

# Tragverhalten von eingeklebten Schubverbindern in Buchen-Stabschichtholz für Holz-Beton-Verbunddecken

Stephan Schilling<sup>1,2</sup>, Jonah Schöneberg<sup>1,3</sup>, Philippe Grönquist<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup> Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich

<sup>2</sup> WaltGalmarini AG, Zürich

<sup>3</sup> Schöne neue Welt Ingenieure, Berlin

<sup>4</sup> Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart

<sup>5</sup> Materialprüfungsanstalt, Universität Stuttgart

## 1 EINLEITUNG

Holz-Beton-Verbund (HBV) Systeme mit eingeklebten Schubverbindern (siehe Abb. 1) werden seit 2001 erfolgreich in der Praxis eingesetzt, und seit 2004 liegt für die Firma *TiComTec GmbH* eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (Nummer Z-9.1-557 [1]) vor. Gültigkeit hat die Zulassung für den Einsatz mit Vollholz aus Nadelholz (mind. C24), Brettschichtholz und Furnierschichtholz. Die Schubverbinder können in verschiedenen Anordnungen eingesetzt werden, wobei sich die vorliegende Arbeit auf den Einsatz in HBV-Rippendecken beschränkt.

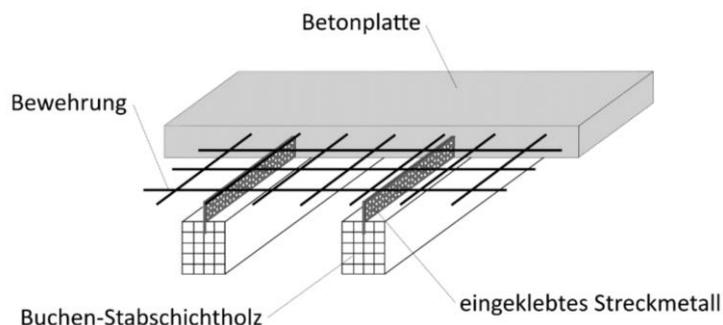


Abb. 1: Beispielhafte HBV-Rippendecke mit eingeklebten Schubverbindern aus Streckmetall (modifiziert von [www.ticomtec.de](http://www.ticomtec.de)).

Im Rahmen des Forschungsprojektes «Langzeit-Kriechverhalten von Buchen-Stabschichtholz und Holz-Beton Verbund Decken mit Buchen-Stabschichtholz» an der ETH Zürich laufen Langzeit Versuche, in welchen die HBV-Schubverbinder mit Buchen-Stabschichtholz (BSSH) eingesetzt werden. Damit ist das Einsatzgebiet ausserhalb der Zulassung. Um vertiefte Erkenntnisse aus den laufenden Langzeit-Versuchen zu gewinnen, werden zuverlässige Kennwerte für das kurzzeitige Last-Verformungsverhalten gebraucht. Mittels Push-Out-Versuchen an 30 Prüfkörpern unterschiedlicher Geometrie und Blechlängen soll das Last-Verformungsverhalten aufgezeichnet und daraus Steifigkeits- und Festigkeitswerte ermittelt werden. Dies in der vorläufigen Annahme, dass womöglich mit einem Einfluss der Holzart (BSSH) gegenüber den Gleichungen der Zulassung (Nadelholz) gerechnet werden muss. Zusätzlich werden Streckmetalle bis zu 1 m Länge, sowie zweilagige Streckmetalle je Balken, wie sie beim HBV-Rippendeckenelement des Forschungsprojektes eingesetzt wurden, untersucht. Das Versuchsprogramm berücksichtigt folglich die gängige Prüfkörpergeometrie aus der vorhandenen Literatur [2] aber auch grössere Prüfkörper mit längeren Blechkonfigurationen. In diesem Bericht werden die wichtigsten Erkenntnisse aus diesen Push-Out-Versuchen vorgestellt, und Vergleiche zu ähnlichen Versuchen mit Nadelholz und schliesslich der Zulassung gezogen.

## 2 PRÜFKÖRPER UND PRÜFVERFAHREN

In Anlehnung an die Literatur-Versuche [2] wurden die Push-Out-Versuche mit geeigneten Prüfkörpern und einer Scherfuge durchgeführt. Dabei entstehen im Prüfkörper Druckkräfte parallel und senkrecht zur Prüfkörper-Achse. Der dominierende Längsdruck führt zu einem Abscheren der Verbindungsmittel in der Scherfuge zwischen Holz und Beton. Der senkrecht wirkende Anteil drückt den Beton und das

Holz zusammen, wodurch Reibungskräfte entstehen. Die Literatur-Versuche wurden mehrheitlich an kurzen Plattenbalken durchgeführt. In diesen 600 mm langen und 400 mm breiten Prüfkörpern wurden bis zu 400 mm lange Bleche getestet, teilweise in bis zu drei-reihiger Anordnung. Typischerweise wurde dabei gegen eine Folie betoniert, welche vorgängig an der Schalung befestigt wurden. In der vorliegenden Versuchsreihe wurde als Referenzserie (Abb. 2, Serie 1 A+B) die Geometrie dieser Literatur-Versuche übernommen. Bei fünf Prüfkörpern daraus wurde ohne Folie betoniert (Serie 1A), bei weiteren fünf Prüfkörpern mit Folie (Serie 1B). Es wurde jeweils ein Blech mit 400 mm Länge eingesetzt.

