

Einfluss der Anzahl und Orientierung der Schichten auf das Ausziehtragverhalten selbstbohrender Holzschrauben in Brettsperrholz

Influence of the number and orientation of layers on the pull-out behavior of self-tapping wood screws in cross-laminated timber

L'influence du nombre et de l'orientation des couches de panneaux lamellé-croisés sur la résistance à l'arrachement de vis à bois autoforeuses

Andreas Ringhofer
DI
Institut für Holzbau und
Holztechnologie, TU Graz
AT-Graz



Reinhard Brandner
DI(FH), Dr.techn.
Institut für Holzbau und
Holztechnologie, TU Graz
Kompetenzzentrum
holz.bau forschungs gmbh
AT-Graz



Einfluss der Anzahl und Orientierung der Schichten auf das Ausziehtragverhalten selbstbohrender Holzschrauben in Brettsperrholz

1. Einleitung

Selbstbohrende Holzschrauben, als stiftförmige Verbindungsmittel mit hohem Tragvermögen unter axialer Beanspruchung, sind aus dem modernen Ingenieurholzbau nicht mehr wegzudenken. Aufgrund der einfachen Montage und der steten Weiterentwicklung in den letzten Jahren reicht ihr Einsatzbereich von konstruktiven Anschlüssen in Sekundärkonstruktionen bis hin zu Zugstößen in Fachwerksystemen mit einem Beanspruchungspotenzial im MN-Bereich. Neben diesen typischen Anwendungsformen zur Fügung von stabförmigen, eindimensionalen Bauteilen (meist Brettchichtholz), kommen Holzschrauben in letzter Zeit im mehrgeschossigen Holzbau in der Holz-Massivbauweise mit Brettsperrholz verstärkt zum Einsatz.

Ob stabförmig-geschichtet (Brettchichtholz, BSH) oder flächenförmig-gesperrt-geschichtet (Brettsperrholz, BSP), das Ausgangsmaterial für diese Holzwerkstoffe ist in beiden Fällen das Einzelbrett. Diesem hierarchischen Prinzip folgend, wird im Rahmen dieses Beitrages, auf Basis weitgehend bekannter Kennwerte für Vollholz (entspricht der Einzelschicht), der Effekt der Schichtung bzw. der gesperrten Schichtung auf den Auszieh Widerstand selbstbohrender Holzschrauben untersucht und in einem Vorschlag für ein Berechnungsmodell für Holzschrauben in geschichteten Bauteilen, basierend auf dem Tragverhalten in der Einzelschicht, zusammengefasst.

2. Stand der Technik

Für die Anwendung von selbstbohrenden Holzschrauben in Vollholz und Brettchichtholz gibt es seit Beginn des 21. Jahrhunderts umfangreiche Arbeiten (v.a. im deutschsprachigen Raum), welche vor allem die Untersuchung des Tragverhaltens unter axialer Beanspruchung beinhalten. Als Resultat dieser Forschungstätigkeiten ist in der europäischen Norm für die Bemessung und Konstruktion für Holzbauten, der EN 1995-1-1 [1] die Berechnung der Ausziehfestigkeit (welche in weiterer Folge zum Auszieh Widerstand führt) von selbstbohrenden Holzschrauben wie folgt geregelt:

$$f_{ax,k} = 0,52 \cdot d^{-0,5} \cdot l_{ef}^{-0,1} \cdot \rho_k^{0,8},$$

mit

d als Außendurchmesser des Gewindes,
 l_{ef} als Eindringtiefe des Gewindeteils und
 ρ_k als charakteristischer Wert der Rohdichte,

welcher für die Anwendung in Vollholz der EN 338 [2] und für die Anwendung in Brettchichtholz der EN 1194 [3] entnommen werden kann. Wie aus dem oben angeführten Ausdruck hervor geht, wird bei der Ermittlung der Ausziehfestigkeit einzig durch die Wahl des Parameters „Rohdichte“ unterschieden, ob es sich bei dem zu Grunde liegenden Material um Vollholz oder Brettchichtholz handelt. Bei Vergleich von Vollholz mit einer Festigkeitsklasse von C24 (diese wird für den Aufbau von GL24h verwendet) und Brettchichtholz mit einer Festigkeitsklasse von GL24h ergibt sich folgendes Verhältnis der Ausziehfestigkeiten:

$$\frac{f_{ax, GL24h}}{f_{ax, C24}} = \left(\frac{\rho_{k, GL24h}}{\rho_{k, C24}} \right)^{0,8} = \left(\frac{380}{350} \right)^{0,8} = 1,07.$$

Aus dieser Betrachtung geht hervor, dass bei Anwendung der o.a. Gleichung der Auszieh Widerstand von selbstbohrenden Holzschrauben in Brettchichtholz um rund 7% höher als jener von Vollholz ermittelt wird. An dieser Stelle ist anzumerken, dass bei der Ermittlung der Ausziehfestigkeit der Schrauben in Brettchichtholz nicht unterschieden wird, ob die Schraube radial zur Lage der Jahrringe durch mehrere Schichten oder tangential zur Jahrringlage in nur eine Schicht appliziert wird.

