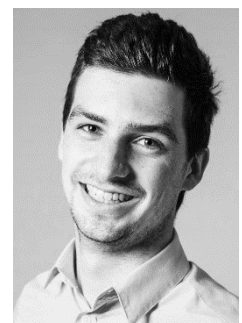


Verschraubte BSH-BSP-Rippenplatten – Versuch und Praxis

Andreas Ringhofer
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz
Graz, Österreich
freiraum ZT gmbh
Zivilingenieurbüro für das Bauwesen
Hartberg, Österreich



David Glasner
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz
Graz, Österreich



Johann Scheibenreiter
Schmid Schrauben Hainfeld GmbH
Hainfeld, Österreich



Verschraubte BSH-BSP-Rippendecken – Versuch und Praxis

1. Motivation und theoretischer Hintergrund

Seit ca. 25 Jahren werden Wohn-, Büro- und Kommunalbauten in einer Größenordnung von 1-2 bis zu 25 Geschossen in Holz-Massivbauweise errichtet, welche aufgrund des nunmehr erreichten, industriellen Maßstabs eine wettbewerbsfähige und ökologische Alternative zu mineralischen Bauweisen mit Ziegel oder Stahlbeton darstellt. Das wesentliche Merkmal dieser Bauweise ist der vorwiegende Einsatz des flächenhaften (zweidimensionalen) Holzbauproduktes Brettsperrholz (BSP) für den raumabschließenden und lastabtragenden Zweck. Wie etwa in [1] angeführt, ist Brettsperrholz i.d.R. mit $n = \{3, 5, 7\}$ kreuzweise geschichteten Brettlagen aufgebaut und weist somit übliche Dicken von $t_{CLT} = 90$ bis 280 mm auf. Aufgrund eines möglichen Spannweiten/Dicken-Verhältnisses von $l / t_{CLT} = 25 \div 30$ sind die gegebenen Dimensionen für die Deckenausbildung üblicher, ein- und zweiachsig gespannter Wohnbaugrundrisse als ausreichend zu erachten, vgl. [2]. Wirtschaftlich sinnvoll kommen dabei für gewöhnlich Platten mit 3- und 5-schichtigem Aufbau und einer Dicke bis zu 200 mm zur Anwendung.

Der Bedarf von Büro- oder Kommunalbauten an Raumtiefen > 6 m mit flexibler Gestaltungsmöglichkeit und somit möglichst wenig vertikal lastabtragenden Bauelementen (Stützen, Wände), führt jedoch zu vergleichsweise unwirtschaftlichen Brettsperrholzdicken – sofern als reines Plattendeckensystem eingesetzt, vgl. [2], [3] und [4]. Diesem Umstand, der im Wesentlichen auf eine gewisse Vulnerabilität des Produktes hinsichtlich Verformungs- und Schwingungskriterien zurückzuführen ist, wurde bereits bei frühen Pilotprojekten mit der Konzeption von hybriden Deckensystemen begegnet. Im Fall des 2001 errichteten Bautechnikzentrums der Technischen Universität Graz kamen etwa vorgefertigte Rippenprofile, bestehend aus Brettsperrholz-Platten und Brettsperrholz (BSH)-Trägern für die Überdachung des 2. Bürogeschosses und mittels Rundstahlstreben unterspannte Brettsperrholz-Platten für die Überdachung der großen Prüfhalle zur Anwendung. Diese beiden und weitere, in der Zwischenzeit entwickelte Lösungen sind in Abbildung 1 gegenübergestellt.

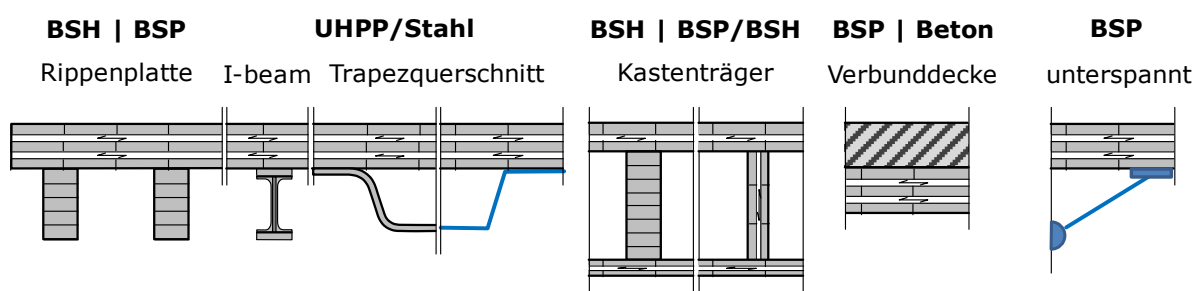


Abbildung 1: verschiedene Möglichkeiten zur Ausbildung von Decken- und Dachsysteme mit großen Spannweiten; von links nach rechts: BSH-BSP-, UHPP- BSP-, Stahl-BSP-Rippen- und -Kastenquerschnitte, BSP-Beton-Verbundsysteme sowie unterspannte BSP-Decken; nach [1], [5]

Auch wenn dieser Vergleich eine Mehrzahl an verfügbaren Lösungsmöglichkeiten der Überspannung größerer Deckenfelder suggeriert, haben nur wenige dieser Varianten das Labor- bzw. spezifische Projektstadium verlassen und eine systematische, massentaugliche und dem Stand der Technik entsprechende Anwendbarkeit erreicht. Unter Eingrenzung auf die Verwendung von Brettsperrholz als Deckenabschluss sind dies in geringerem Ausmaß BSP-Beton-Verbunddecken in Fertigteilbauweise (vgl. [6]) und in größerem Ausmaß BSH-BSP-Rippenplatten, auf welche im weiteren Beitrag näher eingegangen werden soll.

Eine dauerhafte Verbindung der Einzelbauteile von BSH-BSP-Rippenplatten als Fügung im Sinne der Herstellung und als kraftschlüssiger Verbund im Sinne des Einsatzes als lasttragendes Bauteil wird heutzutage entweder mittels Verklebung oder mittels mechanischer Verbindungsmittel realisiert. Mit Ausnahme erster, neuartiger Entwicklungen zur systematischen Produktion solcher Hybridbauteile in den Pressanlagen der BSH- oder BSP-Hersteller, siehe etwa [7], wird im erstgenannten Fall der für die Verklebung von BSP und BSH notwendige Pressdruck gewöhnlich mittels selbstbohrender (Teilgewinde-)Holzbauschrauben (HBS) aufgebracht. Nachdem sie aufgrund der Dimensionen der beiden Fügebauteile sowie aus mechanischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten auch im zweitgenannten Fall des mechanischen Verbundes vorwiegend eingesetzt werden, üben selbstbohrende Holzbauschrauben einen wesentlichen Einfluss auf das Tragverhalten und die Effizienz dieser Hybridbauteile aus.

