

Untersuchungen zum Tragverhalten von axial beanspruchten Schraubengruppen in der Schmalseite von Brettsperrholz (BSP)

Analyse du comportement de groupes de vis fixés sur chant de panneaux CLT et soumis à une sollicitation axiale

Investigations into the bearing behavior of axially loaded screw groups on the narrow side of CLT

Yannick Plüss
WAM Planer und Ingenieure AG
CH-Bern



Reinhard Brandner
Technische Universität Graz
AT-Graz



Untersuchungen zum Tragverhalten von axial beanspruchten Schraubengruppen in der Schmalseite von Brettsperrholz (BSP)

1. Einleitung

Brettsperrholz (BSP) besteht aus mehreren, rechtwinklig zueinander verklebten Brettlagen, in der Regel aus Fichte (*Piceaabies*). Durch die gekreuzte Anordnung der einzelnen Lagen entstehen mehrschichtige, als Scheibe und Platte belastbare, großformatige Elemente von z.B. 3 m Breite und 16 m Länge, welche vielseitig als z.B. Wand-, Decken- und Dachelemente, aber auch als Träger eingesetzt werden können. Die Holz-Massivbauweise mit BSP ermöglicht eine kurze, saubere und trockene Montage von Tragwerken, ein Aspekt welcher insbesondere für den mehrgeschossigen Wohn- und Bürobau von Interesse ist. Um eine wirtschaftliche baustellenseitige Montage der einzelnen Elemente zu ermöglichen, bietet sich die Fügung mittels selbstbohrender Holzschrauben an. Diese haben u.a. folgende Vorzüge:

- Möglichkeit der Montage ohne Vorbohren,
- hohe Tragfähigkeit und Steifigkeit bei axialer Beanspruchung,
- hohe Wirtschaftlichkeit durch zügiges Applizieren und Vielseitigkeit im Einsatz.

In Hinblick auf eine für diese Bauweise notwendige Entwicklung und Systematisierung der Verbindungstechnik, z.B. durch Systemverbinder, ist es das Ziel, konzentriert hohe Traglasten in die BSP-Elemente einzubringen. Hierzu wird der Einsatz von primär axial beanspruchten Schraubengruppen als zielführend erachtet. Während bereits umfangreiche Arbeiten zur Tragfähigkeit von selbstbohrenden Schrauben und Schraubengruppen bei Einbringung in die Seitenfläche von BSP vorliegen (u.a. [1], [2], [3], und [4]) ist die Tragwirkung von primär axial beanspruchten Schraubengruppen in der Schmalseite von BSP erst unzulänglich betrachtet. Als wesentliche Arbeiten betreffend die Einzelschraube in der BSP-Schmalseite sind jene von [1] und [5] zu nennen. Die umfangreichen Arbeiten von [1] beinhalten bereits Betrachtungen von Mindest- und Randabständen von Schrauben in der BSP-Schmalfläche. Die Abstände wurden durch oberflächenbündiges Einschrauben von Senkkopfschrauben und anschließender Beurteilung der Rissbildung festgelegt; Ausziehprüfungen an Schraubengruppen wurden, nach Kenntnisstand der Autoren, bislang nicht durchgeführt. Aktuelle Regelungen für den Einsatz von genannten Schrauben in der BSP-Schmalfläche geben unter anderem das BSP-Handbuch [6] oder die Informationsbroschüre zur Brettsperrholzbemessung [7]. Die konservative Beurteilung des Winkels zwischen der Schraubenachse und Faserrichtung (α) führt dazu, dass die Tragfähigkeit gewisser Konfigurationen deutlich unterschätzt wird. Dazu kommt, dass aufgrund der grossen Unterschiede in der Herstellung von BSP, u.a. in Bezug auf Fugenabstände, die konstruktiven Hinweise ungenügend und nicht immer konservativ geregelt sind. Gleichung 1 zeigt die in [7] verwendete Abschätzung der Ausziehtragfähigkeit einer Einzelschraube in der BSP-Schmalfläche, welche unabhängig vom Winkel ist.

$$F_{a,k} = \frac{31 \cdot d^{0,8} \cdot l_{ef}^{0,9}}{1,5} \quad (1)$$

- d Nenndurchmesser der Schraube, in [mm],
 l_{ef} Eindringtiefe des Gewindeteils mit Schraubenspitze, in [mm].

Für Schraubengruppen werden in [7] die in Tabelle 1 dargestellten Umrechnungsfaktoren angegeben. Diese Faktoren werden entsprechend der Anzahl Schraubenpaare p mit dem Wert der Tragfähigkeit der Einzelschraube multipliziert.

Tabelle 1: Umrechnungsfaktoren für die Gruppenwirkung, nach [7]

Anzahl der Schraubenpaare $p = n / 2$	1	2	4	8	12	16
Umrechnungsfaktor	1,15	1,07	1,00	0,93	0,90	0,87

Für eine Gruppe von $n = 4$ Schrauben, also $p = 2$ Paaren, berechnet sich die Gruppen-tragfähigkeit von wie in Formel (2) beschrieben.

$$F_{a,k,4} = 2 \cdot 1,07 \cdot \frac{31 \cdot d^{0,8} \cdot l_{ef}^{0,9}}{1,5} \quad (2)$$

Bei der Verbindung von rechtwinklig oder allg. unter einem Winkel zueinander angeordneten BSP-Elementen werden Schraubengruppen durch die Seitenfläche des einen in die Schmalfäche des anderen Elementes eingebracht, vgl. Abbildung 1. Da der Winkel zwischen der Schraubenachse und der Faserrichtung bei einer Platzierung von Schrauben in der BSP-Schmalfäche je nach Position unterschiedlich sein kann, kann nicht von einem einheitlichen Tragverhalten der Einzelschrauben in einer kompakten Gruppe ausgegangen werden.

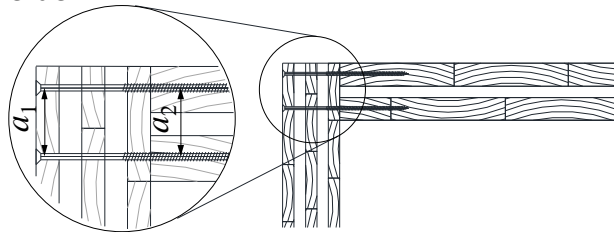


Abbildung 1: Beispiel einer Schraubenverbindung zwischen zwei BSP-Elementen

Die Motivation für die vorliegende Arbeit ist somit im unzulänglichen Kenntnisstand betreffend der Tragwirkung von Schraubengruppen in der BSP-Schmalfäche, im Besonderen in Hinblick auf die Entwicklung von Systemverbindern, gegeben. Die Herausforderungen in der Platzierung von Schraubengruppen in der BSP-Schmalfäche sind u.a. (i) das gemeinsame Tragverhalten von in verschiedenen Lagen platzierten Schrauben, (ii) der Einfluss von Fugen, (iii) der Einfluss der Gruppengröße und (iv) die eindeutige Festlegung von Mindestabständen in Hinblick auf eine Neudefinition für das orthogonal geschichtete Produkt BSP.