Die Anwendung dieser Gleichung für die Ermittlung des Auszieh Widerstandes in den Seitenflächen von Brettsperrholz ist hingegen prinzipiell nicht möglich, da Brettsperrholz als Holzwerkstoff in der EN 1995-1-1 [1] nicht angeführt ist. Über weitergehende Definitionen in den jeweiligen nationalen Anhängen dieser Norm und unter Anwendung der europäisch technischen Zulassungen (ETA) für Brettsperrholz und für Holzschrauben, kann jedoch eine Ermittlung des Auszieh Widerstandes von selbstbohrenden Holzschrauben in BSP gemäß EN 1995-1-1 [1] erfolgen, wie in Abbildung 1 dargestellt ist.

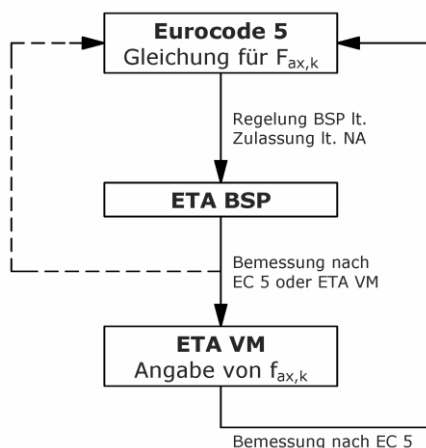


Abbildung 1: Ablauf der Ermittlung des Auszieh Widerstandes selbstbohrender Holzschrauben in BSP nach EN 1995-1-1, nach [9]

Das gezeigte Ablaufdiagramm gibt grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Ermittlung des Auszieh Widerstandes vor. Zum einen kann, wie in vielen Zulassungen für BSP angeführt, die zuvor dargestellte Gleichung der EN 1995-1-1 [1] angewendet werden. Dieser Pfad ist in Abbildung 1 strichliert dargestellt, da dafür eine charakteristische Rohdichte ρ_k von BSP bekannt sein müsste, welche jedoch aufgrund einer fehlenden normativen Regelung von Festigkeitsklassen derzeit nicht vorliegend ist. Der in Abbildung 1 empfohlene Pfad wäre die Ermittlung des Auszieh Widerstandes über die Regelungen in den Zulassungen für Holzschrauben, welche die Applikation dieser in den Seitenflächen von Brettsperrholz erlauben. Gemäß CUAP „Self-tapping screws for use in timber constructions“ [5] beinhalten diese bereits einen anzusetzenden charakteristischen Wert der Ausziehfestigkeit bzw. des Ausziehparameters, welcher auf eine charakteristische Rohdichte von 350 kg/m^3 (für C24) referenziert ist. Da eine Umrechnung mit dem Faktor $(\rho_k/350)^{0,8}$ auf einen höheren Wert aufgrund der fehlenden Regelung der Rohdichte von BSP nicht möglich ist, kann festgestellt werden, dass die Ermittlung der Ausziehtragfähigkeit von Holzschrauben in Brettsperrholz derzeit wie für Vollholz mit einer Festigkeitsklasse von C24 erfolgen soll.

Die Grundlage der Kennwerte (Ausziehfestigkeit, Mindestabstände) für Holzschrauben in Brettsperrholz in diesen Zulassungen bildet die Arbeit von Blaß & Uibel [12], welche u.a. das Tragverhalten von Holzschrauben in den Seitenflächen von 3- bzw. 5-schichten BSP-Aufbauten untersuchten. In [12] wird für die Ermittlung der Ausziehtragfähigkeit in den Seitenflächen von BSP von einer charakteristischen Rohdichte von 400 kg/m^3 ausgegangen, sofern die Einzelbretter eine Festigkeitsklasse von C24 ($\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$) aufweisen. Der Ansatz einer erhöhten Rohdichte (und somit einer erhöhten Ausziehfestigkeit der Schrauben) aufgrund der Homogenisierung des Materials zufolge der Schichtung der Einzelbretter ist ein Aspekt, der auch im Rahmen dieses Beitrages näher betrachtet und verifiziert wird.

3. Prüfprogramm

Sämtliche Prüfungen zur Ermittlung der Ausziehfestigkeit von selbstbohrenden Holzschrauben, welche die Grundlage für die weiteren Betrachtungen im Rahmen dieses Beitrages darstellen, wurden im Zuge einer Masterarbeit [9] am Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz durchgeführt.

3.1. Aufbau der Prüfkörper

Um den Effekt der Schichtung bzw. der gesperrten Schichtung auf den Ausziehwiderstand der Schraube feststellen zu können, wurden je drei BSH- bzw. BSP-Serien geprüft, welche bei einer konstanten Höhe von 120 mm drei unterschiedliche Schichtanzahlen (n) bzw. drei unterschiedliche Schichtstärken (t) aufweisen. Ausgangsmaterial waren für alle Serien Einzelbretter der Holzart Fichte (*Picea abies*) der Sortierklasse L25.

Abbildung 2 gibt den Aufbau der Prüfkörper wieder.