Bei Gegenüberstellung der beiden Verbundvarianten sind als Vorteile des geschraubten, mechanischen Verbundes eine vergleichsweise einfache Herstellung (orts- und grundsätzlich witterungsunabhängig, relativ einfach in der Anwendung, erfordert keine speziellen Schulungen oder zusätzliche interne und externe Überwachungsmaßnahmen) zu nennen, wohingegen die Vorteile des geklebten Verbundes bei dessen mechanischer Leistungsfähigkeit zu finden sind, wie anhand der Bestimmung der effektiven Biegesteifigkeit $(EI)_{ef}$ mittels γ -Verfahren gem. [8], Anhang B als für Verformungs- und Schwingungsberechnungen wesentliches Merkmal gezeigt werden soll:

$$(EI)_{ef} = \sum (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2), \text{ mit } \gamma_i = \frac{1}{1 + \pi^2 \cdot \frac{E_i \cdot A_i \cdot s_i}{K_{ser,i} \cdot l^2}} \mid i \neq 2, \gamma_2 = 1, \text{ und} \quad (1)$$

E_i , I_i und A_i als Elastizitätsmodul, Flächenträgheitsmoment und Fläche des Teilquerschnitts i , a_i als Abstand des Schwerpunktes des Teilquerschnittes i vom Gesamtschwerpunkt, l als Spannweite des (Decken-)Systems und s_i bzw. $K_{ser,i}$ als Abstand bzw. Verschiebungsmodul des für die Herstellung des Verbundes verwendeten Verbindungsmittels; γ ist der Verbundfaktor, welcher im Fall des geklebten (als schubstarr angenommen) Verbundes ($K_{ser} \rightarrow \infty$) mit $\gamma = 1$ sein Maximum erreicht, wodurch das höchstmögliche, mechanische Potential des Hybridbauteils abgerufen wird.

Unter der Prämisse einer Annäherung an die mechanische Leistungsfähigkeit geklebter Systeme gilt es für geschraubte (schubnachgiebige) BSH-BSP-Rippenplatten demnach, den Verbundfaktor γ durch die richtige Schraubenwahl und -anordnung so weit als möglich zu maximieren. Dies kann einerseits durch den Nenndurchmesser d (vgl. [8], Tabelle 7.1) und die Anzahl an Holzbauschrauben und andererseits durch den Schraubentyp (Voll- statt Teilgewinde) in Kombination mit der Neigung α der Holzbauschrauben zur Verbundfuge (= Faserrichtung der BSP-Längslagen und der BSH-Rippen) und damit verbunden einer möglichen Erhöhung der effektiven Eindrehlänge l_{ef} erfolgen. Der Effekt einer signifikant positiven Beeinflussung von K_{ser} bei einer Erhöhung der Schrägstellung der Holzbauschrauben wurde bereits in der frühen 1990ern anhand von Holz-Beton-Verbunddecken erkannt, vgl. [9] und [10], und gilt seit dieser Zeit als wesentliches Charakteristikum effizienter Verschraubungslösungen im Ingenieurholzbau, vgl. [11]. Eine mittlerweile als erprobt anzusehende Möglichkeit der rechnerischen Quantifizierung dieses Effekts wurde in [12] hergeleitet und in ETA-12/0373 [13] verankert und ist in Gl. (2) angeführt:

$$K_{ser} = K_{ser,ax} \cdot \cos \alpha \cdot (\cos \alpha + \mu \cdot \sin \alpha) + K_{ser,lat} \cdot \sin \alpha \cdot (\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha), \text{ mit} \quad (2)$$

$K_{ser,ax}$ bzw. $K_{ser,lat}$ als Verschiebungsmodul von selbstbohrenden Holzbauschrauben bei rein axialer bzw. lateraler Beanspruchung und μ als Reibbeiwert; hier für Holz-Holz. Eine entsprechende grafische Illustration der Auswirkung einer Schrägstellung der Holzbauschrauben auf die Verbundsteifigkeit K_{ser} gem. Gl. (2) ist in Abbildung 2 für $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ angeführt. Unter Annahme eines Verhältnisses $K_{ser,ax} / K_{ser,lat} = 10$ (vgl. [11]) und eines Reibbeiwerts von $\mu = 0,25$ (vgl. den Anteil des Seileffekts in [8]) resultiert

darin eine Erhöhung der Verbundsteifigkeit um den Faktor 6,6 (8,7) für eine baupraktisch übliche Schrägstellung von $\alpha = 45^\circ$ (30°).

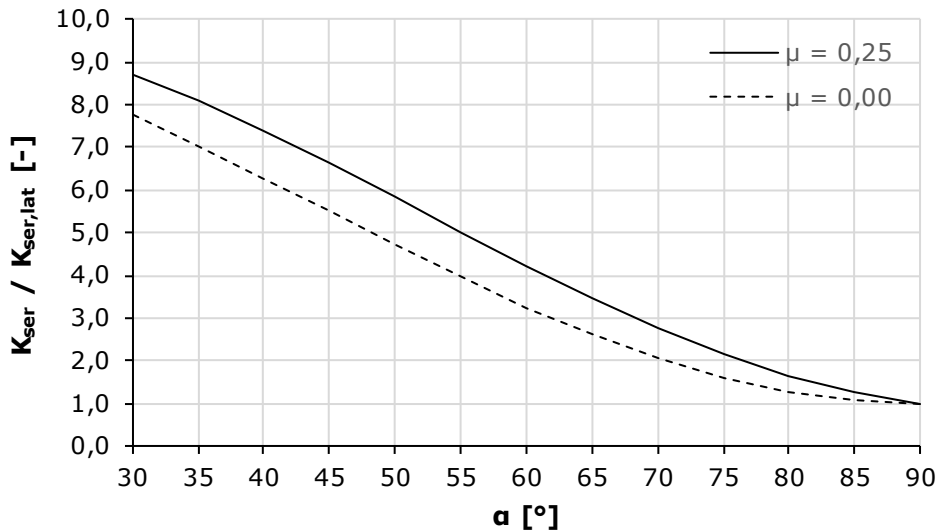


Abbildung 2: Verlauf von K_{ser} (als Vielfaches von $K_{ser,lat}$) in Abhängigkeit des Achs-Faser-Winkels α unter Zugrundlegung des Verhältnisses $K_{ser,ax} / K_{ser,lat} = 10$

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Größe von K_{ser} – und somit die Größe und die Genauigkeit der Bestimmung von $K_{ser,ax}$ und $K_{ser,lat}$ – einen entscheidenden Einfluss auf das Potential solcherart schubnachgiebig hergestellter Systeme haben. Erfolgt eine Berechnung der Holzbauschrauben anhand ihrer europäisch technischen Bewertungen (ETB), werden die Verschiebungskenngrößen üblicherweise im Fall von $K_{ser,lat}$ gemäß [8], Tabelle 7.1 (vgl. Gl. 3) und im Fall von $K_{ser,ax}$ gemäß Gl. (4) bestimmt:

$$K_{ser,lat} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d}{23}, \text{ und} \quad (3)$$

$$K_{ser,ax} = \frac{1}{\sum_{i=1}^2 \frac{1}{K_{ser,ax,i}}}, \text{ mit } K_{ser,ax,i} = 25 \cdot d \cdot l_{ef,i} \text{ und} \quad (4)$$

d als Nenndurchmesser (Gewindeaußendurchmesser) und ρ_m als mittlere Rohdichte des Holzbauteils (bzw. der Holzbauteile). Untersuchungen zum Verschiebungsmodul von Verbindungen mit Holzbauschrauben in der Vergangenheit haben jedoch gezeigt, dass Kenngrößen, berechnet nach Gl. (3) und Gl. (4), in vielen Fällen die Prüfergebnisse signifikant überschätzen, vgl. [14] und [15]. Unter anderem um die Vorhersagegenauigkeit beider Verschiebungskenngrößen entscheidend zu verbessern, wurde am Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz zwischen 2017 und 2021 gemeinsam mit den Firmenpartnern Schmid Schrauben Hainfeld GmbH und Wiehag GmbH das FFG BRIDGE 1 Projekt «SCREW_STIFFNESS» durchgeführt, im Rahmen dessen die in Gl. (5) und Gl. (6) gezeigten Vorschläge zur Bestimmung von $K_{ser,lat}$ und $K_{ser,ax}$ entstanden:

$$K_{ser,lat} = 60 \cdot (1,1 \cdot d_i)^{1,7}, \text{ und} \quad (5)$$

$$K_{ser,ax,i} = k_{ax} \cdot 160 \cdot \left(\frac{\rho_m}{420}\right)^{0,85} \cdot d_i^{0,9} \cdot l_{ef,i}^{0,6}, \text{ und } k_{ax} = \begin{cases} 1,00 & 45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \\ 1,3 - \frac{0,3}{45} \alpha & 0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ \end{cases} \quad (6)$$

mit d_i als nomineller Gewindeinnendurchmesser der Holzbauschraube. Anmerkung: Gl. (5) ist in [16] für den entsprechenden Zweck enthalten und wurde bereits in [14] zur Bestimmung von $K_{ser,lat}$ von Holzbauschrauben (anstatt Gl. 3) empfohlen. Im Projekt «SCREW_STIFFNESS» wurde dieser Umstand im Rahmen einer Masterarbeit [17] erneut bestätigt. Um die in Gl. (5) und Gl. (6) enthaltenen Ansätze und die Eignung von Gl. (2)

für die Bestimmung der Nachgiebigkeit schubweicher Verbundfugen von BSH-BSP-

Rippenplatten entsprechend zu verifizieren, wurden zum Abschluss des Projektes «SCREW_STIFFNESS» entsprechende Biegeprüfungen dieser Hybridbauteile zur experimentellen Bestimmung von $(EI)_{ef}$ durchgeführt.

Das dabei umgesetzte Prüfprogramm, Material und Methoden sowie die Prüfergebnisse und deren Gegenüberstellung mit den Modellvorhersagen sind nachfolgend in Kapitel 2 zusammengefasst. Den zweiten inhaltlichen Schwerpunkt dieses Beitrages bildet eine in Kapitel 3 vorgestellte Vergleichsstudie betreffend die Effizienz beider genannter Verbundvarianten für baupraktisch übliche Spannweitenverhältnisse von BSH-BSP-Rippenplatten.

2. Prüfungen von verschraubten BSH-BSP-Rippenplatten

2.1. Übersicht des Prüfprogramms

Eine Übersicht des durchgeführten Prüfprogramms zur Bestimmung von $(EI)_{ef}$ verschraubter BSH-BSP-Rippenplatten ist in Tabelle 1 ausgewiesen. Dabei war es das vordergründige Ziel, eine experimentelle Basis zur Verifikation der Gleichungen (2-6) zufolge einer Variation der ausgesuchten Parameter «Schraubentyp», «Schrägstellung» (α & parallele vs. gekreuzte Verschraubung) und «Stückzahl» (Abstand s & Reihenanzahl m), allesamt mit einem erwartet signifikanten Einfluss auf den Verbundfaktor γ , zu schaffen. Aufgrund der zeitlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wurden weitere Parameter wie etwa der Schraubendurchmesser ($d = 10 \text{ mm}$), der Achs-Faser-Winkel ($\alpha = 45^\circ$) und die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Dimensionen sowie mechanischen (Festigkeitsklasse) und physikalischen Eigenschaften (Holzfeuchte) der Holzbauteile konstant gehalten. Zudem wurde eine (Referenz-)Serie mit einer schubstarr Verklebung der BSH-BSP-Rippenplatten ebenfalls untersucht, um das Potential beider eingangs erwähnten Verbundvarianten anhand von Versuchsergebnissen vergleichen zu können. Insgesamt wurden somit 52 Versuche an BSH-BSP-Rippenplatten zur Bestimmung von $(EI)_{ef}$ durchgeführt, wobei 20 Prüfkörper darüber hinausgehend bis zum Bruch beansprucht wurden; siehe Abschnitt 2.3.

Tabelle 1: Übersicht des Prüfprogramms zur Bestimmung von $(EI)_{ef}$ von schubstarr verklebten und nachgiebig verschraubten BSH-BSP-Rippenplatten

Gruppe	Serie	#	Typ	α	s	m	n
		[-]		[°]	[mm]	[-]	[-]
I	SV*	4	-	-	-	-	-
II	TG90-400-01	4	TG**	90	400	1	8
	TG90-400-02	4	TG	90	400	2	16
	TG90-200-02	4	TG	90	200	2	32
III	VG90-400-01	4	VG***	90	400	1	8
	VG90-400-02	4	VG	90	400	2	16
	VG90-200-02	4	VG	90	200	2	32
IV	VG45p-400-01	4	VG	45	400	1	8
	VG45p-400-02	4	VG	45	400	2	16
	VG45p-200-02	4	VG	45	200	2	32
V	VG45x-400-01	4	VG	45	400	1	8
	VG45x-400-02	4	VG	45	400	2	16
	VG45x-200-02	4	VG	45	200	2	32

* SV = schubstarr verklebt; ** Rapid TG 10x340/100 mit Tellerkopf gem. [13];
 *** Rapid VG 10x340 mit Zylinderkopf gem. [13]; p = parallele Verschraubung; x = kreuzweise Verschraubung

2.2. Material

Die Geometrie und Bezeichnung der von der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH für die Versuche zur Verfügung gestellten Holzbauschrauben gemäß [13] sind in Tabelle 1 ausgewiesen. Die verwendeten 20 Stück BSP-Platten mit einer Standard-Festigkeitsklasse

der Lamellen gem. [7] wiesen dabei Abmessungen von **$b \times t_{CLT} \times L = 800 \times 120 \times 3600 \text{ mm}$** und einen Aufbau von Längslage|Querlage|Längslage = 40|40|40 mm auf. Die Abmessungen der 20 Stück BSH-Träger mit der Festigkeitsklasse GL24h gem. [18] betragen **$b \times h \times L = 120 \times 240 \times 3600 \text{ mm}$** .

2.3. Methodik

In einem ersten Schritt wurden die zur Verfügung stehenden BSP-Platten und BSH-Träger nach dem Zufallsprinzip zu je 4 Stück auf die Gruppen I bis V gem. Tabelle 1 aufgeteilt. Anschließend wurde für die Prüfkörper der Gruppen II bis V wie folgt vorgegangen:

1. zerstörungsfreie Prüfung (im linear-elastischen Bereich der Kraft-Verschiebungsbeziehung) zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls E der Einzelbauteile einer Rippenplatte als Eingangsparameter in Gl. (1),
2. zerstörungsfreie Prüfung zur Bestimmung von $(EI)_{ef}$ für die Rippenplatte ohne Verbund (vor der Verschraubung bzw. Verklebung),
3. Applikation von $n = 8$ Holzbauschrauben mit $s = 400 \text{ mm}$ und $m = 1$,
4. zerstörungsfreie Prüfung zur Bestimmung von $(EI)_{ef}$ für diese Rippenplatten-Ausführungsvariante,
5. Erweiterung der Schraubenapplikation auf $n = 16$ durch Verdoppelung der Schraubenreihe,
6. zerstörungsfreie Prüfung zur Bestimmung von $(EI)_{ef}$ für diese Rippenplatten-Ausführungsvariante,
7. Erweiterung der Schraubenapplikation auf $n = 32$ durch Halbierung des Schraubenabstandes,
8. Prüfung zur Bestimmung von $(EI)_{ef}$ und F_{max} für diese Rippenplatten-Ausführungsvariante, Beanspruchung bis zum Bruch der Probe.