Aufbauend auf umfangreichen und systematischen Untersuchungen zum Tragverhalten der Einzelschraube in der BSP-Schmalfäche in [5] und motiviert aus den zuvor genannten Punkten, wurde das Forschungsprojekt focus_sts 3.2.1_3 zur Gruppenwirkung von primär axial beanspruchten und auf Herausziehen versagenden selbstbohrenden Schraubengruppen in der BSP-Schmalfäche durchgeführt, siehe [8]. Die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse daraus werden hier kurz vorgestellt und umfassen die Studie folgender Einflussparameter:

- den Abstand zwischen den Schrauben parallel und senkrecht zur Scheibenebene,
- die Anzahl von Schrauben in einer Gruppe,
- die Kombination verschiedener Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung in einer Gruppe.

2. Material und Methoden

Im Rahmen von [8] wurden 750 Prüfungen an Einzelschrauben und Schraubengruppen durchgeführt. Die Prüfungen an Einzelschrauben dienten als Referenz für die Entwicklung eines Modells zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Schraubengruppen aufbauend auf den Kennwerten von Einzelschrauben und dem Last-Faserwinkel α . Im Folgenden eine kurze Darlegung wesentlicher Daten zu Material und Methodik. Eine detaillierte Beschreibung dessen ist in [8] gegeben.

2.1. Material

Um eine Vergleichbarkeit mit bestehenden Normen und Regulierungen sowie der vorhandenen Literatur zu gewährleisten, wurden längenbezogene Parameter wie der Schraubenabstand oder die Einschraubtiefe als Vielfaches des Nenndurchmessers d definiert. Da zudem verschiedene Schrauben der einzelnen Gruppen in unterschiedlichen Lagen eingeschraubt wurden, mussten auch die Brettaufbauten in Abhängigkeit des Schraubendurchmessers und der gewählten Abstände definiert werden.

Um möglichst praxisnahe Anordnungen zu prüfen und bei der Versuchsdurchführung weitestgehend auf vorhandene Ausrüstung zurückzugreifen, fiel die Wahl auf den Schraubendurchmesser $d = 8$ mm. Mit Fokus auf das Ausziehtragverhalten wurde die Einschraublänge, gestützt auf [9], mit $10 d$ festgelegt.

Sowohl in den gegenwärtigen Normen als auch in der Literatur tritt der Abstand $5 d$ als Mindest- oder Randabstand vermehrt auf. Aus diesem Grund wurde dieser als Grundeinheit für die Prüfungen gewählt. Um davon ausgehend auch grössere Abstände, wie $7,5 d$ oder $10 d$, und kleinere Abstände, wie $2,5 d$ prüfen zu können, wurden die in Tabelle 2 aufgeführten BSP-Aufbauten gewählt. Für die Identifikation der Schrauben hinsichtlich ihrer Position senkrecht zur Scheibenebene in der Schmalfläche der fünfschichtigen BSP-Prüfkörper, wurden die Begriffe „Decklage“ (DL), „Querlage“ (QL), „Mittellage“ (ML) und „Zwischenlage“ (ZL) aus [5] übernommen.

Tabelle 2: Geprüfte BSP-Aufbauten

Brettaufbau	t_1 [mm] Lage 1	t_2 [mm] Lage 2	t_3 [mm] Lage 3	t_4 [mm] Lage 4	t_5 [mm] Lage 5
B1: $t_{\text{BSP}} = 100$ mm	40	20	40	–	–
B2: $t_{\text{BSP}} = 100$ mm	20	20	20	20	20
B3: $t_{\text{BSP}} = 160$ mm	40	20	40	20	40
B4: $t_{\text{BSP}} = 200$ mm	40	40	40	40	40

Da der Einfluss von Fugen in der Literatur, unter anderem in [5], bereits eingehend untersucht wurde, wurden Aufbauten mit Schmalseitenverklebung und somit eine Fugenbreite von $b_{\text{fu}} = 0$ mm gewählt. Um Einflüsse von unterschiedlicher Rohdichte in den einzelnen Lagen auszuschliessen, wurde, entgegen gültiger Regulierungen, ausschliesslich Fichte der Festigkeitsklasse C24 nach EN 338: [10] für sämtliche Lagen verwendet.

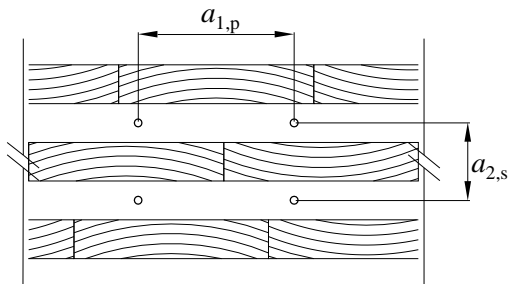
2.2. Untersuchte Parameter

Unter anderem wurden die in den folgenden Abschnitten aufgeführten und in Tabelle 3 zusammengefassten Parameter betrachtet:

Abstände zwischen den Schrauben

In [6] und [7] werden in Anlehnung EC 5 [11] und SIA265 [12] a_1 und a_2 als Parameter zur Definition von Mindestabständen zwischen den Schrauben verwendet. Gemäß [11] und [12] entspricht a_1 dem Mindestabstand zwischen den Schraubenachsen parallel zur Faserrichtung und a_2 dem Mindestabstand senkrecht dazu.

Die Verwendung von a_1 für Schraubengruppen in der BSP-Schmalfläche gestaltet sich als schwierig, da hier mehr als eine Ebene parallel zur Faserrichtung vorliegen kann. Für eine Schraubengruppe in der BSP-Schmalfläche, in welcher mitunter Schrauben in verschiedene Brettlagen appliziert werden, ist eine eindeutige Unterscheidung von a_1 und a_2 gemäß üblicher Notation für unidirektionale Produkte somit nicht möglich. In Abbildung 2 werden daher die in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Notationen erläutert. Die Abstände werden, wie üblich, als Vielfaches des Schrauben-Nenndurchmessers d angegeben.