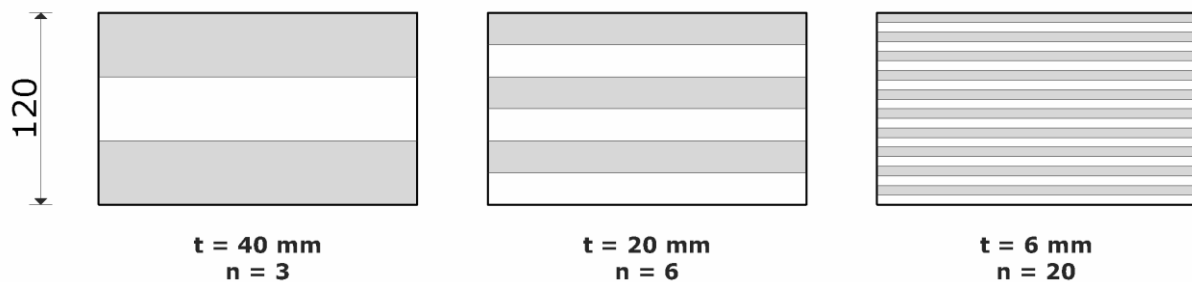


Abbildung 2: Aufbau der BSH- und BSP-Prüfkörper, nach [9]

Aufgrund einer ungleichen Verteilung der Rohdichten der einzelnen Brettabschnitte ($b \times l = 200 \times 200$ mm), wurde, wie in Abbildung 3 darstellt, vor der Fertigung der Probekörper eine Aufteilung in zwei Rohdichtegruppen (1G|2G) durchgeführt.

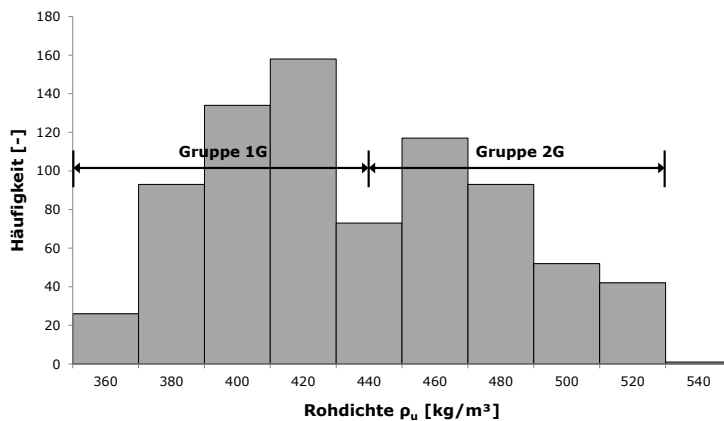


Abbildung 3: Verteilung der Rohdichte der Brettabschnitte und Aufteilung in Rohdichtegruppen, nach [9]

3.2. Verwendete Holzschrauben und Applikation

Zur Anwendung kamen zwei Schraubentypen mit Nenndurchmessern von 8 und 12 mm, deren Parameter in Tabelle 1 aufgelistet sind. Wie in Abbildung 4 gezeigt ist, wurden die Schrauben über die gesamte Prüfkörperhöhe (90° zur Faserrichtung, radial zur Jahrringlage) durchgeschraubt. Um den Effekt der (Mikro-)Rissbildung des Prüfkörpers in Faserrichtung beim Eindrehen der Schraube zu minimieren, wurde bei beiden Durchmessern vorgebohrt (VB). Ergänzend dazu wurde pro Prüfkörper eine dritte Prüfung mit einer Schraube (Durchmesser 8 mm) „nicht vorgebohrt“ durchgeführt.

Tabelle 1: Auswahl an Parametern der verwendeten Holzschrauben, aus [6] bzw. [7]

Schraube	Star-Drive	SPAX-S
Hersteller	Schmid Schrauben Hainfeld GmbH	SPAX International GmbH & Co. KG
Zulassung	Z-9.1-435 [6]	Z-9.1-519 [7]
Nenn Durchmesser d_1	8,0	12,0
Kerndurchmesser d_2	5,3	7,5
Durchmesser Vorbohrung d_{VB}	5,0	7,0
Länge L	400	300
Eindrehlänge l_{ef}	120	
Gewinde	Vollgewinde	

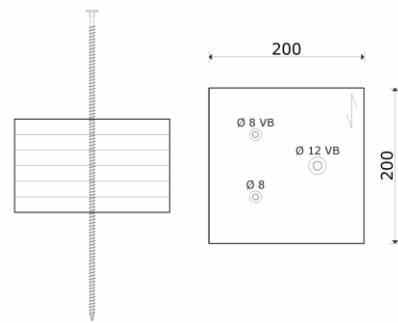


Abbildung 4: Anordnung der Schrauben im Prüfkörper, nach [9]

3.3. Durchführung der Prüfungen

Für die beiden vorliegenden Aufbauvarianten (BSH|BSP) mit je drei unterschiedlichen Schichtanzahlen bzw. -stärken (3/40|6/20|20/6) und drei Einschraubvarianten pro Prüfkörper ($\text{Ø } 8 \text{ VB}|\text{Ø } 8|\text{Ø } 12 \text{ VB}$) resultierten insgesamt 18 unterschiedliche Prüfserien. Mit 48 Prüfungen je Serie waren im Rahmen dieser Untersuchungen 864 Prüfungen vorgesehen. Da es im Zuge der Durchführung für sinnvoll erachtet wurde, eine zusätzliche Betrachtung in Vollholz (Einzelschicht als Referenz) für die Schraube mit dem Nenn Durchmesser von 8 mm umzusetzen, erweiterte sich dieser Umfang nachträglich um 2×48 Prüfungen auf insgesamt 960 Prüfungen. Für diese Prüfungen in Vollholz wurde die Mittelschicht der bereits geprüften 3-schichtigen BSH-Prüfkörper verwendet, nachdem diese auf die erforderliche Höhe von 120 mm zugeschnitten worden sind. Die Ausziehprüfung erfolgte in diesem Fall allerdings tangential zur Lage der Jahrringe. Sämtliche Prüfungen wurden nach erfolgter Klimatisierung der Probekörper bis zur Massekonstanz (relative Luftfeuchte von $65 \pm 5\%$ und 21°C), gemäß ÖNORM EN 1382 [4] auf dem Prüfgerüst „Lignum-Uni-275“ durchgeführt (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6).