Für die Prüfkörper der Gruppe I unterschied sich das Vorgehen nur insofern, dass die Proben nach Schritt 2 mittels eines 2-K-MUF verklebt, in der Laborpresse bis zum Aushärten gepresst und anschließend analog zu Schritt 8 zur Bestimmung von $(EI)_{ef}$ und F_{max} bis zum Bruch geprüft wurden. Sämtliche Prüfungen der jeweiligen Schritte erfolgten in Anlehnung an [19] mit der in Abbildung 3 illustrierten 4-Punkt-Biegeprüfkonfiguration (Abmessungen siehe Tabelle 2) an der Universalprüfmaschine Zwick Universal 275 (lignum_uni_275) des Institutes für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz. Für die Messung der globalen und lokalen Verformungen sowie des horizontalen Schlupfs in der Verbundfuge kamen je zwei Stück Wegaufnehmer der Fa. HBM zum Einsatz.

Tabelle 2: Abmessungen der Prüfkonfiguration

Bezeichnung	Zeichen	Wert	Anmerkung
	[-]	[mm]	[-]
freie Spannweite	l	3240	
Messlänge E-Modul	l_1	720	$6 \cdot t_{CLT}$
Abstand Auflager zur Lasteinleitung	a_1	1080	$l / 3$
Abstand der Lasteinleitungspunkte	a_2	1080	$l / 3$
Nennbreite	b	800 bzw. 120	BSP (& Rippenplatte) bzw. BSH
Nennhöhe	h	360, 120 bzw. 240	Rippenplatte, BSP bzw. BSH
Gesamtlänge	L	3600	
Auflagerbreite	b_a	180 bzw. 100	am Auflager bzw. bei der Lasteinleitung

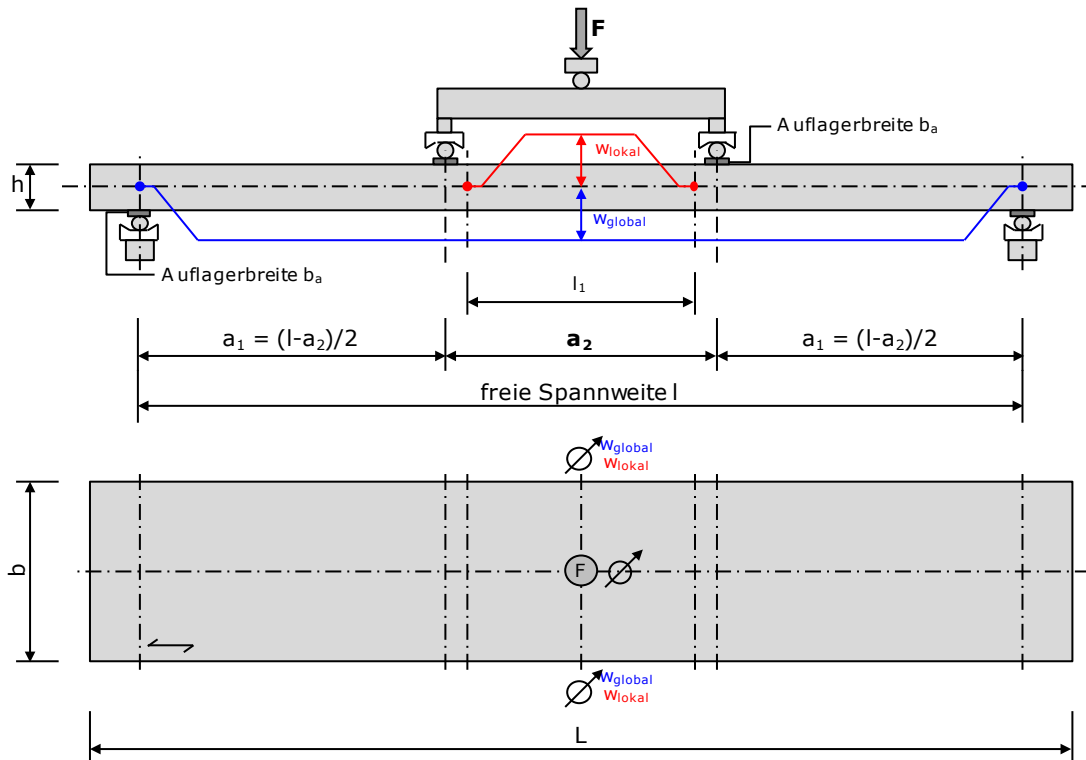


Abbildung 3: Prüfkongfiguration für die BSH-BSP-Rippenplatten und die einzelnen Holzbauteile

Im Anschluss an die Prüfungen wurde die Holzfeuchte gemäß [20] mittels Darrverfahren an Proben, je ein Stück entnommen aus den BSP-Platten und BSH-Trägern pro Rippenplatte bestimmt. Die Rohdichte wurde für alle BSP-Platten und BSH-Träger aus den globalen Abmessungen und der Masse des gesamten Bauteils und zusätzlich aus den entsprechenden Kennwerten der Darrproben ermittelt.

Die Bestimmung der Vorformungskennwerte in Form der Elastizitätsmoduln der Einzelkomponenten sowie der effektiven Biegesteifigkeit der Rippenplatten erfolgte sowohl mit den Ergebnissen der lokalen als auch mit jenen der globalen Wegmessung. Nachdem die in Abschnitt 2.4 diskutierten Prüfergebnisse auf der letztgenannten basieren, ist nur die dafür verwendete Funktion zur Bestimmung von $(EI)_{ef,exp}$ in Gl. (7) explizit angeführt. Betreffend den theoretischen Hintergrund zur Bestimmung des (globalen) Elastizitätsmoduls für die Einzelkomponenten wird auf [21] verwiesen.

$$(EI)_{ef,exp} = \frac{dF}{dw} \cdot \frac{a_1 \cdot l^2}{48} \cdot \left[3 - 4 \cdot \left(\frac{a_1}{l} \right)^2 \right], \text{ mit} \quad (7)$$

dF/dw als mittels Regressionsanalyse bestimmte Steigung der Last-Verschiebungskurve im linear-elastischen Bereich. Die Berechnung des experimentellen Verbundfaktors erfolgte näherungsweise anhand von Gl. (8):

$$\gamma = \frac{(EI)_{ef,exp} - (EI)_{ef,exp,\gamma=0,mean}}{(EI)_{ef,exp,\gamma=1,mean} - (EI)_{ef,exp,\gamma=0,mean}}, \text{ mit} \quad (8)$$

$(EI)_{ef,exp,\gamma=0,mean}$ und $(EI)_{ef,exp,\gamma=1,mean}$ als Mittelwerte der effektiven Biegesteifigkeiten, bestimmt für den losen (Gruppen II-V, Ergebnis von Schritt 2) und schubstarken Verbund (Gruppe I).