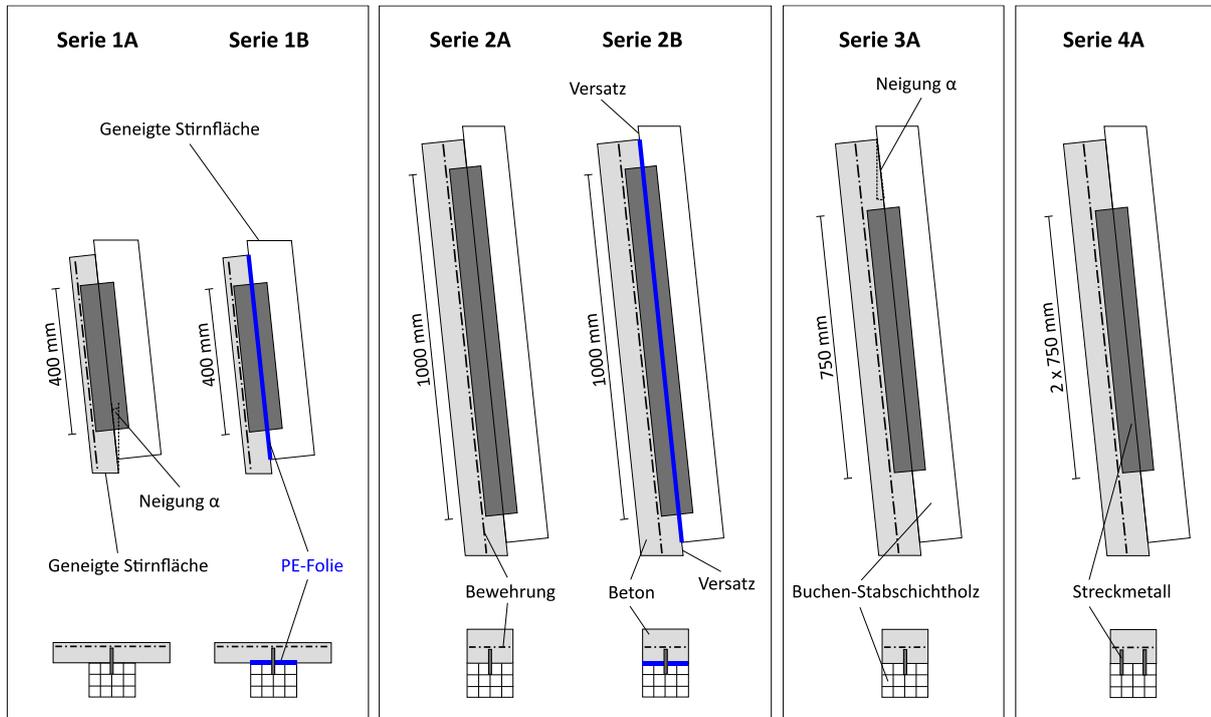


Abb. 2: Versuchsserien und Blechkonfigurationen. Typ A jeweils ohne Folie, Typ B mit PE-Folie betoniert. Serie 1B als Direktvergleich zur Literatur [2], und Serien 2-4 entsprechend Situation HBV-Rippendecke im Forschungsprojekt.

Das Deckenelement der Langzeit-Versuche enthält drei Konfigurationen an HBV-Schubverbindern auf Rippen mit einer Breite von 160 mm: i) ein Blech mit 1'000 mm Länge; ii) ein Blech mit 750 mm Länge; und iii) zwei Bleche mit je 750 mm Länge. Daraus wurden drei Versuchsserien à fünf, resp. zehn Prüfkörpern abgeleitet. Serie 2 wurde wiederum mit und ohne Folie betoniert, Serie 3 und Serie 4 ohne Folien. Die Fälle ohne Folien entsprechen der Ausführung des Prüfkörpers der Langzeit-Versuche.

Das BSSH wurde beim Hersteller *Fagus Suisse SA* in Qualität und Festigkeitsklasse SSH40 [3] bestellt (Biegezugfestigkeit  $f_{m,k} = 40 \text{ N/mm}^2$ , Mittlerer Biege-Elastizitätsmodul  $E_{m,mean} = 14'500 \text{ N/mm}^2$ , und Rohdichte  $\rho_k = 660 \text{ kg/m}^3$ ). Nach den Push-out-Versuchen wurde mittels kapazitivem Holzfeuchtemessgerät in 10 mm und 20 mm Tiefe die Holzfeuchte bestimmt. Bei den B-Serien lag der Mittelwert über die vier Seiten bei 9.5% und 8.8%. Dasselbe gilt bei den A-Serien für die drei dem Beton abgewandten Seiten. Auf der dem Beton zugewandten Seite ergaben sich 20.2% und 18.7%. Die mittels Zylinderdruck-Versuchen am ausgehärteten Beton (24d / 33d, vor / nach den Push-out-Versuchen) gemessenen Betoneigenschaften werden in Tab. 1 angegeben.