$a_{1,p}$ Abstand **p**arallel zur Schraubenebene,
 $a_{2,s}$ Abstand **s**enkrecht zur Schraubenebene.

Abbildung 2: Notation der Abstände

Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung (α)

Auch wenn gegenwärtig nach EC 5 [11] und [7] eine Anwendung von primär axial beanspruchten selbstbohrenden Holzschrauben unter einem Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung von $\alpha < 30^\circ$ nicht zulässig ist bzw. empfohlen wird, ist der darunter liegende Bereich beispielsweise bei Systemverbindern im Randbereich von BSP-Elementen von Interesse. Man vergleiche: Die SIA 265 [3] lässt explizit auch Anwendungen im Hirnholz von Vollholz (VH) oder Brettchichtholz (BSH) zu.

Zusammenfassung der Parameter

Tabelle 3: Geprüfte Parameter

Abstände	2,5 d	5 d	7 d	7,5 d	10 d
Winkel	0°	45°	90°	0 90°	–
Lagen	DL	QL	ZL	ML	–
Schrauben	Assy 3 nach ETA-11/0190 [13] mit Einschraublänge $l_{ef} = 10 d$.				
Gruppengrösse	1 bis 9 Schrauben				
Rohdichte	300 bis 600 kg/m ³ Mittelwert der Gruppenprüfkörper 455 kg/m ³				
Holzfeuchte	9,80 bis 12,0% Mittelwert der Gruppenprüfkörper 10,9%				

2.3. Prüfdurchführung und Auswertung

Um eine gleichmäßige Belastung sämtlicher Schrauben in einer Gruppe zu gewährleisten, wurde in Anlehnung zu [4] eine kontrollierte Vorspannung von 10 Nm auf die Schrauben aufgebracht. Anschliessend wurde die Belastung, in Anlehnung an dem in EN 26891 [14] vorgeschlagenen Belastungszyklus, vorgenommen. Abbildung 3 zeigt schematisch den verwendeten Prüfaufbau und ein typisches Last-Verformungsdiagramm.

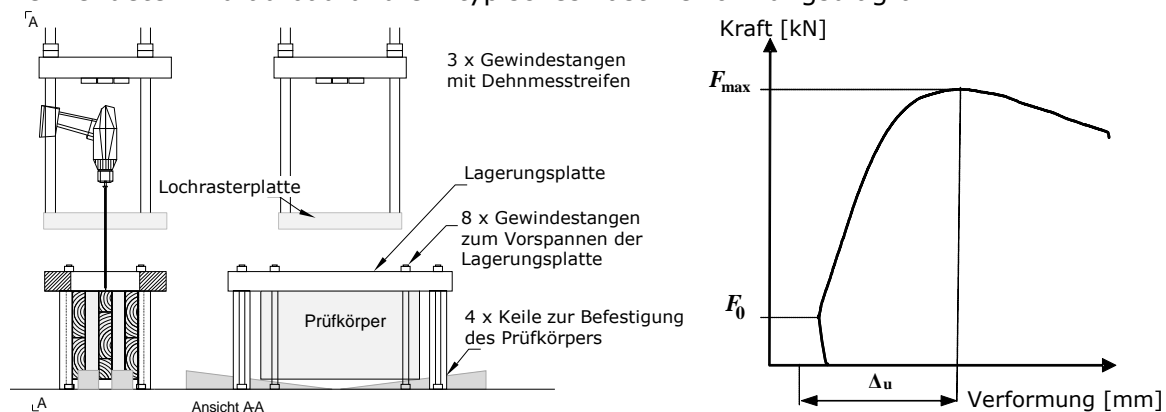


Abbildung 3: Prüfaufbau (links); typisches Last-Verformungsdiagramm (rechts)

Um den Prüfaufwand zu limitieren, wird eine dynamische Anpassung der sequentiellen Abfolge von Prüfserien durchgeführt. Aus diesem Grund wurde eine kontinuierliche Vorauswertung der Resultate vorgenommen. Der nächstgrössere Abstand sollte nur geprüft werden, wenn beim zuvor geprüften Abstand eine Reduktion der Tragfähigkeit festgestellt wurde. Dies ist der Fall, wenn der erzielte Wirkungsgrad $\eta_{ef} = F_{max,n} / (F_{ref,i} \cdot n)$ kleiner

ist, als die Anzahl der Schrauben ($n_{ef} < n$) Dabei entsprechen $F_{max,n}$ der gemessenen Prüfkraft der jeweiligen Schraubengruppe aus n Schrauben und $F_{ref,i}$ der mittleren Tragfähigkeit der hinsichtlich gewählter Parameter (Winkel, Lage) entsprechenden Referenzprüfungen. D.h., die hier untersuchten Mindestabstände wurden mit dem Ziel der Gewährleistung einer vollen Tragfähigkeit der Schraubengruppe auf Herausziehen, mit $n_{ef} = n$, festgelegt. Falls keine Referenzwerte der in der jeweiligen Prüfung vorkommenden Einzelschrauben bekannt sind, werden die Prüfergebnisse verschiedener Prüfgruppen untereinander verglichen. Dazu wird die Kraft pro Schraubenreihe $F_S = F_{max,n}/S$ anhand eines Mann-Whitney-U Tests auf signifikante Unterschiede in den Medianen der Serien zum Niveau von 95 % überprüft, wobei S die Anzahl der Schrauben pro Reihe darstellt. In den verschiedenen Lagen wurden pro Winkel 15 Referenzprüfungen durchgeführt. Von den Prüfungen mit einreihigen Schraubengruppen wurden zehn und von den mehrreihigen Schraubengruppen jeweils sechs Prüfkörper getestet.

2.4. Modellbildung zur Erfassung der Gruppentragfähigkeit

Modell 1: Elastische Verteilung der Kräfte

Bei diesem Modell wird die Schraubengruppe als parallel agierende Gruppe von Federn mit stochastischer Steifigkeit und Tragfähigkeit modelliert. Um die unterschiedlichen Tragverhalten der Schrauben je nach Last-Faserwinkel zu modellieren, wurden linear elastisch-plastische Arbeitslinien, mit einem Plateau auf Höhe der Maximallast, an die Ergebnisse der Einzelschrauben von [5] und [3] angepasst. Um die Erkenntnisse frei von parasitären Einflüssen wie unterschiedlicher Holzfeuchte oder Rohdichte auf die Prüfergebnisse anzuwenden, wurden lediglich die Verhältnisse der Kennwerte zwischen verschiedenen Winkelkombinationen, sprich Relativwerte, ermittelt. Abbildung 4 zeigt am Beispiel der Anordnung von zwei Schrauben mit einem Winkel von $\alpha = 90^\circ$ und einer Schraube mit Winkel von $\alpha = 0^\circ$, wie aus den Verhältnissen der Kennwerte der Beiden Anordnungen die Gruppentragfähigkeit bestimmt werden kann.