Abbildung 5: Haltevorrichtung



Abbildung 6: Prüfgerüst „Lignum-Uni-275“

An dieser Stelle ist anzumerken, dass von der Mindestholzdicke (Einbindelänge der Schraube + $5d$) gemäß ÖNORM EN 1382 [4] abgewichen worden ist, da sämtliche Schrauben durchgeschraubt wurden (siehe Abbildung 4).

Nach erfolgter Prüfung der Ausziehtragfähigkeit wurden aus den Probekörpern Kleinproben mit einer Abmessung von $4d \cdot 4d \cdot l_{ef}$ geschnitten, anhand dieser in weiterer Folge die Holzfeuchte und die Rohdichte (Normalrohddichte ρ_u und Rohdichte bei einer Holzfeuchte von 12%, ρ_{12}) bestimmt worden sind.

4. Auswertung

4.1. Bereinigung der Daten

Extremwerte der Rohdichte und der maximal erreichten Prüfkraft F_{max} wurden hinsichtlich ihrer Lage zum Median ihrer jeweiligen Serie überprüft und dann aussortiert, wenn sie außerhalb des Median plus/minus des zweifachen Interquartil-Abstandes (IQR) zu liegen kamen. Jene Werte, welche außerhalb des 1,5-fachen Interquartil-Abstandes lagen, wurden auf etwaige Holzmerkmale, wie etwa Äste kontrolliert. Dadurch wurden insgesamt 17 Datensätze ausgeschlossen.

4.2. Holzfeuchte und Rohdichte

In Tabelle 2 sind die Mittelwerte, die 5%-Werte, die Variationskoeffizienten der Rohdichte (auf eine Holzfeuchte von 12% referenziert), sowie die Mittelwerte der gemessenen Holzfeuchte für die jeweiligen Aufbauvarianten (BSH|BSP) und Schichtfolgen (1/120|3/40|6/20|20/6) dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der mittlere Feuchtegehalt der Kleinproben zwischen 11,8% und 12,5% variierte.

Bei steigender Schichtanzahl ist, neben den sinkenden 5%-Werten der Rohdichte bzw. des Variationskoeffizienten, auch noch ein Anstieg des Mittelwertes der Rohdichte erkennbar. Abbildung 7 und Abbildung 8 stellen dies grafisch dar.

Tabelle 2: Mittelwerte und Variationskoeffizienten der Rohdichte der Kleinproben bei 12%-Holzfeuchte, nach [9]

n	ρ_{mean} [kg/m ³]			ρ_{05} [kg/m ³]			COV [%]			m.c. [%]	
	BSP	BSP	Δ	BSP	BSP	Δ	BSP	BSP	Δ	BSP	BSP
1	409	409	0,0%	346	346	0,0%	10,3	10,3	0,0	12,5	12,5
3	408	407	0,2%	360	363	-0,7%	9,10	9,12	-0,2%	12,5	12,4
6	412	411	0,3%	374	370	1,2%	8,44	8,23	2,5%	12,5	12,6
20	428	426	0,3%	391	391	0,1%	7,60	7,64	-0,5%	11,9	11,8

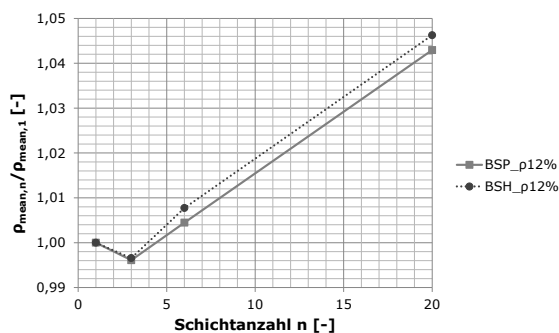


Abbildung 7: Verlauf des Mittelwertes der Rohdichte über die Schichtanzahl, nach [9]

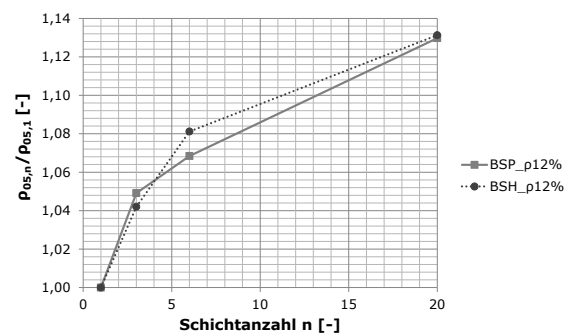


Abbildung 8: Verlauf des 5%-Wertes der Rohdichte über die Schichtanzahl, nach [9]