Tab. 1: Gemessene Materialeigenschaften Beton (SCC C30/37, XC4, XF1, CI 0.10, 16).

| Eigenschaft                                   | Einheit           | Wert            | Bestimmung                                 |
|---|-------------------|-----------------|--|
| Grösstkorn der Gesteinskörnung $d_{max}$      | mm                | 16.0            | Chargenprotokoll                           |
| w/z-Gehalt                                    | -                 | 0.46            | Chargenprotokoll                           |
| Mittlere Zylinderdruckfestigkeit $f_{cm,cyl}$ | N/mm <sup>2</sup> | 47.5 / 51.7     | Nach 24d / 33d gem. SIA 262/1 [4]          |
| Mittlerer Elastizitätsmodul $E_{cm}$          | N/mm <sup>2</sup> | 24'574 / 24'290 | Nach 24d / 33d gem. SIA 262/1 Anhang G [4] |
| Rohdichte $\rho_k$                            | kg/m <sup>3</sup> | 2'286 / 2'218   | Nach 24d / 33d gem. SIA 262/1 [4]          |

Die HBV-Schubverbinder der *TiComTec GmbH* weisen eine Höhe  $h = 90$  mm auf und wurden gemäss Zulassung mittels HBV-Klebstoff ins BSSH eingeklebt (Abb. 3).

Die Push-out-Versuche wurden in einer Universalprüfmaschine des Typs Schenck Hydropuls mit 1.6 MN Kapazität durchgeführt. Die abgeschrägte Betonfläche (Abb. 4) stand dabei auf dem fixierten Prüftisch und mittels hydraulischen Vortriebes wurde eine obere Platte nach unten auf die abgeschrägte Holzfläche gedrückt. Die Kraft im Zeitverlauf wurde von der integrierten Kraftmessdose aufgezeichnet. Für die Bestimmung der Verschiebungen wurde mit einem optischen System des Unternehmens *Northern Digital Inc. Europe GmbH* (NDI) gemessen. Auf beiden Seiten der Scherfuge wurden je sieben Mess-Marker verwendet. Aufgezeichnet wurden dabei die Koordinaten je Marker im Zeitverlauf. Die Anordnung erlaubt die Auswertung der Relativverschiebung zwischen den sieben Marker-Paaren. Die äusseren zwei Paare befinden sich jeweils ausserhalb der Schubverbinder, die inneren fünf Paare sind regelmässig über die Blechlänge verteilt. Nach SN EN 26891:1991 [5] wurden die Prüfkörper kraftgesteuert in 120 s auf 40% der geschätzten Höchst-Last belastet. Nach einer Pause von 30 s erfolgte mit derselben Geschwindigkeit eine Reduktion auf 10% der geschätzten Höchstlast. Wiederum nach 30 s Pause wurde die Kraft auf 70% der geschätzten Höchstlast erhöht. Danach wurde von Kraft- auf Wegsteuerung umgeschaltet und mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1 mm/min weitere 5 mm gefahren. Zum Schluss wurde die Geschwindigkeit auf 3 mm/min erhöht und bis zu einem deutlichen Lastabfall weitergefahren.

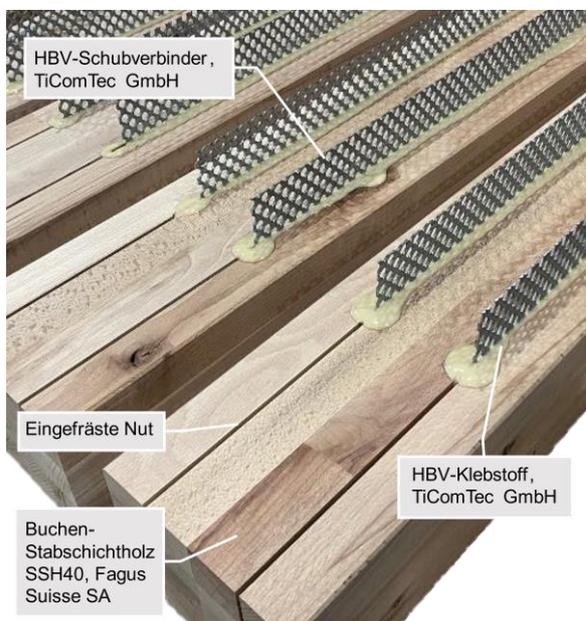


Abb. 3 Prüfkörper der Serie 4A vor Betonage. Steckmetallgeometrie: Höhe = 90 mm (davon ca. 40 mm in Holz, 50 mm in Beton).

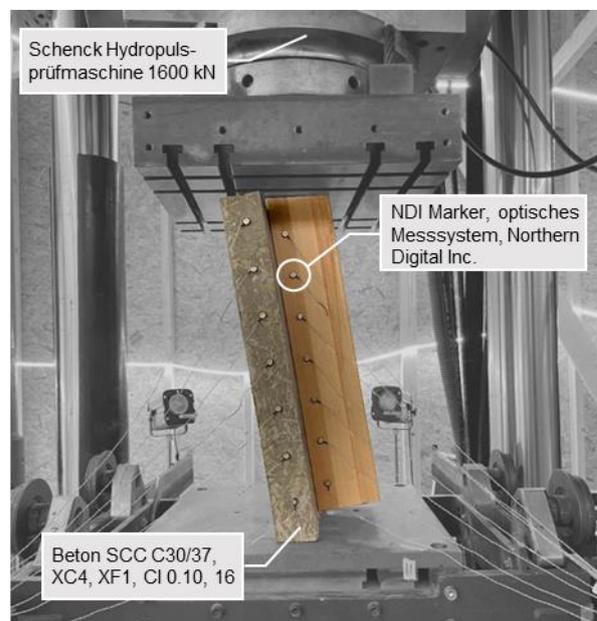


Abb. 4 Eingebauter Prüfkörper der Serie 1 mit optischen Messpunkten (NDI). 7 Messpunkt-Paare in jeweils 80 mm Abstand.