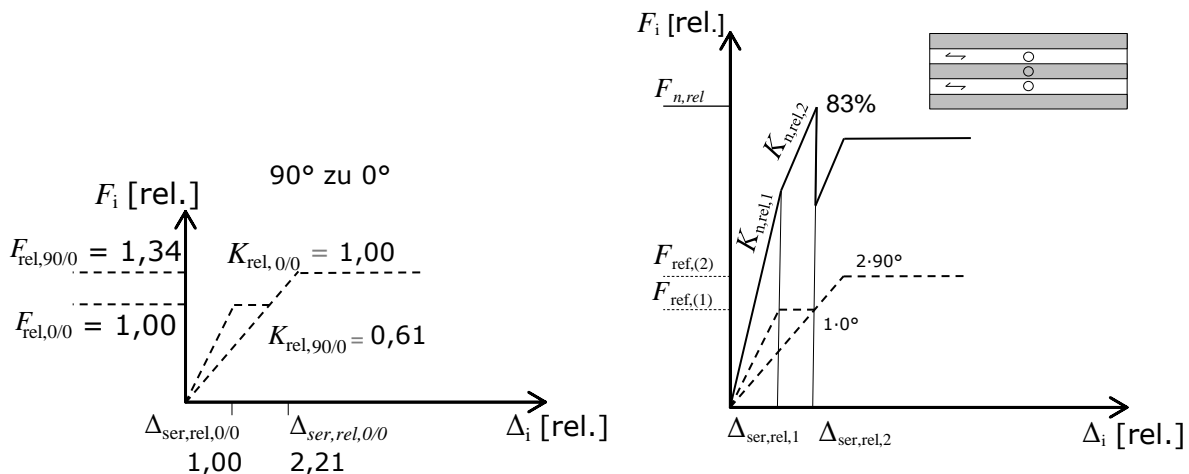


Abbildung 4: Kennlinie einer Schraube mit $\alpha = 90$ relativ zu einer Schraube mit $\alpha = 0$ (links) Ermittlung der relativen Tragfähigkeit einer Schraubengruppe (rechts)

Modell 2: Vereinfachtes Modell

Dieses Modell schätzt die Tragfähigkeit der Gruppe allein durch Summenbildung der Tragfähigkeiten der beteiligten Einzelschrauben, unter Berücksichtigung ihres jeweiligen Last-Faserwinkels, ab, siehe Formel (3). Somit werden Lastverteilungen, bedingt durch die in der Realität gegebenen streuenden Steifigkeit der Schrauben, sowie Lastumlagerungen nach Erreichen der Tragfähigkeit einzelner Schrauben, nicht berücksichtigt.

$$F_{mod2,n} = \sum_{i=1}^R F_{ref,i} \cdot n_i, \text{ in [kN]} \quad (3)$$

In Formel (3) ist R die Anzahl der Schraubenreihen, n_i die Anzahl der Schrauben je Reihe $i = 1, \dots, R$ und $F_{ref,i}$ die Tragfähigkeit der Einzelschrauben in dieser Reihe. Die Ergebnisse werden nachfolgend in Kapitel 3 den Prüfdaten gegenübergestellt.

3. Ergebnisse und Diskussion

Dieses Kapitel beinhaltet eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus [8], welche in Bezug auf Anwendungen von Schraubengruppen aufgebaut aus Einzelschrauben mit unterschiedlichen Last-Faserwinkeln eine eingehende Betrachtung erfordern. In Tabelle 4 sind die Mittelwerte der Gruppentragfähigkeiten sämtlicher geprüfter Schraubengruppen zusammenfassend dargestellt. Um klar vom Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung α abzugrenzen, wird der Winkel zwischen der Schraubenachse der Gruppe und der Faserrichtung der Decklage in untenstehender Tabelle als Winkel β dargestellt. Die Spalte „Position“ gibt an, in welche Lagen die jeweiligen Schraubenreihen in der Schmalseite appliziert wurden. „D“ steht für die Decklage, „M“ für die Mittellage „Q“ für die Querlage und „Z“ für die Zwischenlage. Aus der Positionsbezeichnung kann sogleich geschlossen werden, wie viele Schraubenreihen eine Konfiguration enthält.

Tabelle 4: Mittelwerte der Ausziehfestigkeit pro Schraube nach Position, Winkel β und Abständen

β [°]	Position	$a_{2,s}$	$a_{1,p}$						
			einreihig	2,5 d	5 d	7 d	7,5 d	10 d	
0°	DD	5 d	6,98	-	-	-	-	-	
	M	-	-	-	9,93	-	12,0	11,8	
	QM	2,5 d	10,4	-	-	-	-	10,08	
		5 d	9,20	-	9,57	-	-	-	
	QQ	5 d	11,1	-	11,0	11,2	-	-	
		2,5 d	8,56	-	-	-	-	-	
	ZM	5 d	8,57	-	-	-	-	-	
		5 d	10,4	-	-	-	-	-	
	45°	M	-	-	9,27	10,9	-	-	11,1
		QM	2,5 d	11,1	-	10,3	-	-	-
5 d			10,3	-	10,8	-	-	-	
QQ		5 d	10,6	-	9,70	-	-	-	
		Z	-	-	10,6	-	10,4	-	
ZM		2,5 d	10,7	-	-	-	-	-	
		5 d	10,7	-	-	-	-	-	
		7,5 d	-	-	10,6	-	-	-	
ZZ		10 d	10,8	-	-	-	-	-	
		5 d	-	-	10,4	11,4	-	-	
90°	DD	5d	10,1	-	-	-	-	-	
	M	-	-	7,79	7,82	-	-	8,48	
	QM	2,5 d	8,71	-	8,51	-	-	-	
		5 d	8,60	-	8,56	-	-	-	
	QQ	5 d	7,76	-	7,60	-	-	-	
		Z	-	-	8,95	-	9,65	-	
	ZM	2,5 d	9,59	-	-	-	-	-	
		5 d	10,2	-	-	-	-	-	
		7,5 d	-	-	8,93	-	-	-	
		10 d	8,80	-	-	-	-	-	
ZZ	5 d	8,72	-	8,90	9,59	-	-		