2.4. Prüfergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse des in Abschnitt 2.1 vorgestellten Prüfprogramms sind in Abbildung 4 in Form der effektiven Biegesteifigkeit $(EI)_{ef,exp}$ und des Verbundfaktors γ in Abhängigkeit der Verschraubungsvariante illustriert. Eine Quantifizierung der wesentlichen, statistischen Lageparameter ist in Tabelle 3 ausgewiesen, während Tabelle 4 die Basisdaten der

Teilkomponenten und die Kennwerte des losen Verbundes beinhaltet. Auf Basis der analogen Verläufe in Abbildung 4 (oben vs. unten), können einige Rückschlüsse hinsichtlich der Effizienz unterschiedlich verschraubter BSH-BSP-Rippenplatten gezogen werden:

Das in Abschnitt 1 erwähnte, maximale mechanische Potential einer Rippenplatte durch schubstarre Verklebung wird hier bestätigt, $(EI)_{ef}$ resultiert signifikant höher als bei sämtlichen schubweich verschraubten Varianten. Wie in Tabelle 3 zahlenmäßig angeführt, erreichen die Verschraubungsvarianten mit $\alpha = 90^\circ$ unabhängig des Schraubentyps und der –anzahl kaum höhere Werte für $(EI)_{ef}$ bzw. γ als die Variante mit dem losen Verbund (vgl. Tabelle 4). Darauf basierend sind Verschraubungen normal zur Verbundfuge als statisch unwirksam einzustufen. Wie bereits in Abbildung 2 anhand des theoretischen Anstiegs der Fugensteifigkeit mit kleiner werdendem Winkel α veranschaulicht, führt eine Schrägstellung der Schrauben zu einem signifikantem Anstieg beider Kenngrößen $(EI)_{ef}$ und γ , wobei im maximalen Fall rund 75 % der Biegesteifigkeit des starren Verbundes abgerufen wird. Unerwartet sind tendenziell höhere Ergebnisse der Variante mit gekreuzter Verschraubung (keine Reibung abrufbar, $\mu = 0$ in Gl. 2; vgl. Abbildung 2) gegenüber jener mit paralleler 45° -Verschraubung zu beobachten. Eine entsprechende Verifizierung mit einer größeren Stichprobe erscheint hier durchaus sinnvoll. Ungeachtet der Verschraubungsvariante ist für den hier vorgestellten Untersuchungsbereich ein positiver, näherungsweise linearer Trend von $(EI)_{ef}$ und γ bei einer Erhöhung der Schraubenanzahl (unabhängig ob $> m$ oder $< s$) festzustellen.

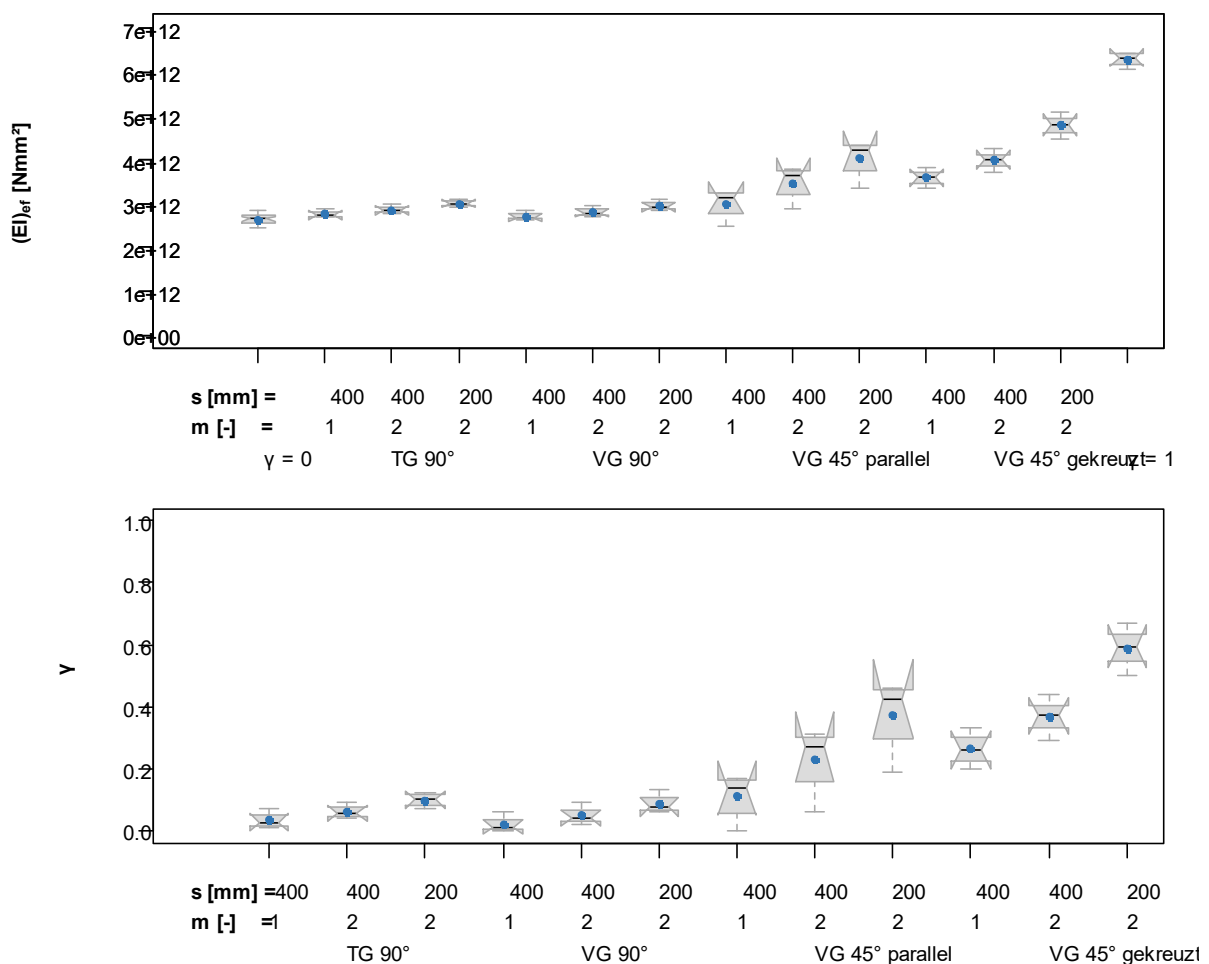


Abbildung 4: Prüfergebnisse in Abhängigkeit der Verschraubungsvariante; oben: effektive Biegesteifigkeit $(EI)_{ef}$, unten: Verbundfaktor γ

Tabelle 3: statistische Lageparameter der effektiven Biegesteifigkeit und des Verbundfaktors für die Gruppen I bis V