### 3 RESULTATE

In Abb. 5 werden typische Last-Verformungskurven gezeigt. Es kann beobachtet werden, dass die aufsummierte Streckmetall-Länge die Rangfolge der erreichten Höchstlast bestimmt. Serien mit Folien (1B und 2B) erreichen tiefere Höchstlasten als die entsprechenden Serien (1A und 2A) ohne Folien. Die effektive Blechlänge scheint die Länge der Fließplateaus zu beeinflussen. Kurze Bleche erreichen dabei längere Plateaus.

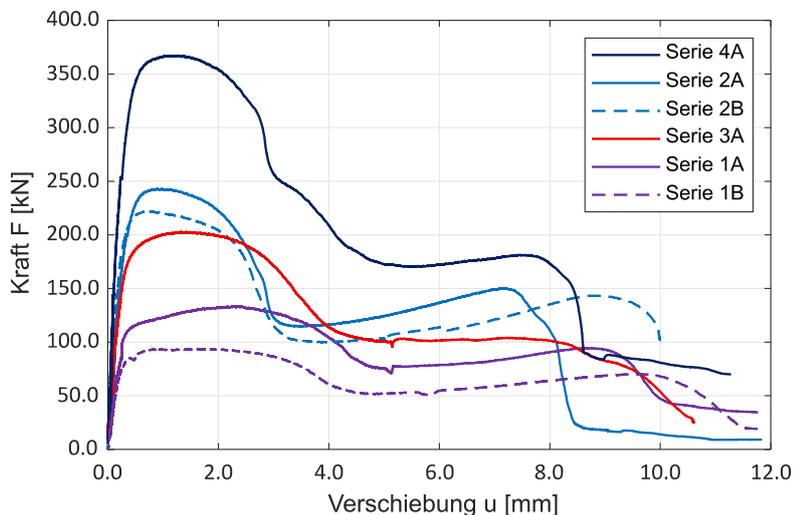


Abb. 5 Typische Ergebnisse des Kraft-Verformungsverhalten für die sechs Versuchsserien.

Abb. 6 zeigt links das Streudiagramm der erreichten Tragfähigkeiten, in der Mitte das Streudiagramm der ermittelten Verschiebungsmoduln und rechts deren Gegenüberstellung. Bzgl. Tragfähigkeit gibt es keine Auffälligkeiten, sprich keine Ausreisser und nur eine kleine Streuung der Resultate. Mit grösserer aufsummierter Streckmetall-Länge werden höhere Tragfähigkeiten erreicht und die B-Serien mit PE-Folien erreichen tiefere Werte als die entsprechenden A-Serien ohne Folien. Im Streudiagramm der Verschiebungsmoduln wurde in Serie 1A ein Ausreisser entfernt, welcher aus einem Messfehler im Rahmen des ersten Versuchs resultierte. Grössere Streckmetall-Längen deuten auch hier auf höhere Verschiebungsmoduln. Der Einfluss der Reibung ist im Direkt-Vergleich der A- und B-Serien hingegen weniger deutlich. Der Mittelwert von Serie 1A (340 kN/mm) liegt tiefer als derjenige von 1B (380 kN/mm), derjenige von Serie 2A (958 kN/mm) ist hingegen grösser als in 2B (876 kN/mm). Auch in der Gegenüberstellung wird implizit die Abhängigkeit zur Streckmetalllänge klar und beide Eigenschaften korrelieren positiv. Die grössere Streuung der Verschiebungsmoduln wird ebenfalls verdeutlicht.

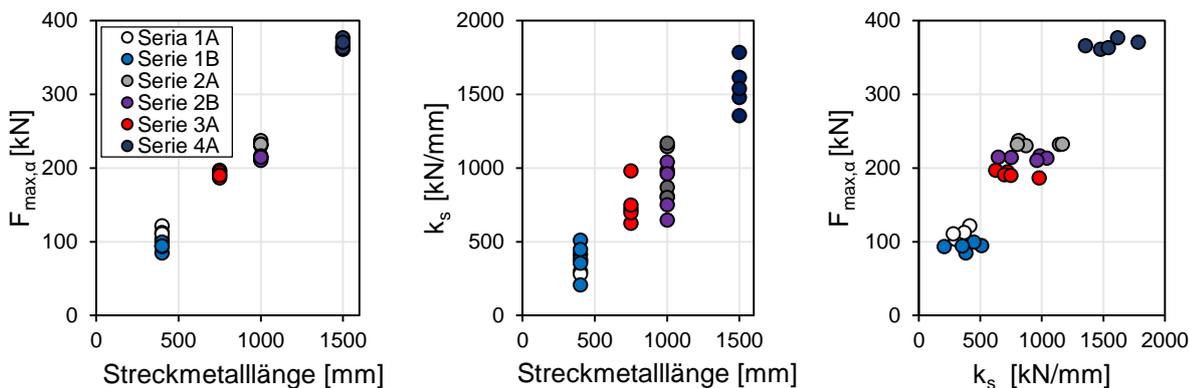


Abb. 6 Streudiagramme der Tragfähigkeit (auf die Neigung projizierten Scherkraft) (links), Verschiebungsmodul (Mitte) und Tragfähigkeit vs. Verschiebungsmodul (rechts) der sechs Serien à je fünf Prüfkörper.