4.3. Korrektur der Rohdichte

Durch den schichtweisen Aufbau eines Holzwerkstoffes durch Einzelschichten mit einer bestimmten Festigkeits- bzw. Sortierklasse, sinkt der Variationskoeffizient der Rohdichte, was letztendlich eine Erhöhung **des 5%-Wertes** dieser bewirkt. Vorausgesetzt wird dabei, dass der Mittelwert konstant bleibt. Dies ist allgemein als „Homogenisierungseffekt“ bekannt und somit im Rahmen der Untersuchungen in [9] erwartet worden. Da durch eine gleichmäßige Zuordnung der einzelnen Brettabschnitte zu den unterschiedlichen Schichtaufbauten („matched sample“) von einer möglichst gleichen Verteilung der Rohdichte ausgegangen worden war, war die Ursache für den linearen (und bei beiden Aufbauvarianten gleichförmigen) Anstieg **des Mittelwertes** der Rohdichte um insg. 5% bei den 20-schichtigen Probekörpern noch zu ergründen. Durch die Vorgabe, bei steigender Schichtanzahl die Höhe des Probekörpers nicht zu verändern, erfolgte damit einhergehend eine Reduktion der jeweiligen Schichtstärke. Konstant über alle Aufbauten blieb

hingegen die Menge des Klebstoffes (Jowapur, siehe [8]) pro Klebefläche, welcher lt. [8] eine Trockendichte von 1150 kg/m^3 aufweist. Dies führt, bei einer angenommenen Fugendicke von $0,1 \text{ mm}$, zu einer zusätzlichen Masse von $0,115 \text{ kg/m}^2$ Klebefläche. Die Berücksichtigung dieses Effektes, der bei steigender Schichtanzahl bei gleichbleibendem Volumen die Masse und somit die Rohdichte linear erhöht, erfolgte in [9] mit der Gleichung

$$m_{\text{korr}} = m_{\text{KP}} - \Delta m_{(n-1)},$$

mit

m_{korr} als korrigierte Masse der Kleinprobe in [kg],

m_{KP} als Gesamtmasse der Kleinprobe (Messwert) in [kg] und

$\Delta m_{(n-1)}$ als Masse der Klebstoffugen in Abhängigkeit der Anzahl der Schichten in [kg].

Abbildung 9 und Abbildung 10 geben die nun korrigierten Verläufe der Rohdichte in Abhängigkeit der Schichtanzahl wieder.

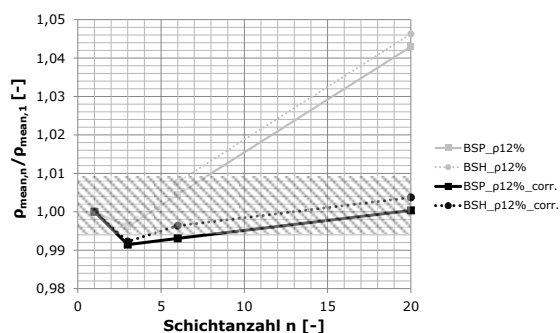


Abbildung 9: korrigierter Verlauf des Mittelwertes der Rohdichte über die Schichtanzahl, nach [9]

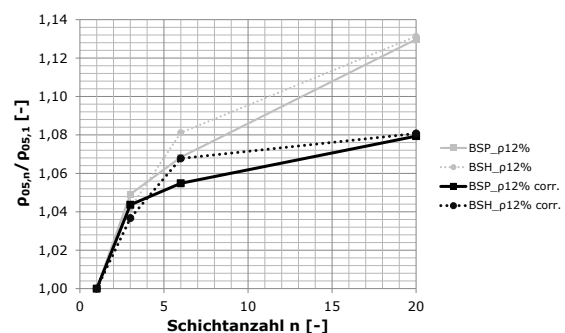


Abbildung 10: korrigierter Verlauf des 5%-Wertes der Rohdichte über die Schichtanzahl, nach [9]

Die Mittelwerte der Rohdichte der jeweiligen Aufbauten variieren nach dieser Korrektur um $\pm 1\%$ in Abhängigkeit der Schichtanzahl und passen mit der Annahme einer gleichmäßigen Aufteilung der Einzelschichten auf die unterschiedlichen Serien zusammen. In Abbildung 10 ist ebenfalls eine Reduktion des Anstiegs der 5%-Werte der Rohdichte bei steigender Schichtanzahl ersichtlich.

4.4. Vergleich der charakteristischen Werte der Rohdichte

Unter der Betrachtung eines Holzwerkstoffes aus n Einzelschichten mit Rohdichte X_1 , wobei vereinfacht angenommen wird, dass diese normalverteilt ist mit

$$X_1 \sim ND(\mu_{X_1}, \sigma_{X_1}^2) \text{ und } COV[X_1] = \frac{\sigma_{X_1}}{\mu_{X_1}},$$

so ist für die Rohdichte des Holzwerkstoffes, gegeben als Mittelwert jener der Einzelschichten, gemäß der Wahrscheinlichkeitstheorie ebenfalls eine Normalverteilung vorauszusetzen, wobei diese Beziehung wie folgt angeschrieben werden kann:

$$\bar{X} | n \sim ND\left(\mu_{X_1}, \frac{\sigma_{X_1}^2}{n}\right) \text{ und } COV[X_n] = \frac{\sigma_{X_n}}{\mu_{X_n}} = \frac{\sigma_{X_1}}{\mu_{X_1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}}.$$