3.1. Einfluss der Abstände auf die Tragfähigkeit

Abstand $a_{1,p}$

Zur Ermittlung des im gegebenen Prüfrasters mindestens notwendigen Abstandes $a_{1,p}$ unter der Bedingung das $n_{ef} = n$, wurden Zweier- und Dreiergruppen bei einreihiger Anordnung geprüft. Die Ergebnisse sind der Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Mindestabstände für $a_{1,p}$

α [°]	Mindestwert für $a_{1,p}$
0°	2,5 d
45°	5 d
90°	7 d
0° 90°	5 d
45° 45°	5 d

Um einen Vergleich mit aktuellen Regelungen anzustellen, müssen die ermittelten Mindestabstände separat nach Winkelanordnung verglichen werden. Aufgrund der in den einschlägigen Normen [11] und [12] sowie in der Literatur, u.a. [15] verwendeten Definition von a_1 als Abstand in einer Ebene parallel zur Faserrichtung, und a_2 als Abstand in einer Ebene senkrecht zur Faserrichtung, muss der Abstand $a_{1,p}$ für Anordnungen mit einem Winkel $\alpha = 0^\circ$ mit den Werten für a_2 aus der Literatur verglichen werden. Tabelle 6 und Tabelle 7 zeigen einen Vergleich zwischen den ermittelten Mindestabständen und jenen der Literatur.

Tabelle 6: Vergleich der Mindestabstände $a_{1,p}$ für $\alpha = 90^\circ$ mit der Literatur

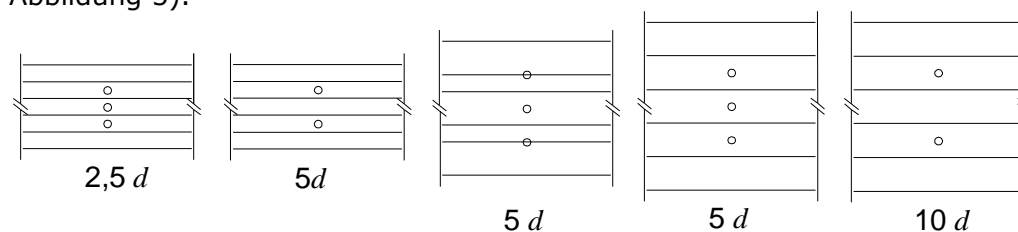
Quelle	Bezeichnung	Material	Wert
durchgeführte Prüfungen	$a_{1,p} \alpha = 90^\circ$	BSP	7 d
Blaß und Uibel (2007) [1]	a_1	BSP	10 d
Plieschounig (2010) [15]	a_1	VH	7 d
ÖNORM EN 1995-1-1:2009 [11]	a_1	VH/BSH	7 d
SIA 265:2012[12]	a_1	VH/BSH	7 d

Tabelle 7: Vergleich der Mindestabstände $a_{1,p}$ für $\alpha = 0^\circ$ mit der Literatur

Quelle	Bezeichnung	Bezugsmaterial	Wert
durchgeführte Prüfungen	$a_{1,p} \alpha = 0^\circ$	BSP	2,5 d
Blaß und Uibel (2007) [1]	a_2	BSP	3,5 d
ÖNORM EN 1995-1-1:2009 [11]	a_2	VH/BSH	5 d
SIA 265:2012[12]	a_2	VH/BSH	5 d

Abstand $a_{2,s}$

Die Ermittlung der Mindestabstände für $a_{2,s}$ (senkrecht zur Scheibenebene) erfolgte analog zum Abstand $a_{1,p}$. Ebenfalls wurden Zweier- und Dreiergruppen geprüft. Dabei wurden die Schrauben einerseits in Lagen gleicher Orientierung, in Lagen unterschiedlicher Orientierung und zwischen Lagen unterschiedlicher Orientierung eingeschraubt (siehe Abbildung 5).

Abbildung 5: Anordnungen zur Prüfung des Abstandes $a_{2,s}$

Ab einem Abstand von $a_{2,s} \geq 5 d$ wird keine Reduktion der Gruppentragfähigkeit beobachtet. Aufgrund der BSP-Aufbauten konnte allerdings auch kein Abstand geringer als 5 d geprüft werden, wobei solche bei dem gewählten Schraubendurchmesser wohl auch in der Praxis selten anzutreffen sein werden. Die Ergebnisse an Einzelreihen zeigen, dass der Mindestabstand $a_{2,s}$ nur erforderlich ist, wenn sich die Schrauben in derselben Brettlage befinden. Sobald Schrauben in unterschiedlichen Lagen appliziert sind, ist keine Wechselwirkung zu beobachten. Es ist anzunehmen, dass der Abstand $a_{2,s,r}$ wie auch $a_{1,p,r}$ für Gruppen von

Schrauben in derselben Brettlage winkelabhängig ist. Für Schrauben in Lagen gleicher Faserrichtung wird empfohlen denselben Mindestabstand für $a_{2,s}$ wie für $a_{1,p}$ einzuhalten. Sobald Schrauben in Lagen unterschiedlicher Faserrichtung eingeschraubt werden, gilt der Abstand $a_{2,s} = 2,5 d$ als ausreichend.

3.2. Interaktion zwischen Abstand $a_{1,p}$ und Winkel β

Wie bereits beschrieben, ist der Mindestabstand $a_{1,p}$ abhängig vom Last-Faserwinkel α . Tabelle 8 beinhaltet Mittelwerte der Prüfungen an Gruppen mit ein bis zwei Schraubenreihen mit je drei Schrauben. Gruppen mit einem Winkel β von 0° und 90° enthalten Schrauben mit einem Winkel $\alpha = 0^\circ$ & 90° . Für Schrauben mit einem Winkel $\alpha = 90^\circ$ ist der Mindestabstand $a_{1,p}$ ist mit $7 d$ definiert. Daher wurden bei Schraubengruppen mit einem Abstand von $a_{1,p} = 5 d$ die Schrauben in der Lage mit $\alpha = 90^\circ$ mit zu kleinem Abstand appliziert. Tabelle 8 stellt den gemessenen Wirkungsgrades η_2 der Anzahl Schrauben n_{ar} bei welchen der Mindestabstand nicht eingehalten wurde, gegenüber.