Um die Bewehrungsstäbe während des Betonierens in Lage zu halten, wurden diese mittels Schrauben (ASSY® 4 CSMP Universalschraube) an den SSH-Balken befestigt. Deren Einfluss auf das Tragverhalten wird als klein eingeschätzt, wurde aber rechnerisch berücksichtigt. Der zugehörige charakteristische Widerstand ( $F_{v,Rk} = 1.5 \text{ kN}$ ) und der berechnete Verschiebungsmodul ( $k_{ser} = 5.3 \text{ kN/mm}$ ) auf Abscheren zeigen, dass die Wirkung auf Tragfähigkeit und Verschiebungsmodul der Versuche voll ausgebildet sind. Der charakteristische Wert wurde verdoppelt ( $F_{v,Rm} = 3.0 \text{ kN}$ ) um das Verhalten auf Mittelwertsniveau zu berücksichtigen. Alle Kennwerte (Abb. 6, 7 & 10) werden mit den reduzierten Werten angegeben.

Die Tragfähigkeit und die die Verschiebungsmoduln werden nach Serientyp A (mit Reibung) und B (ohne Reibung) in Abb. 7 gegenüber der Streckmetalllänge aufgetragen. Dies erlaubt die Visualisierung von linearen Regressionsgleichungen. In beiden Fällen ist die Steigung bei den Serien A grösser als bei den Serien B. Die kleine Streuung der Tragfähigkeiten führt zu sehr guten Bestimmtheitsmassen ( $R^2 > 0.98$ ). Bei den Verschiebungsmoduln sind diese tiefer, insbesondere für die Serien B mit ( $R^2 = 79$ ), jedoch ebenfalls in einem guten Bereich.

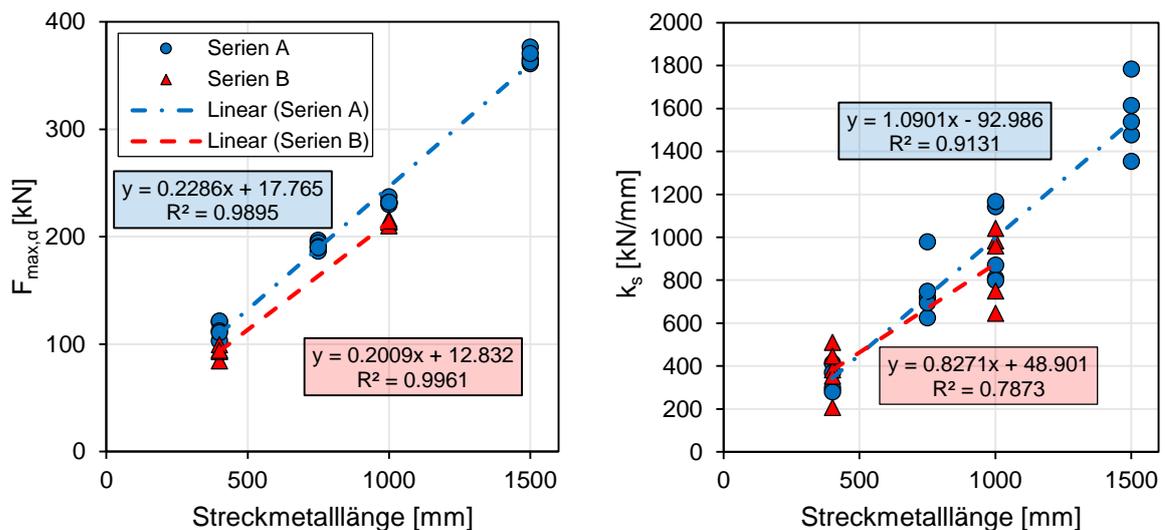


Abb. 7: Tragfähigkeit (links) und Verschiebungsmodul (rechts) gegenüber der Streckmetalllänge der Serien A (in blau, ohne Folie) und der Serien B (in rot, mit Folie).

## 4 DISKUSSION

### 4.1 Versagensmechanismen

Der primäre Versagensmechanismus war über alle 30 Versuche derselbe. Das Streckmetall plastifizierte im Bereich der Fuge zwischen Holz und Beton. Das finale Abscheren (Abb. 8) in der Fuge trat erst bei sehr grossen Verformungen auf, deutlich entfernt vom anfänglichen Fließplateau bei Höchst-Last.



Abb. 8: Abgeschertes Streckmetall im Fugenbereich.

## 4.2 Einfluss der Streckmetalllänge

Wie in Abb. 7 gezeigt ist der Zusammenhang zwischen Tragfähigkeit und Streckmetalllänge eindeutig linear. Dies passt gut mit der Beobachtung zusammen, dass alle Streckmetalle durchgehend ins Fließen kamen. Trotz etwas schlechterer Bestimmtheit kann auch für die Verschiebungsmoduln auf eine lineare Beziehung zur Streckmetalllänge geschlossen werden. Die oben gezeigten Last-Verformungskurven (Abb. 5) zeigen je Serie Unterschiede in der Ausbildung der Fließplateaus. Dabei scheint nicht die aufsummierte, sondern die effektive Länge der Streckmetalle entscheidend. So weist Serie 2 mit 1'000 mm langen Streckmetallen das kleinste Fließvermögen auf mit ca. 1.5 mm, wogegen bei Serie 1 mit 400 mm langen Streckmetallen ca. 3 mm erreicht werden.