Vergleichbares gilt gemäß dem zentralen Grenzwertsatz (asymptotisch mit $n \rightarrow \infty$) auch für andere Verteilungsfunktionen. Der 5%-Wert des geschichteten Holzwerkstoffes resultiert, unter der Voraussetzung von $\rho_{\text{mean},n} = \rho_{\text{mean},1}$, zu

$$q_{0,05,n} = \mu_{X_n} \cdot [1 - \Phi^{-1}(0,05) \cdot COV(X_n)] \rightarrow \rho_{0,05,n} = \rho_{\text{mean},1} \cdot \left[1 - 1,645 \cdot \frac{COV(X_1)}{\sqrt{n}}\right].$$

Dieses Prinzip findet in der ÖNORM EN 1194 [3] Anwendung, wo der charakteristische Wert der Rohdichte von Brettschichtholz mit der folgenden Gleichung bestimmt wird (Indizes wurden abgewandelt):

$$\rho_{\text{BSH},k} = 1,1 \cdot \rho_{\text{VH},k},$$

mit

$\rho_{\text{BSH},k}$ als charakteristischer Wert der Rohdichte von Brettschichtholz und
 $\rho_{\text{VH},k}$ als charakteristischer Wert der Rohdichte von Vollholz bzw. von der Einzelschicht.

Darüber hinaus wird in [3] für Brettschichtholz eine Referenzhöhe von 600 mm definiert, was bei einer üblichen Schichtstärke von 40 mm eine Referenz-Schichtanzahl von 15 ergibt, bei dieser die oben angeführte Gleichung Gültigkeit aufweist. Diesem Modell liegt außerdem ein Variationskoeffizient der Rohdichte der Einzelschicht von mindestens 7,2% zu Grunde. Bei Betrachtung der Verläufe der 5%-Werte der Rohdichte von BSH und BSP in Abbildung 10, welche die Basis für die normativ geregelten charakteristischen Werte bilden, resultieren für die Untersuchungen in [9] folgende multiplikative Faktoren bei einer Schichtanzahl von $n=15$:

1,076 für BSH und

1,071 für BSP

Beide Faktoren sind nahezu ident und liegen unter jenem von 1,10, was durch die geringeren Variationskoeffizienten der Einzelschichten der beiden Rohdichtegruppen (1G: COV = 6,3%, 2G: COV = 5,4%) erklärbar ist. Aufgrund dieser gewonnenen Erkenntnisse kann festgestellt werden, dass der charakteristische Wert der Rohdichte von Brettsperrholz höher als jener von Vollholz (bzw. der Einzelschicht) ist und bei Vorliegen von identen Schichtanzahlen mit jenem von Brettschichtholz **gleichgesetzt** werden kann.

4.5. Ausziehfestigkeit der Holzschrauben

Es ist anzumerken, dass im Gegensatz zur Ermittlung nach EN 1382 [4] die Ausziehfestigkeit mit der folgenden Funktion berechnet worden ist und somit mit der Mantelfestigkeit gleichgesetzt werden kann:

$$f_{ax,exp,i} = \frac{F_{ax,exp,i}}{d \cdot l_{ef} \cdot \pi}$$

mit

$f_{ax,exp,i}$ als Ausziehfestigkeit der Prüfung i in $[\text{N}/\text{mm}^2]$,
 $F_{ax,exp,i}$ als gemessene maximale Kraft der Prüfung i in $[\text{N}]$,
 d als Nenndurchmesser der Schraube in $[\text{mm}]$ und
 l_{ef} als effektive Länge der Schraube im Holz in $[\text{mm}]$, welche mit der Höhe des Probekörpers gleichzusetzen ist.

In Tabelle 3 sind die ermittelten Mittelwerte, 5%-Werte und Variationskoeffizienten der Ausziehfestigkeit getrennt nach Schichtanzahl, Durchmesser und Aufbauvariante dargestellt. Wie darin ersichtlich ist, kann ein Anstieg der Ausziehfestigkeit (Mittelwert und 5%-Wert) mit steigender Schichtanzahl festgestellt werden. Dies gilt gleichermaßen für BSH und BSP, wobei hier anzumerken ist, dass die ermittelten Ausziehfestigkeiten der Prüfungen in BSP tendenziell höhere Werte aufweisen, als jene in BSH. Dieser Trend, als Verhältnis $f_{ax,exp,BSP}/f_{ax,exp,BSH}$ ausgedrückt, nimmt mit steigender Schichtanzahl zu (siehe auch Abbildung 12). Die Ergebnisse der Prüfungen in Vollholz ($n=1$) sind in Tabelle 3 grau dargestellt, da in diesen Serien (im Gegensatz zu den geschichteten Probekörpern) die Schraubenachse tangential zur Jahrringlage appliziert worden ist und somit eine andere Beanspruchungssituation der Verbindung Holz-Schraube resultiert.