Tabelle 8: Wirkungsgrad η_2 und Anzahl Schrauben mit nicht eingehaltenem Mindestabstand n_{ar} in Gruppen mit in Querlagen und Mittellagen eingeschraubten Schrauben

β [°]		Einreihig	$a_{1,p}$ 5 d	10 d	Prüfanordnung
0°	n_{ar}	0	4	0	
	η_2	1,03	0,96	1,05	
	$F_{max,1,mean}$ [kN]	9,74	9,07	9,95	
45°	n_{ar}	0	0	-	
	η_2	0,99	1,00	-	
	$F_{max,1,mean}$ [kN]	10,42	10,48	-	
90°	n_{ar}	0	2	-	
	η_2	1,03	1,02	-	
	$F_{max,1,mean}$ [kN]	8,66	8,56	-	

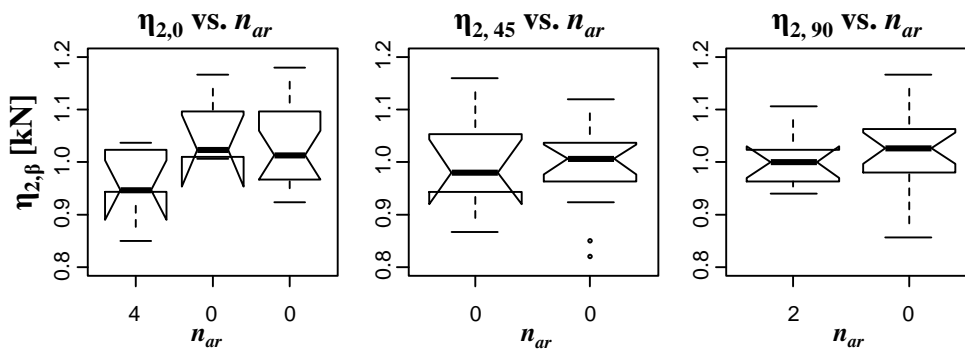


Abbildung 6: Box-Plots zur Bewertung des Wirkungsgrades η_2 in Abhängigkeit der Anzahl Schrauben mit nicht eingehaltenem Mindestabstand n_{ar} und des Winkels β : Schrauben in Quer- und Mittellage

Abbildung 6 zeigt einen Vergleich der Wirkungsgrade η_2 , nach Modell 2, abhängig von der Anzahl Schrauben, n_{ar} , bei denen der Mindestabstand für $a_{1,p}$ unterschritten wurde. Der Wirkungsgrad η_2 ist definiert als Verhältnis der abgeschätzten zur gemessenen maximalen Traglast der Schraubengruppe. Dabei konnte beobachtet werden, dass erst ab vier von sechs Schrauben, welche den Mindestabstand $a_{1,p}$ nicht einhalten, eine signifikante Abnahme des Wirkungsgrades η_2 eintritt. Bei zwei von sechs Schrauben konnte keine signifikante Reduktion von η_2 festgestellt werden.

3.3. Einfluss der Gruppengröße auf die Tragfähigkeit

Da im Rahmen des hier angewendeten dynamischen Prüfkonzeptes zur Ermittlung der Mindestabstände die Prämisse $n_{ef} = n$ galt, kann bei den entsprechenden Schraubengruppen unter Einhaltung der Mindestabstände kein Einfluss der Anzahl Schrauben auf die mittlere Tragfähigkeit der axial beanspruchten und auf Herausziehen versagten Schraubengruppen festgestellt werden. Da die hier festgestellten Mindestabstände z. T. sehr gut mit bestehenden Regelungen für Vollholz (VH), Brettschichtholz (BSH) und Brettsperrholz (BSP) übereinstimmen, wird im Folgenden eine Gegenüberstellung der für diese Produkte gegebenen Regelungen betreffend n_{ef} getätigt, siehe Tabelle 9. Für VH kann dahingehend u. a. die Arbeit von [15] herangezogen werden. Zudem finden sich Aussagen zu n_{ef} für VH und BSH in den Normen [11] und [12]. Eine Bemessung primär axial beanspruchter Schraubengruppen in der BSP-Schmalfläche nach diesen Normen, welche Regelungen für VH und BSH angeben, führt bei Berücksichtigung derselben Mindestabstände zu einer konservativen Abschätzung der Tragfähigkeit. In Tabelle 9 ist zudem ersichtlich, dass einzig das Modell 2 aus [15] vergleichbare Ergebnisse zu den hier festgestellten Beobachtungen liefert. Jedoch muss festgehalten werden, dass die Prüfungen in [15] mit durchgehender Lagerung der Holzoberfläche durchgeführt wurden. Die Lagerungsbedingungen der dieser Arbeit zu Grunde liegenden Prüfungen ließen eine Verformung der Holzoberfläche zu. Dies entspricht den Bedingungen der Prüfungen, welche dem Modell 1 aus [15] zu Grunde liegen. Es ist zudem anzumerken, dass die Regelungen in den Normen sich auf das statistische Niveau des 5 %-Quantils beziehen. Die in dieser Arbeit bisher diskutierten Werte für n_{ef} sowie jene von [15] beziehen sich jedoch auf Mittelwerte und betrachten alleinig das Versagen auf Herausziehen. Da mit zunehmender Anzahl an parallel wirkenden Schrauben auch die Streuung in der Tragfähigkeit sinkt, ist auf dem Niveau des 5 %-Quantils sogar ein Anstieg mit zunehmendem n , also ein $n_{ef} \geq n$, beobachtbar.

Tabelle 9: Vergleich von n_{ef} mit der Literatur

Quelle	Bezeichnung	Bezugsmaterial	Beziehung
Plüss (2014)	n_{ef}	BSP	$n_{ef} = n$
Plieschounig (2010) [15] Modell 1 (freie Oberfläche)	n_{ef}	VH	$n_{ef} = n^{0,9}$
Plieschounig (2010) [15] Modell 2 (gesperrte Oberfläche)			$n_{ef} \approx n$
ÖNORM EN 1995-1-1:2009 [11]	n_{ef}	VH/BSH	$n_{ef} = n^{0,9}$
SIA 265:2012 [3]	n_{ef}	VH/BSH	$n_{ef} = n^{0,9}$

In [7] findet sich eine Regelung für BSP zur Berücksichtigung der in der Bemessung ansetzbaren Anzahl von Schrauben je Verbindung. Diese Regelung lässt sich jedoch nicht als Beziehung zwischen n_{ef} und n ausdrücken. Als Vergleich kann eine Achtergruppe von Schrauben mit einem Winkel von $\alpha = 45^\circ$ herbeigezogen werden. Der Auszieh Widerstand dieser Gruppe soll laut [7] als das Vierfache des Auszieh Widerstandes einer Einzelschraube mit $\alpha = 0^\circ$ angenommen werden. Dies entspricht einem Verhältnis von rund $n_{ef} \approx n / 3$. Man vergleiche: Unter Verwendung des gängigen Ansatzes $n_{ef} = n^{0,9}$ folgt für $n = 8 \rightarrow n_{ef} \approx n / 1,23$. Folglich gilt die Methode in [7] als sehr konservativ.