## 4.3 Einfluss der Reibung

Wie in den Abb. 7 aufgezeigt, führt die direkte Betonage (Serien A) gegen das Holz eindeutig zu mehr Tragfähigkeit. Bei der Steifigkeit lieferte der Vergleich der Serien 1A und 1B keine klaren Resultate. Die Serien 2A und 2B hingegen zeigen ebenfalls einen positiven Einfluss, wenn direkt gegen das Holz betoniert wird. Bei genauerem Betrachten der Serie 1 wurde festgestellt, dass die Einbau-Schiefe der Prüfkörper deutlich stärker vom Soll abweicht und damit stärker streut als in Serie 2. Die Aufstandsweite sowie die Prüfkörperlänge waren in Serie 1 deutlich kürzer als in Serie 2, was diese Beobachtung plausibilisiert. Diese erhöhte Ungenauigkeit und Streuung faktorisieren sich zusätzlich mit der grösseren planmässigen Schiefe. Da die Neigung einen erheblichen Effekt auf die Kraft quer zur Fuge hat lässt sich folgern, dass die Ergebnisse aus Serie 2 vertrauenswürdiger sind. Wenn auf Mittelwertsniveau im Vergleich zwischen Serie 2A und 2B Coulombsche Reibung angesetzt wird, kann ein Reibungsbeiwert von  $\mu = 0.83$  ermittelt werden. Die quer zur Fuge wirkende Kraft bestimmt sich dabei zu  $1 / \cos(5.6^\circ) \cdot \sin(5.6^\circ) = 10\%$  der längs wirkenden Kraft. Nach Lehmann (2004) [6] wird davon ausgegangen, dass es sich nicht um reine Coulombsche Reibung handelt, sondern sich bei direkter Betonage ein zusätzlicher Haftverbund ergibt. In dem vorliegenden Bericht wird dieser Umstand nicht näher untersucht und die finalen Vergleiche werden anhand der Serien B geführt.

## 4.4 Einfluss der Verschiebungsmessung

Die Verwendung von sieben Messstellen entlang der Scherfuge erlaubt Einblick in den Verlauf der Verschiebungen über die Streckmetalllänge. Für den Zustand bei 40% der geschätzten Höchst-Last und der effektiven Höchst-last (100%) werden in Abb. 9 die pro Serie gemittelten Verformungen gezeigt.

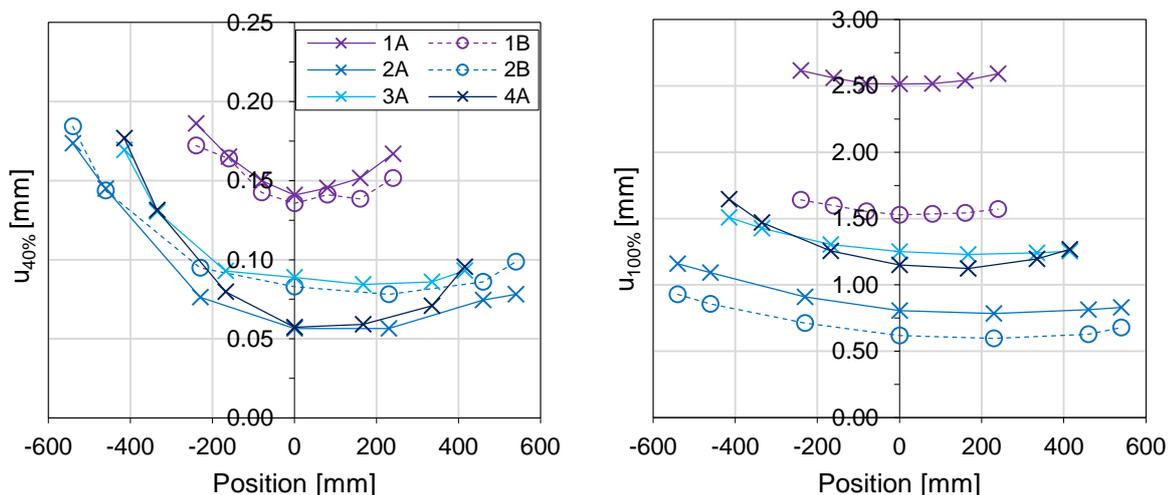


Abb. 9: Verteilung der mittleren Fugenverschiebungen pro Serie über die Streckmetalllänge bei 40% der geschätzten Höchst-Last (links) und bei der effektiv erreichten Höchst-Last (rechts).

In dem elastischen Zustand bei 40% stellen sich in der Mitte die kleinsten, an den Enden die grössten Verformungen ein. Für längere Streckmetalle ist der Unterschied grösser als bei kurzen. Serie 4A mit zwei Blechen zeigt einen ausgeprägteren Effekt als Serie 3A mit einem Blech bei derselben effektiven Streckmetalllänge. Diese nichtlineare Verteilung deckt sich mit bekannten Schubspannungsverläufen in Klebfugen. Somit ist auch die obige Erkenntnis plausibilisiert, dass längere Bleche zu kürzeren Fliessplateaus führen. Das plastische Fliessvermögen an den Enden der Streckmetalle wird bei grösseren Längen verhältnismässig früher aufgebraucht und die Duktilität pro Verbindung nimmt folglich ab. Die Verformungsunterschiede über die Blechlänge gleichen sich schliesslich durch die plastischen Verformungen merklich aus.

Beim nachfolgenden Vergleich zu bestehenden Versuchen und der Zulassung spielt dieses Phänomen ebenfalls eine wichtige Rolle. Nach Bletz-Mühdorfer (2020) [2] wurden an den bisherigen Versuchen nur die Verschiebungen in der Mitte der Prüfkörper ermittelt. Die meisten dieser Versuche decken sich mit der Konfiguration der Serien 1A+B. Dabei wurde festgestellt, dass die Verformung in der Mitte ca. 30% kleiner ist als an den Enden. Wenn man dem parabelförmigen Verlauf der Serie 1 aus Abb. 9 Rechnung trägt, führt dies zu einer mittleren Unterschätzung der Verformungen von rund 20%. Es stellt sich folglich die Frage, ob die resultierenden Verschiebungsmoduln um ca. 20% überschätzt werden. In der vorliegenden Publikation werden die Steifigkeitswerte als Mittelwert dieser sieben Messstellen angegeben.