Tabelle 3: Mittelwerte, 5%-Werte und Variationskoeffizienten der Ausziehfestigkeit, getrennt nach Durchmesser, Schichtanzahl und Aufbauvariante

Ø	n	$f_{ax,mean}$ [N/mm ²]		$f_{ax,05}$ [N/mm ²]		COV _{fax} [%]	
		BSH	BSP	BSH	BSP	BSH	BSP
Ø8	1	5,64	5,64	4,58	4,58	12,1	12,1
	3	5,86	5,93	5,25	5,11	8,33	9,37
	6	5,98	6,06	5,32	5,41	7,93	7,36
	20	6,37	6,66	5,62	6,02	6,90	7,95
Ø8 VB	1	5,76	5,76	4,42	4,42	14,3	14,3
	3	5,68	5,82	4,79	4,75	11,2	12,0
	6	5,85	5,95	5,12	5,00	9,91	11,2
	20	6,13	6,33	5,37	5,39	9,51	11,4
Ø12 VB	3	5,51	5,54	4,75	4,78	9,62	10,7
	6	5,52	5,68	4,94	4,96	8,19	8,86
	20	5,93	6,30	5,32	5,57	7,70	9,93

Die Boxplots in Abbildung 11 geben die Ausziehfestigkeiten grafisch wieder. Bei Betrachtung der dargestellten Streubereiche ist ein regressives Verhalten dieser mit steigender Schichtanzahl zu erkennen. Dies wird auch durch die in Tabelle 3 angeführten Variationskoeffizienten der Ausziehfestigkeit verdeutlicht.

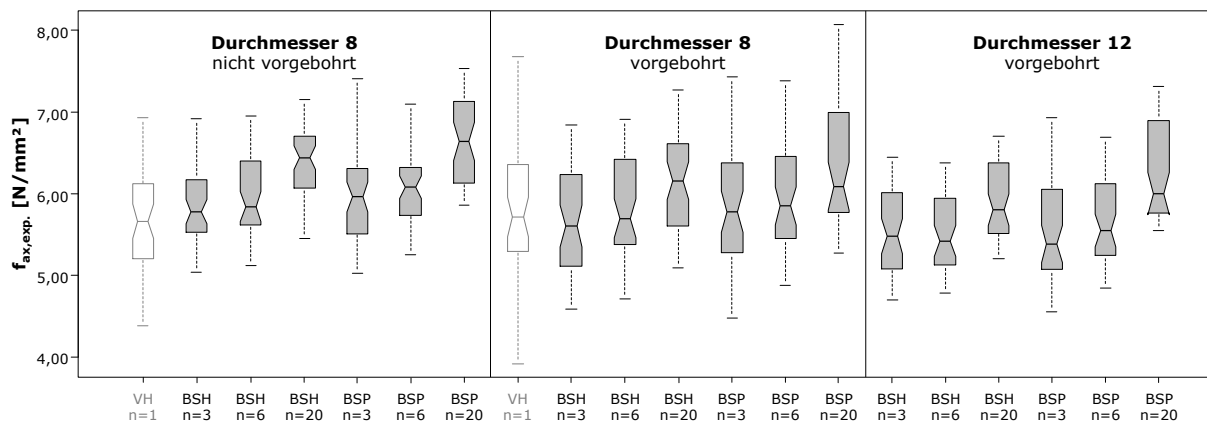


Abbildung 11: Überblick über die ermittelten Ausziehfestigkeiten für alle Serien

Abbildung 13 stellt die Verläufe der Mittel- und 5%-Werte der Ausziehfestigkeiten der Prüfungen in BSP (Ø8) in Abhängigkeit der Schichtanzahl grafisch dar, wobei hier zwischen „vorgebohrt“ und „nicht vorgebohrt“ unterschieden wird. Daraus wird ersichtlich, dass der zuvor beschriebene Anstieg der Ausziehfestigkeit für beide Situationen gilt, wobei die Ausziehfestigkeiten der Prüfungen mit erfolgter Vorbohrung durchwegs geringer sind, als jene ohne Vorbohrung. Diese Differenz steigt ebenfalls mit zunehmender Schichtanzahl und beträgt maximal 5,0% für BSP und 3,8% für BSH, bezogen auf die Ergebnisse ohne Vorbohrung.

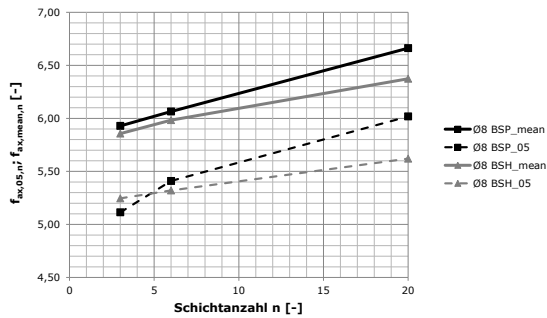


Abbildung 12: Anstieg der Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit der Schichtanzahl, getrennt nach BSP und BSH, Ø8 („nicht vorgebohrt“), nach [9]

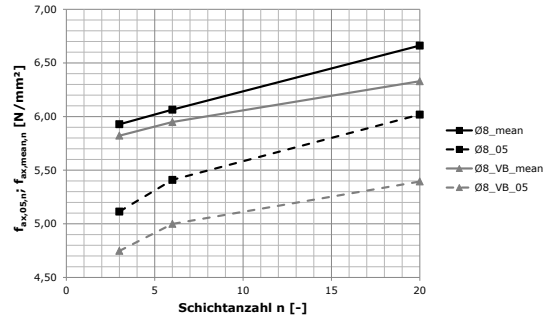


Abbildung 13: Anstieg der Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit der Schichtanzahl in BSP, getrennt nach „vorgebohrt“ und „nicht vorgebohrt“, nach [9]