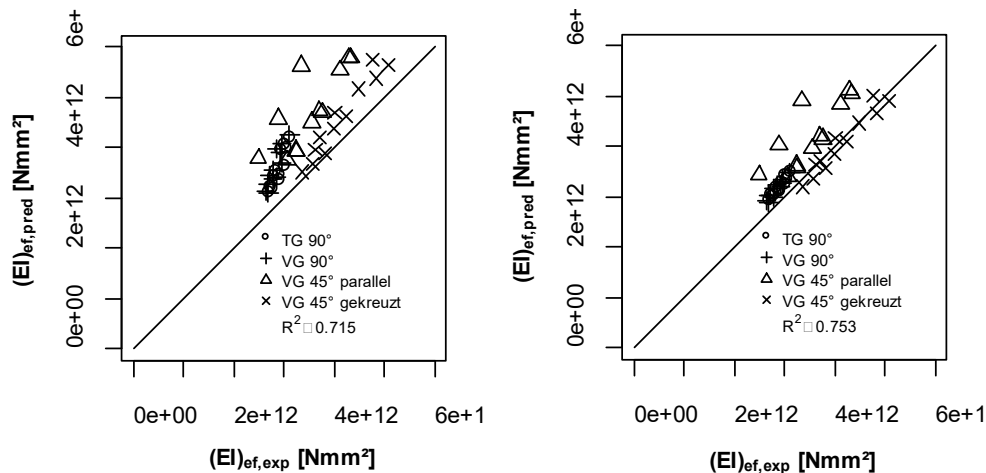
Gruppe	Serie	$(EI)_{ef}$			Y		
		#	MW	CV	#	MW	CV
		[-]	[10^{12} Nmm ²]	[%]	[-]	[-]	[%]
I	SV*	4	6,29	2,59	4	1,000	0,00
II	TG90-400-01	4	2,76	3,26	4	0,032	75,9
	TG90-400-02	4	2,87	2,91	4	0,061	37,8
	TG90-200-02	4	3,01	2,71	4	0,100	22,4
III	VG90-400-01	4	2,72	3,69	3	0,027	101,9
	VG90-400-02	4	2,81	3,66	4	0,046	61,2
	VG90-200-02	4	2,95	3,78	4	0,085	36,1
IV	VG45p-400-01	4	3,00	12,0	4	0,109	70,4
	VG45p-400-02	4	3,48	11,8	4	0,229	49,0
	VG45p-200-02	4	4,03	11,5	4	0,379	33,4
V	VG45x-400-01	4	3,60	5,37	4	0,261	20,3
	VG45x-400-02	4	3,99	5,55	4	0,368	16,5
	VG45x-200-02	4	4,79	5,14	4	0,589	11,5

Tabelle 4: statistische Lageparameter der Rohdichte, Holzfeuchte und E-Modul der Teilkomponenten und effektiven Biegesteifigkeit des losen Verbundes

	BSP-Platte			BSH-Träger			loser Verbund
	ρ_{12}	u	E	ρ_{12}	u	E	$(EI)_{ef,Y=0}$
	[kg/m ³]	[%]	[N/mm ²]	[kg/m ³]	[%]	[N/mm ²]	[Nmm ²]
Anzahl [-]	20	20	20	20	20	20	20
Mittelwert	456	10,4	12.329	447	12,5	11.778	$2,65 \cdot 10^{12}$
CV[%]	1,65	6,15	6,39	3,77	3,10	7,70	4,25

2.5. Modellvergleich

In Abbildung 5 sind die experimentell bestimmten, effektiven Biegesteifigkeiten sämtlicher Verschraubungsvarianten den mit Gl (1) und (2) bestimmten Vorhersagen gegenübergestellt, wobei die Berechnung von $K_{ser,ax}$ und $K_{ser,lat}$ einmal mittels Gl. (3) und (4) (Abbildung 5, links) und einmal mittels Gl. (5) und (6) (Abbildung 5, rechts) erfolgte. Grundsätzlich ist festzustellen, dass beide Modellvarianten zu einer für die Vorhersage von Steifigkeitskenngrößen vergleichsweise hohen Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechenmodell führen. Ungeachtet dessen wird die in der Vergangenheit bereits beobachtete Tendenz der gegenwärtig verwendeten $K_{ser,ax}$ - und $K_{ser,lat}$ -Modelle zur progressiven Überschätzung des realen Verhaltens erneut bestätigt. Für die beiden neu zur Diskussion gestellten Ansätze in Gl. (5) und (6) hingegen, ist mit Ausnahme eines Prüfkörpers der Serie VG45p (welcher in seinen drei Verschraubungsvarianten zu den drei deutlicher abweichenden Prüfergebnissen führt) eine maßgeblich verbesserte Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen zu beobachten.

Abbildung 5: Prüfergebnisse vs. Modellvorhersagen der effektiven Biegesteifigkeit $(EI)_{ef}$; links: $K_{ser,ax}$ und $K_{ser,lat}$ gem. Gl. (3) und (4), rechts: $K_{ser,ax}$ und $K_{ser,lat}$ gem. Gl. (5) und (6)

3. Vergleichsstudie unterschiedlicher Verbundvarianten

Auf Basis der in Abschnitt 1 vorgestellten Ansätze (Gl. 2 bzw. Gl. 5 und 6) wurde in einem weiteren Schritt eine Vergleichsstudie durchgeführt, mit dem Ziel einer Gegenüberstellung der Effizienz der diskutierten Verbundvarianten unter baupraktisch üblichen Bedingungen.

Neben jener der drei auch experimentell untersuchten Verbundvarianten (schubstarr verklebt, schubweich verschraubt mit $\alpha = \{45, 90\}^\circ$, loser Verbund) erfolgte dabei eine Variation der Spannweite der Einfeldträger-Deckensysteme im praxisrelevanten Einsatzbereich $\rightarrow l = \{6, 8, 10, 12\}$ m. Für alle Varianten konstant gehalten wurden neben der verwendeten Schraube (Rapid VG 10x350/338) die Querschnittshöhe der BSP-Platten und die Querschnittsbreite der BSH-Rippen (analog zu Abschnitt 2.2: $t_{CLT} = 120$ mm mit 40|40|40 mm Aufbau; $b_{BSH} = 120$ mm) sowie deren Materialkenngrößen (BSP gem. [7], BSH Gl24h gem. [18]). Die Ausprägung der Querschnittshöhe h_{BSH} der BSH-Rippen sowie die Querschnittsbreite b der BSP-Platten (= Rippenabstand e) wurde nach dem folgenden Schema gestaltet:

- Bestimmung von h_{BSH} in Abhängigkeit von l für die schubstarr verklebte Verbundvariante und einen Rippenabstand $e = 800$ mm,
- 1. Variation: sukzessive Erhöhung von h_{BSH} (in 40 mm Schritten) als gesuchte Kenngröße der verbleibenden Verbundvarianten bei Beibehaltung von $e = 800$ mm, um die Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit gem. [8] zu erfüllen,
- 2. Variation: ident wie 1. Variation, nur wurde hier sukzessive e verringert, während h_{BSH} beibehalten wurde.

Das Ziel der beiden Variationen war es, einerseits mit der Erhöhung von h_{BSH} den minimal zusätzlichen Materialaufwand und andererseits die Auswirkungen auf den Rippenabstand e zufolge eines nachgiebigen Verbundes zu bestimmen.

Für die 1. Variation wurde dabei zusätzlich noch der Abstand der Verschraubung ($m = 1$) in Form von $s = \{50, 200\}$ mm variiert, während für die 2. Variation $s = 200$ mm betrug. Anmerkungen: $s = 50$ mm entspricht dem Mindestabstand a_1 der Schrauben untereinander in einer Ebene parallel zur Faserrichtung gem. [13] und somit der maximal möglichen, einreihigen Schraubenbestückung der Verbundfuge. Dagegen entspricht $s = 200$ mm dem Maximalabstand der Schrauben (Rapid Komplex S25 10x340/120) gem. [22], Anhang L für die Herstellung der schubstarrten Verbundvariante mittels Schraubpressverklebung, wodurch dieselbe notwendige Stückzahl an Holzbauschrauben für alle Verbundvarianten (ausgenommen loser Verbund) resultiert.

