wie einige Produktionsregeln, wie zum Beispiel das Betonrezept sowie das

Verdichten des Betons. Auch konnte nachgewiesen werden, dass das Befeuchten der Holzoberfläche vor dem Betonieren bei den kurzfristigen Biegeversuchen weder positive noch negative Auswirkungen auf die Verbundwirkung hat. Die Resultate zeigten keinen Unterschied. Viele weitere Parameter konnten untersucht und deren Einfluss auf das System beurteilt werden.

Langzeitversuche

Die Steifigkeit des Verbunds war in allen bisherigen Versuchen sehr hoch – doch diese Versuche wurden bei Erreichen der Betonfestigkeit gemacht, also etwa einen Monat nach dem Betonieren. Deshalb soll die Leistung der Mikrokerben unter dem Einfluss des unterschiedlichen Verhaltens von Holz und Beton über längere Zeit untersucht werden. Dazu werden bei Sidler Holz in Oberlunkhofen (AG) Langzeitversuche eingerichtet: Das Tragverhalten von sieben Prüfkörpern mit unterschiedlichen Konfigurationen (Lastniveau, Befeuchtung, Spannweite) wird aufgezeichnet und beobachtet.

Einen Schritt in die Zukunft wagt das Forschungsprojekt jetzt schon: Das Holz-Beton-Verbund-System soll sich nicht nur auf einfache Balken und die einachsige Tragrichtung beschränken. Viel effizienter bezüglich der meist massgebend werdenden Durch-



Katharina Müller, Doktorandin an der ETH Zürich (Professur für Holzbau, Prof. Dr. Andrea Frangi, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich).

biegungen sind Mehrfeldträger. An der ETH Zürich wird deshalb das Mikrokerbensystem demnächst an einem Zweifeldträger untersucht. Auch die Möglichkeiten zur zweiachsigen Tragwirkung des Systems bei grossflächigen, stirnseitig verklebten Holzplatten werden bereits ausgelotet. So sind in allen bisherigen Versuchen schon Teilbereiche dieser Tragweise getestet worden.

Die Technologie der Mikrokerben ist in der Schweiz, der EU, den USA und in Kanada zum Patent angemeldet und findet hoffentlich schon bald nicht nur in der Versuchshalle an der ETH, sondern auch in der Praxis ihren Platz. ibk.ethz.ch



Vier-Punkt-Biegeversuch: Prüfeinrichtung mit eingebautem, bereits getestetem Prüfkörper und bereits getesteter Messtechnik. Die rechte Seite hat versagt.