#### 4.5 Einfluss der Holzart

Wie einleitend erklärt gilt die Zulassung für Nadelholzprodukte und die verfügbaren Resultate aus Bletz-Mühdorfer (2020) [2] beziehen sich ebenfalls auf Nadelholzprodukte. Aus [2] können 35 Versuchsergebnisse zum Vergleich der vorliegenden Resultate zugezogen werden. Es gilt zu beachten, dass die Herstellung der Prüfkörper von [2] ähnlich aber nicht zwingend konform zur heute aktuellen Zulassung war. Diese Versuche wurden ähnlich zu Serie 1B an kurzen Plattenbalken durchgeführt. Es wurde immer gegen eine Folie betoniert, die effektiven Blechlängen sind zwischen 133 und 600 mm, die aufsummierten Blechlängen zwischen 400 und 1'200 mm. Zur Herstellung wurde jeweils Nadelholz bei Normalfeuchte (ca. 12%) verwendet und immer derselbe Zweikomponentenklebstoff eingesetzt. Die Betonfestigkeitsklassen wurden zwischen C12/15 und C35/45 variiert. Die Versagensmechanismen waren bei den kurzen aufsummierten Streckmetalllängen ( $\leq 600$  mm) immer Plastifizierung der Streckmetalle, bei den Prüfungen mit 1200 mm aufsummierter Streckmetalllänge wurde jedoch bei fünf von sechs Fällen entweder Beton- oder Holzversagen festgestellt.

In Abb. 10 kann beobachtet werden, dass die Tragfähigkeit in den vorliegenden Untersuchungen mit Buchen SSH gut mit den Resultaten aus der Literatur mit Nadelholz [2] übereinstimmt. Die Geradengleichungen der linearen Regressionen zeigen leicht bessere Werte für die Serien B, jedoch wurde wie oben erwähnt in den Literaturangaben bei den langen aufsummierten Streckmetalllängen meistens kein Fliessen der Streckmetalle erreicht. Diese kleine Diskrepanz ist damit gut erklärbar und es wird davon abgeleitet, dass beim gewünschten Versagensmechanismus, plastisches Fliessen, wie

erwartet kein Unterschied in der Tragfähigkeit durch unterschiedliche Holzarten resultiert.

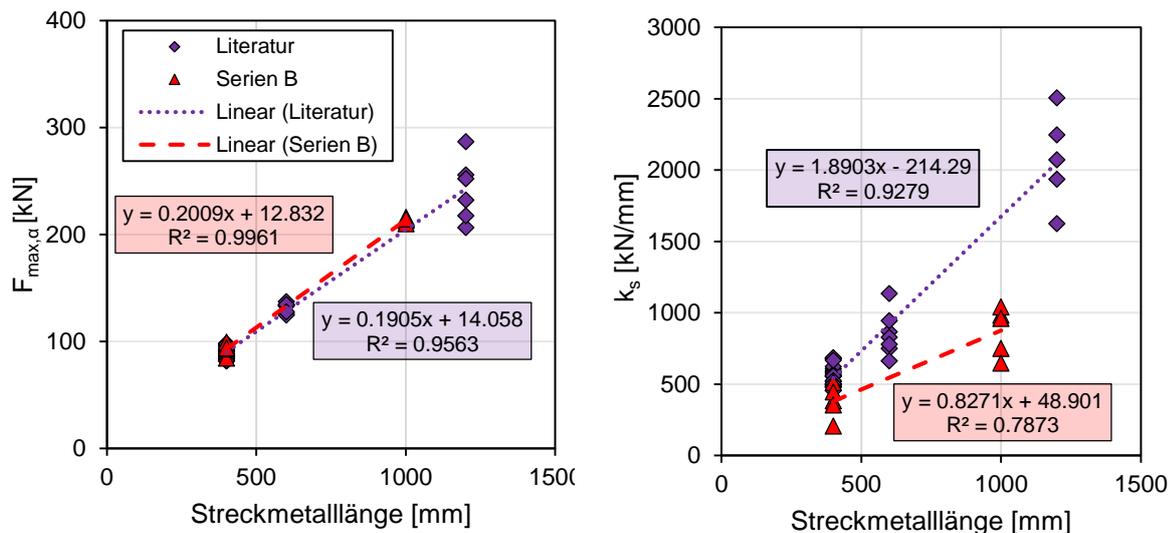


Abb. 10: Vergleich der Tragfähigkeit (links) und der Verschiebungsmoduln (rechts) gegenüber der Streckmetalllänge zwischen den Literaturwerten [2] (in violett) und den Serien 1B und 2B (in rot).

Bezüglich Verschiebungsmoduln zeigt sich hingegen ein anderes Bild. Die Versuchsergebnisse aus der Literatur [2] zeigen leicht bis stark erhöhte Werte gegenüber den Versuchen aus den Serien B mit BSSH. Ein gewisser Teil kann analog zum Vergleich oben aus dem Unterschied zwischen Steifigkeit in Prüfkörpermitte gegenüber gemittelter Steifigkeit erklärt werden. Bei der Serie 2B ist dieser Unterschied in der Größenordnung von 25-30%. Für die kürzeren aufsummierten Streckmetalllängen kann der Unterschied folglich aufgrund der Messtechnik, resp. der Auswertungsmethodik erklärt werden. Die rund doppelt so grosse Steigung der Literaturwerte gegenüber den Serien B kann hingegen nicht vollständig erklärt werden. Da das BSSH steifer als Nadelholzprodukte ist, wäre ein gegenteiliger Effekt plausibler.