Bezüglich der baustatischen Berechnung und Nachweisführung wurden ein schwerer Fußbodenaufbau (u.a. 6 cm schwimmender Zementestrich mit $E = 26.000$ N/mm², $g_{k,1} = 2,00$ kN/m²) sowie eine Bürodecke der Kategorie B.2 gem. [23] ($q_k = 3,8$ kN/m², Trennwandzuschlag inkludiert) mit hohen Schwingungsanforderungen (Klasse 1) angenommen. Die Deckenbreite betrug dabei stets $2 \cdot l$ und das Dämpfungsmaß wurde mit 3 % angesetzt. Anmerkung: das Schwingungsnachweisverfahren gem. [22] war in sämtlichen Fällen bemessungsrelevant.

Die Ergebnisse dieser Vergleichsstudie sind folglich in Abbildung 6 bis Abbildung 8 in Form von Balkendiagrammen betreffend BSH-Querschnittshöhe und Rippenabstand und getrennt nach Schraubenabstand illustriert. Wie erwartet ist eine geringfügige bis deutliche Zunahme von h_{BSH} (bei gleichbleibendem e) bzw. eine signifikante Reduktion von e (bei gleichbleibendem h_{BSH}) zufolge einer Abnahme des Verbundfaktors γ ($\gamma_{\text{schubstarr}} = 1 > \gamma_{\alpha=45^\circ} > \gamma_{\alpha=90^\circ} > \gamma_{\text{loserVerbund}} = 0$) zu beobachten. Dieses Verhalten wird mit zunehmender Spannweite l sukzessive abgeschwächt, sodass die geringsten Unterschiede bei $l = 12$ m festzustellen sind. Bezogen auf einen (wirtschaftlichen) Schraubenabstand von $s = 200$ mm, führt dies für Rippenplattensysteme mit einer freien Wahl der Systemhöhe zu einer 1,1- bis 1,6-fachen Zunahme des Holzvolumens (= Zunahme von h_{BSH}) und bei solchen

mit einer eingeschränkten Systemhöhe zu einer 1,3- bis 3,2-fachen Zunahme des Holzvolumens und der Schraubenzahl.

Eine signifikante Reduktion des Schraubenabstandes auf $s = 50$ mm hat nur für die Verschraubung mit $\alpha = 45^\circ$ einen relevanten, positiven Einfluss. Für die untersuchten Spannweiten mit $l \neq 6$ m lassen sich mit dieser Maximalbestückung mehr oder minder dieselben Holzdimensionen wie beim Schubstarr Verbund realisieren.

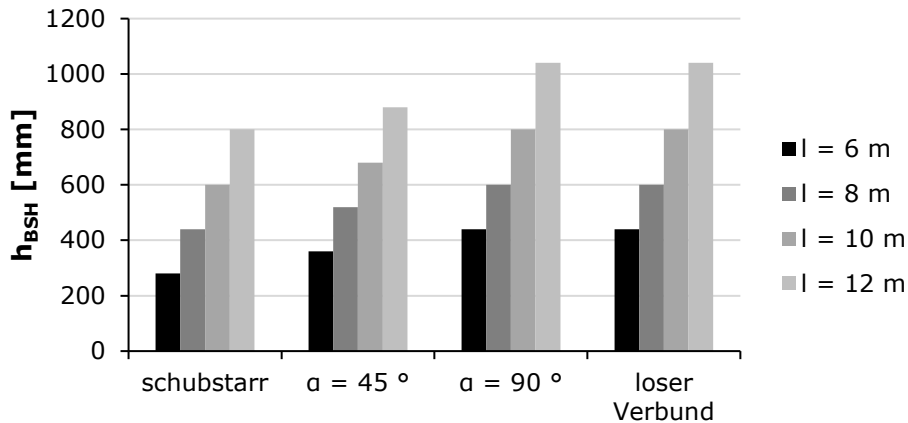


Abbildung 6: erforderliche BSH-Querschnittshöhe h_{BSH} in Abhängigkeit der Verbundvariante und der Spannweite für $s = 200$ mm

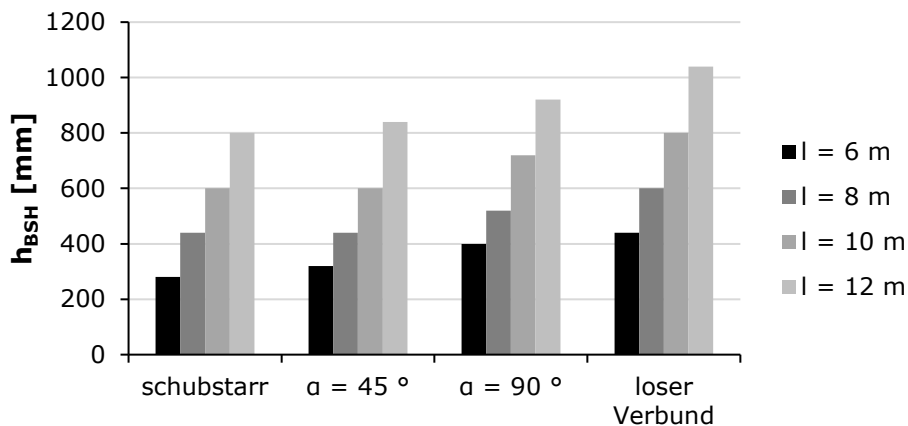


Abbildung 7: erforderliche BSH-Querschnittshöhe h_{BSH} in Abhängigkeit der Verbundvariante und der Spannweite für $s = 50$ mm

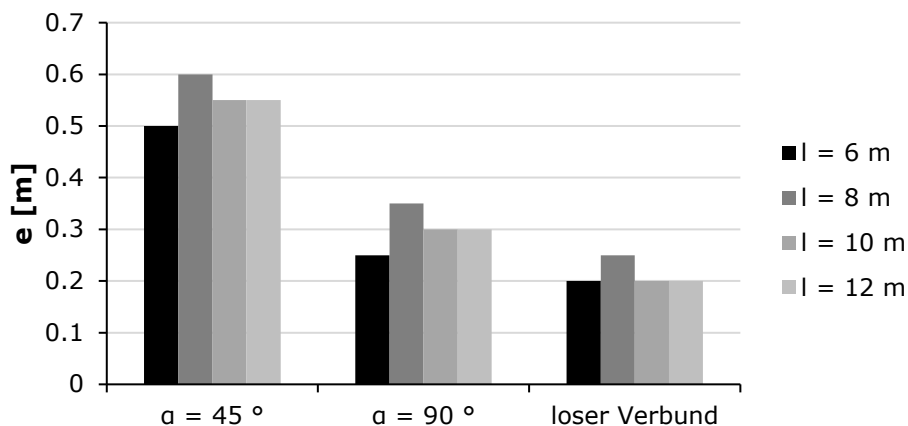


Abbildung 8: erforderlicher Rippenabstand e in Abhängigkeit der Verbundvariante und der Spannweite für ein konstantes h_{BSH} und $s = 200$ mm

4. Zusammenfassung

Rippendecken, bestehend aus Brettsperrholz-Platten und Brettschichtholz-Trägern sind mittlerweile ein vielfach erprobtes System zur Überspannung von für reine Brettsperrholz-Deckenplatten unwirtschaftlich großen Raumtiefen. Neben dem schubstarr verklebten Verbund zwischen Brettsperrholz und Brettschichtholz – großteils mittels Schraubpressverklebung realisiert und mit erhöhten Anforderungen hinsichtlich Qualifikation sowie interner und externer Produktionskontrolle verbunden – stellen schubweich verschraubte Systeme eine weniger komplexe jedoch auch mechanisch weniger leistungsfähige Alternative dar.