3.4. Modellvergleich

Abbildung 7 zeigt einen Vergleich der beiden in Abschnitt 0 vorgestellten Modelle. Dabei zeigt sich, dass das Modell 2 die Prüfergebnisse besser abbildet als das mechanisch begründete Modell 1 und dies obwohl es sich um ein vereinfachtes Summenmodell handelt. Dies kann unter anderem auf das in Modell 1 angesetzte idealisierte Tragverhalten der Einzelschrauben zurückgeführt werden. Der verwendete Ansatz geht von einem starrplastischen Verhalten bis zu einer plastischen Streckgrenze aus nach welcher eine real vorhandene Resttragfähigkeit vernachlässigt wird.

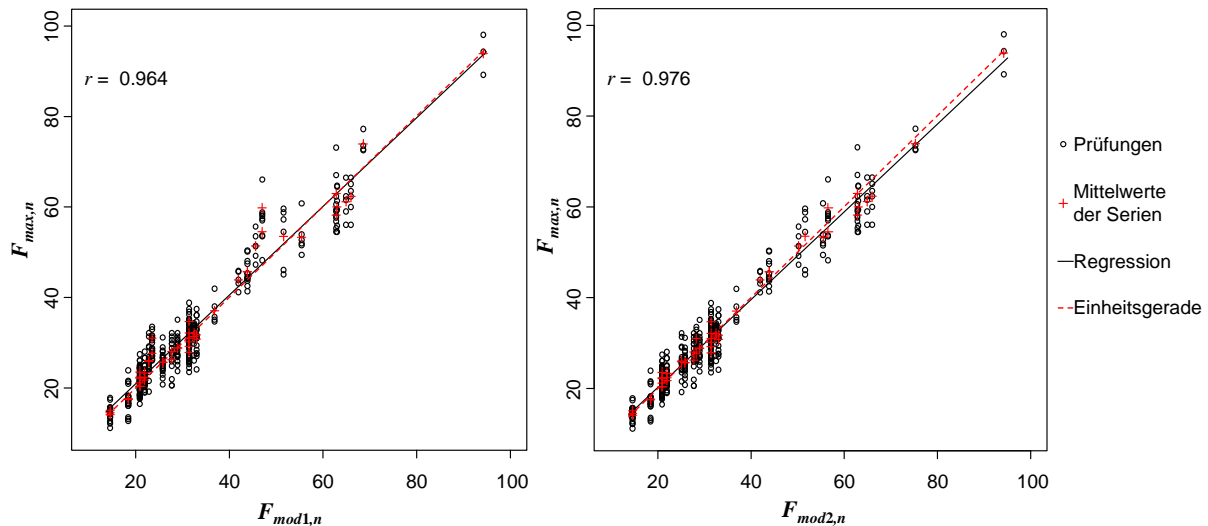


Abbildung 7: Vergleich der Modelle 1 (links) und Modell 2 (rechts) mit den Prüfergebnissen

Abbildung 4 zeigt zudem, dass nach Erreichen der Maximallast eine, vereinfacht betrachtet, lineare Entfestigung auftritt.

Das vereinfachte Modell 2 ist in der Lage insbesondere die Gruppentragfähigkeit von kleineren Schraubengruppen gut abzuschätzen; erwartungsgemäß sinkt die Vorhersagekraft, aufgrund des vereinfachten Modellansatzes, mit der Anzahl der interagierenden Schrauben in der Gruppe. Hierbei kommt es zu einer geringfügigen Überschätzung der beobachteten Traglast, was allerdings auf die kleineren Abstände der Einzelschrauben in grösseren Schraubengruppen zurückzuführen ist.

4. Zusammenfassung und Ausblick

4.1. Zusammenfassung

In Tabelle 10 werden die im Rahmen der getätigten Prüfungen beobachteten Einflüsse auf die Tragfähigkeit von axial beanspruchten und auf Herausziehen versagten Schraubengruppen in der BSP-Schmalfläche zusammenfassend dargelegt.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Einflüsse auf die Tragfähigkeit, bezogen auf die untersuchten Parameter

Parameter	Erkenntnis
Abstand zwischen den Schrauben parallel zur Scheibenebene ($a_{1,p}$)	kein Einfluss bei Einhaltung der entsprechenden Mindestabstände nach
Abstand zwischen den Schrauben senkrecht zur Scheibenebene ($a_{2,s}$)	kein Einfluss bei Einhaltung der Mindestabstände von $a_{1,p}$ oder wenn sich die Schrauben in unterschiedlichen Brettlagen befinden
Kombination verschiedener Werte für den Winkel α	kein Einfluss

Abstand

Die ermittelten Mindestabstände für Schrauben, die in derselben Brettlage eingeschraubt wurden, stimmen mit denjenigen in den einschlägigen Normen [11], [12] und den in der Literatur (u.a. [15]) angegebenen Werte für VH und BSH überein.

Zwischen den einzelnen Lagen konnte eine Sperrwirkung festgestellt werden. Diese führt dazu, dass unabhängig vom Winkel α ein Abstand von $2,5 d$ ausreicht, um als Ausziehtragfähigkeit der Schraubengruppe die Summe der Ausziehtragfähigkeiten der verwendeten Einzelschrauben anzunehmen.

Bei Kombination von Schrauben in Lagen mit verschiedenen Winkeln α ist der kleinste Wert der Mindestabstände in den einzelnen Lagen maßgebend. Es konnte ein geringer Einfluss auf den Medianwert der Ausziehtragfähigkeit der Anzahl Schrauben, die den Mindestabstand unterschritten, erfasst werden. Die Anzahl durchgeführter Prüfungen erlaubt jedoch keine quantitative Beschreibung dieses Phänomens.

Kombination verschiedener Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung

Bei Einhaltung der ermittelten Mindestabstände entspricht die Tragfähigkeit von Schraubengruppen der Summe aller Tragfähigkeiten der Einzelschrauben, welche durch Referenzprüfungen ermittelt wurden. Die Kombination von Schrauben mit verschiedenen Winkeln α zeigt bezüglich des Medianwertes keinen signifikanten Einfluss auf die Tragfähigkeit von Schrauben in der BSP-Schmalfläche.

Anzahl Schrauben pro Schraubengruppe

Die Anzahl Schrauben pro Schraubengruppe hat keinen signifikanten Einfluss auf den Medianwert der Ausziehtragfähigkeit.