#### 4.6 Vergleiche zur Zulassung (Z-9.1-557)

Unter Vernachlässigung der Teilformel für Zwischenschichten gilt nach Zulassung [1] eine normierte Tragfähigkeit von 160 N pro mm Streifenlänge. Wenn für die Serien 1B und 2B nach SN EN 14358:2016-11 [7] die charakteristischen Festigkeiten mittels LogNormalverteilung bestimmt werden, resultiert aus der Geradengleichung durch die beiden Werte eine Tragfähigkeit von 181 N pro mm Streifenlänge. Die Zulassung liefert folglich konservativere Werte als die hierin gefundenen. Eine erhöhte Chargen-übergreifende Streuung könnte damit abgedeckt sein.

Der normierte Verschiebungsmodul nach Zulassung beträgt 825 N/mm pro mm Streckmetalllänge. Anhand der Serien 1B und 2B wurden nach SN EN 14358:2016-11 [7] die charakteristischen Mittelwerte mittels Normalverteilung bestimmt. Daraus resultiert ein Verschiebungsmodul von 797 N/mm pro mm Streckmetalllänge. Dieser Wert liegt leicht unterhalb des Wertes der Zulassung. In Abb. 10 ist zu sehen, dass aus der Regression ein empirischer Wert von 827 N/mm pro mm Streckmetalllänge resultieren würde. Nach Regression passt der gefundene Wert folglich beinahe perfekt zur Zulassung. Die Bestimmung eines charakteristischen Mittelwerts ist nicht zwingend erforderlich, wird hier aber bevorzugt, da der Wert nur auf zehn Versuchen basiert.

Bei allen drei Auswertungen (charakteristische Tragfähigkeit, charakteristischer Verschiebungsmodul, empirischer Verschiebungsmodul) weisen die Geradengleichungen jeweils einen positiven y-Achsenabschnitt auf. Folglich könnten durch vollständige Geradengleichungen in der Zulassung leicht grössere Werte erzielt werden. Mittels durch den Ursprung gezwungener Regressionen könnten ebenfalls höhere Werte errechnet werden. Dies würde aber die grösseren Streckmetalllängen übermässig gewichten und könnte zu leicht unsicheren Werten führen.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

- Eine Bemessung nach Zulassung wird auch für HBV-Rippendecken mit BSSH als sinnvoll erachtet.
- Eine punktuelle Messung in Prüfkörpermitte wird dem nichtlinearen Verschiebungsverlauf über die Länge der Streckmetalle nicht gerecht und führt zu einer Überschätzung der Steifigkeit.
- Die langen Prüfkonfigurationen (Serien 2-4) weisen Vorteile gegenüber den kurzen Plattenbalken (Literatur [2] und Serie 1) auf:
  - o Die Neigung der längeren Prüfkörper ist kleiner, wodurch kleinere Kräfte quer zur Fuge entstehen.
  - o Der nichtlineare Schubfluss führt zu vermindertem plastischem Verformungsvermögen an langen Blechen. Dieser Einfluss kann durch Parallelschalten von mehreren kurzen Streckmetallen nicht beobachtet werden, sondern bedarf der effektiven Längen im Versuch.

## 6 PROJEKTDATEN

Das Projekt «Langzeit-Kriechverhalten von Buchen-Stabschichtholz und Holz-Beton Verbund Decken mit Buchen-Stabschichtholz» wird durch den Aktionsplan Holz APH 2021-2026 des Bundesamtes für Umwelt BAFU unterstützt (V80/00.5196.PZ/0007/BED1B57BA/2-21.28). Projektpartner und Mitantragsteller sind die INGE Zwhatt (B3 Kolb AG), Renggli AG, und die Fagus Suisse SA. ERNE AG Holzbau stellte die Prüfkörper unentgeltlich zu Verfügung. Prof. Dr.-Ing. L. Bathon vermittelte Hintergründe zur Technologie und zur Versuchskonzeption. Allen Beteiligten sei an dieser Stelle für die Unterstützung gedankt.

## 7 REFERENZEN

- [1] Z-9.1-557: *HBV-Schubverbinder aus Streckmetall und vorgefertigte Bauteile mit eingeklebten HBV-Schubverbindern für ein Holz-Beton-Verbundsystem*. TiComTec GmbH. 2020: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt).
- [2] Bletz-Mühdorfer, O. (2020): *Beitrag zur Entwicklung von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen mit eingeklebten Streckmetallen*. Dissertation. TU Darmstadt. Shaker Verlag. 3844072233.
- [3] Fagus Suisse SA (2023): *Fagus Stabschichtholz – Bemessungswerte für Buche*.
- [4] SIA 262/1:2019. *Betonbau – Ergänzende Festlegungen*, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.
- [5] SN EN 26891:1991 *Holzbauwerke; Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln; Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens*.
- [6] Lehmann, S. (2004): *Untersuchungen zur Bewertung von Verbundbauteilen aus Brettstapelelementen im Flächenverbund mit mineralischen Deckschichten*. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar.
- [7] SN EN 14358:2016: *Holzbauwerke - Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte*.