Bei der letztgenannten Verbundvariante übt die Schraubkonfiguration (Nenn Durchmesser, Anzahl, Einschraubwinkel, Schraubentyp, etc.) einen signifikanten Einfluss auf die mechanische Leistungsfähigkeit aus. Nachdem sich die gegenwärtig am häufigsten verwendeten Rechenmodelle zur Bestimmung der lateralen ($K_{ser,lat}$) und axialen Steifigkeit ($K_{ser,ax}$) (als für die Verbundkenngößen wesentliche Eingangskenngrößen) in der Vergangenheit als zu progressiv erwiesen haben, war es ein Ziel des Projektes «SCREW_STIFFNESS», neue Ansätze für deren Bestimmung auszuarbeiten. Im Rahmen des vorliegenden Beitrages wird die entsprechende, experimentelle Verifizierung dieser Modelle anhand von 4-Punkt-Biegeprüfungen schubweich mittels RAPID-Schrauben der Fa. Schmid Schrauben Hainfeld GmbH verschraubter und schubstarr verklebter BSH-BSP-Rippenplatten vorgestellt. Als wesentliche Ergebnisse sind eine weitgehende Bestätigung der theoretischen Modellannahmen (nachgiebiger Verbund gem. [8], Bestimmung von K_{ser} gem. Gl. 2) sowie eine verbesserte Übereinstimmung der Prüfergebnisse mit den neuen Rechenmodellen (Gl. 5 und 6) im Vergleich zum bisherigen Stand des Wissens zu nennen.

Die Ergebnisse einer auf diesen Erkenntnissen basierenden Vergleichsstudie der Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Verbundvarianten zeigen das größere mechanische Potential des schubstarrten Verbundes in Form eines teilw. signifikant geringeren Materialbedarfs deutlich auf. Speziell im Fall einer frei wählbaren Systemhöhe der BSH-BSP-Rippenplatte ist insbesondere bei größeren Spannweiten eine Annäherung der Leistungsfähigkeit mittels (45 °) geneigter Applikation von Vollgewindeschrauben bei ähnlichem Holzvolumen und Schraubenstückzahl jedoch durchaus möglich. Eine 90 °-Verschraubung übt hingegen keinen nennenswert positiven Einfluss auf die Verbundwirkung aus.

5. Danksagung

Die Grundlage für den vorliegenden Beitrag wurden primär im Rahmen des Forschungsprojektes FFG BRIDGE 1 «SCREW_STIFFNESS» (No. 861554) erarbeitet. Das Projekt erhielt öffentliche Fördermittel von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG). Diese sowie jene Unterstützung durch die Wirtschaftspartner, Schmid Schrauben Hainfeld GmbH und Wiehag GmbH werden dankend erwähnt.

6. Quellenverzeichnis

- [1] Brandner, R.; Flatscher, G.; Ringhofer, A.; Schickhofer, G.; Thiel, A. (2016) Cross laminated timber (CLT): overview and development. Eur. J. Wood. Prod., doi: 10.1007/s00107-015-0999-5.
- [2] Ringhofer, A.; Schickhofer, G. (2013) Timber-in-Town – current examples for residential buildings in CLT and tasks for the future. In: Focus Solid Timber Solutions – European Conference on Cross Laminated Timber (CLT), Graz, Austria, p. 196-217.
- [3] Zimmer, S. (2015) focus_sts 1.1.2_3 – Teilbericht aus Deckensysteme | Untersuchungen zu Rippenquerschnitten aus BSP und BSH mit verstärkten Ausklinkungen. Forschungsbericht, holz.bau forschungsgmbh, Graz, Austria.
- [4] Augustin, M.; Zimmer, S. (2016) Untersuchung und Nachweisführung auflagernah ausgeklinkter BSH/BSP-Plattenbalkenquerschnitte. In: 2. Klagenfurter Holzbau-Fachtagung (2. KlafHT'16): Versorgen und Umhüllen im Holzbau - Schnittstellen des Holzbaus zur Gebäude- und Fassadentechnik. Verlag der Technischen Universität Graz, Austria, p. 1-36.

- [5] Schickhofer, G. (2015) CLT—European experience: idea & development, technology & applications. In: Presentation, CLT Seminar, Kochi, Japan, 5th February 2015.
- [6] MMK Holz-Beton-Fertigteile GmbH (2021) Handbuch – XlamConcrete – das Holz-Beton-Verbundelement. Produktunterlagen, Wöllersdorf, Austria.
- [7] ETA-14/0349 (2020) Stora Enso Wood Products OY Ltd: CLT – Cross Laminated Timber, European Technical Assessment, OIB.
- [8] EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008 + A2:2014 (2014): Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. CEN.
- [9] Küng, R. (1987) Verbunddecke Holz-Leichtbeton – Theoretische und experimentelle Untersuchung der Verbundkonstruktion aus Holz und Leichtbeton mit Holzschrauben als Verbundmittel. Forschungsbericht, Technische Universität Graz, Graz, Austria.
- [10] Meierhofer, A. U. (1993) Tests on timber concrete composite structural elements (TCCS). In: Proceedings of the 26th CIB W18 Meeting, Athens, Georgia (USA). Paper CIB-W18/26-7-5.
- [11] Ringhofer, A. (2017): Axially Loaded Self-Tapping Screws in Solid Timber and Laminated Timber Products. In: Schickhofer, G; Brandner, R (eds.) Timber Engineering & Technology, TET 5, Verlag der Technischen Universität Graz, Graz, Austria.
- [12] Tomasi, R.; Crosatti, A.; Piazza, M. (2010) Theoretical and experimental analysis of timber-to-timber joints connected with inclined screws. Construction and Building Materials 24(2010), p. 1560-1571.
- [13] ETA-12/0373 (2020) Schmid Schrauben Hainfeld GmbH: Schmid screws RAPID, STAR-DRIVE and SP, European Technical Assessment, OIB.
- [14] Laggner, T. M. (2016) Prüftechnische Untersuchung kombiniert beanspruchter selbstbohrender Holzschrauben. Masterarbeit, Technische Universität Graz, Graz, Austria.
- [15] Ringhofer, A. (2016) Stiffness Properties of Axially Loaded Self-Tapping Screws. Short Term Scientific Mission (STSM) Report of COST Action FP1402, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, Graz, Austria.
- [16] SIA 265 (2012) Holzbau.
- [17] Burtscher, M (2021) Experimentelle Untersuchung des Tragverhaltens mehrachsig beanspruchter Holzschrauben. Masterarbeit, Technische Universität Graz, Graz, Austria.
- [18] ÖNORM EN 14080 (2013) Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen.
- [19] ÖNORM EN 408 (2012) Holzbauwerke- Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz-Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften.
- [20] ÖNORM EN 13183-1 (2004) Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren (EN 13183-1:2002 + AC:2003).
- [21] Schickhofer G, Bogensperger T, Moosbrugger T (eds., 2010) BSPHandbuch: Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz—Nachweise auf Basis des neuen europäischen Normenkonzepts. Verlag der Technischen Universität Graz, Graz, Austria.
- [22] ÖNORM B 1995-1-1 (2019) Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Konsolidierte Version mit nationalen Festlegungen, nationalen Erläuterungen und nationalen Ergänzungen zur Umsetzung der ÖNORM EN 1995-1-1.
- [23] ÖNORM B 1991-1-1 (2017) Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewicht, Nutzlasten im Hochbau Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-1 und nationale Ergänzungen.