Werden die Bemessungsverfahren für Schraubengruppen in VH und BSH aus den einschlägigen Normen [11] und [12] auf Schraubengruppen in der BSP-Schmalfläche angewendet, führt dies unter Einhaltung der Mindestabstände zu einer konservativen Abschätzung der Tragfähigkeit. Das in [7] angegebene Bemessungsverfahren führt zu einer Unterschätzung der Tragfähigkeit von über 50 % je nach Schraubenanzahl und Winkel α .

Empfehlungen zur Bildung von Schraubengruppen in der BSP-Schmalfläche

Aufgrund der Unterschiede bezüglich der Fugenbreite ($b_{fu} \geq 0 \geq 4$ (6) mm) der aktuell zugelassenen BSP-Produkte, wird in [6] und [7] empfohlen, Schrauben in gekreuzten Paaren mit einem Winkel $\alpha \geq 30^\circ$ anzuordnen. Dies ist vor allem dann notwendig, wenn Schrauben in BSP-Produkten ohne Schmalseitenverklebung, eingesetzt werden. Bei BSP-Produkten mit Schmalseitenverklebung und einer garantierten maximalen Fugenbreite ist diese Limitierung nach dem heutigen Kenntnisstand nicht notwendig.

Schrauben mit verschiedenen Winkeln α können innerhalb eines Verbinders kombiniert werden. Bei Einhaltung sämtlicher Mindestabstände kann die Tragfähigkeit als Summe der Tragfähigkeiten angenommen werden. Werden diese nicht eingehalten, ist die Tragfähigkeit entsprechend abzumindern.

Es ist auch die Anwendung von Einzelschrauben in den Zwischenlagen möglich. Da jedoch bei Applikation ohne Vorbohren keine exakt mittige Position gewährleistet werden kann, wird empfohlen, den geringeren Wert der Tragfähigkeit der beiden Einzellagen für die Bemessung anzunehmen.

4.2. Ausblick

Aufgrund der großen Unterschiede zwischen den auf dem Markt verfügbaren BSP-Produkten sind die Ergebnisse dieser Arbeit nicht allgemein gültig. Bei BSP-Produkten ohne Schmalseitenverklebung ist damit zu rechnen, dass durch das Einbringen einzelner Schrauben in Fugen mit einer Fugenbreite $b_{fu} \geq 0$ mm, erhebliche Unterschiede in Bezug auf die Tragfähigkeit auftreten können. Zudem darf laut den aktuell gültigen Zulassungen zu einem bestimmten Anteil Brettware einer geringeren als der nach [10] deklarierten Festigkeitsklasse in den Querlagen verwendet werden. Aus räumlichen Überlegungen sind die Querlagen besonders interessant für die Applikation von Schrauben in der Schmalfläche. Der Einfluss eines heterogenen Materials innerhalb einer Lage, heterogen im Sinne der Festigkeitsklassen, auf die Tragfähigkeit von Schraubengruppen ist daher zu berücksichtigen.

Da das Langzeittragverhalten von primär axial auf Herausziehen beanspruchten Schrauben mit $\alpha = 0^\circ$ noch nicht abschließend untersucht wurde, lassen sich die Erkenntnisse dieser Arbeit nur bedingt für dauerhaft beanspruchte Verbindungen anwenden. Eine dahingehende Ausweitung des Kenntnisstandes ist erforderlich.

Die weitere Standardisierung einzelner Produktparameter, wie (i) Einschränkung der zulässigen Fugenbreiten, (ii) einheitliche Regelungen und Homogenisierung der verwendeten Festigkeitsklassen, (iii) u.a. in naher Zukunft ist wünschenswert und notwendig um die Holz-Massivbauweise in BSP weiter voran zu treiben und ihre Wettbewerbsfähigkeit gegenüber anderen (mineralischen) Baustoffen, insbesondere in Hinblick auf eine standardisierte, systematische Verbindungstechnik, zu sichern.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Blaß HJ und Uibel T (2007) Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsperrholz. Bd. 8 der Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, ISBN: 978-3-86644-129-3
- [2] Reichelt B (2012) Einfluss der Sperrwirkung auf den Auszieh Widerstand selbstbohrender Holzschrauben. Masterarbeit: Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, M-4-01/2012, pp.162
- [3] Ringhofer et al. (2013) Prüftechnische Ermittlung des Tragverhaltens der Einzelschraube in der BSP-Schmalfläche. Forschungsbericht: holz.bauforschungsgmbh, Technische Universität Graz, Graz pp. 34
- [4] Mahlknecht U (2011) Untersuchung von rechtwinklig zur Faser eingebrachten, axial beanspruchten Schraubengruppen in Vollholz und Brettsperrholz. Masterarbeit: Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, Graz, M-4-8/2011 pp.109
- [5] Grabner M (2013) Einflussparameter auf den Auszieh Widerstand selbstbohrender Holzschrauben in BSP-Schmalflächen. Masterarbeit: Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, Graz, M-4-05/2013 pp. 148
- [6] Schickhofer G, Bogensperger T und Moosbrugger T (2010), BSP handbuch; Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz; Nachweise auf Basis des Europäischen Normenkonzepts. Verlag der Technischen Universität Graz, Graz, ISBN 978-3-85125-109-8
- [7] Wallner-Novak M, Koppelhuber J und Pock K (2013) Brettsperrholz Bemessung. proHolz Austria, Wien, ISBN 978-3-902320-96-4
- [8] Plüss Y (2014) Prüftechnische Ermittlung des Tragverhaltens von Schraubengruppen in der BSP-Schmalfläche. Masterarbeit: Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, Graz, M-4-1/2014 pp.112
- [9] Krenn H (2009) Selbstbohrende Holzschrauben in hoch beanspruchten Bereichen. Forschungsbericht, holz.bauforschungsgmbh, Technische Universität Graz, Graz
- [10] ÖNORM EN 338:2009 Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- [11] ÖNORM EN 1995-1-1:2009 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- [12] SIA 265:2012 Holzbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, SN 505265:2012 de
- [13] ETA-11/190 (2011) Europäische Technische Zulassung, Selbstbohrende Schrauben als Holzverbindungsmittel. Adolf Würth GmbH, [gültig bis 05. September 2016]
- [14] ÖNORM EN 26891:1991 Holzbauwerke – Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln – Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- [15] Plieschounig S (2010) Ausziehverhalten axial beanspruchter Schraubengruppen. Masterarbeit: Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, Graz, M-4-11/2010, pp. 100