5. Modellbildung

Wie im Fall der Rohdichte in Abschnitt 4.3 wurde auch im Zuge der Auswertung der Ausziehfestigkeit in [9] erwartet, dass zufolge der Homogenisierung des Materials bei einem konstanten Mittelwert der 5%-Wert mit steigender Schichtanzahl zunimmt. Wie in Abschnitt 4.5 erläutert, weisen die Daten in Abbildung 12 bzw. Tabelle 3 jedoch auch eine Zunahme des Mittelwertes der Ausziehfestigkeit um 12% zwischen der Serie mit 3 Schichten und jener mit 20 Schichten (in BSP) auf, was weder durch die erhöhten Werte der mittleren Rohdichte aufgrund des höheren Klebstoffanteils (plus 5%), noch durch die Abnahme der Streuung bei Erhöhung der Schichtanzahl begründet werden kann, da sich dieser Effekt ausschließlich auf den 5%-Wert auswirkt.

Als Konsequenz dieser Tatsache und dem Umstand, dass die Ergebnisse der Prüfungen in BSP tendenziell höher als jene in BSH ausgefallen sind, wurden im Rahmen der Untersuchungen in [9] folgende Beziehungen zwischen dem Tragverhalten der Schrauben in den unterschiedlichen Aufbauvarianten angenommen:

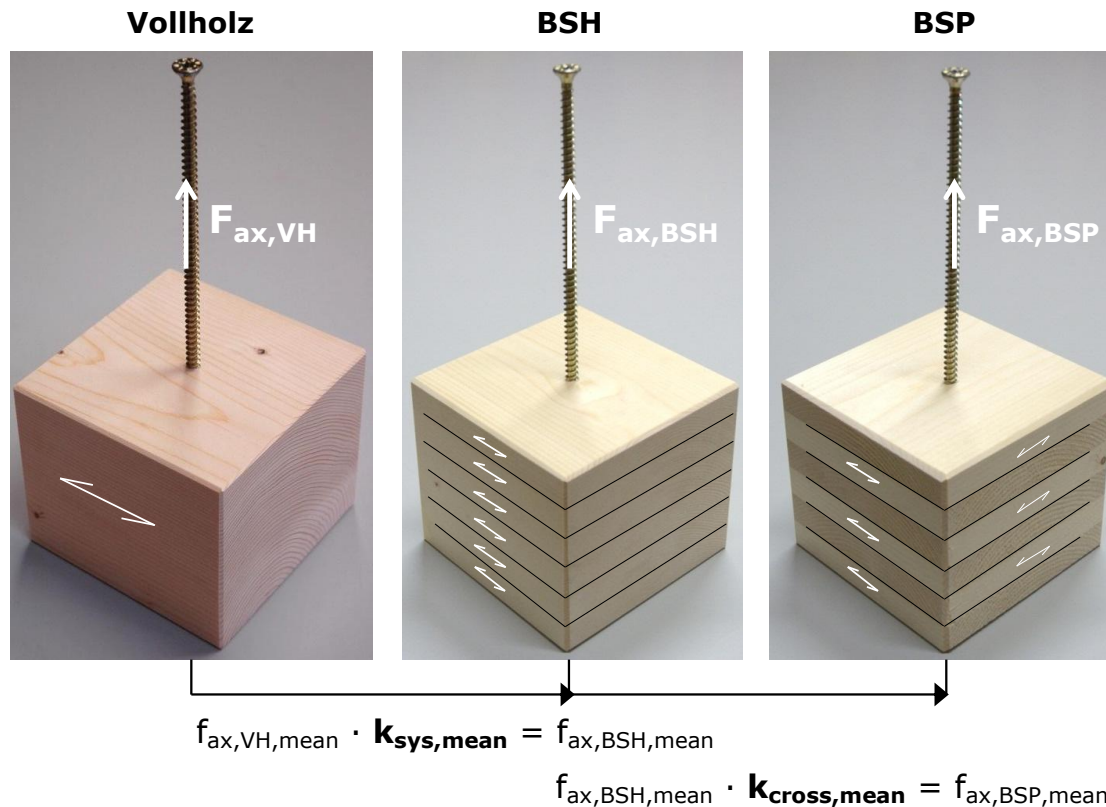


Abbildung 14: Basis zur Modellierung der mittleren Ausziehfestigkeit von BSH und BSP auf Grundlage jener von Vollholz

Wie in Abschnitt 1 dieses Beitrages kurz erörtert, wurde zur Modellierung der Ausziehfestigkeit in geschichteten Holzwerkstoffen ein hierarchisches Prinzip gewählt, welches von der Ausziehfestigkeit in der Einzelschicht ausgeht und die aus der Schichtung bzw. gesperrten Schichtung resultierenden Effekte schrittweise mitberücksichtigt. Dies erfolgt mit den beiden multiplikativen Faktoren k_{sys} und k_{cross} , welche auf unterschiedlichen Modellannahmen basieren und im Weiteren erläutert werden. An dieser Stelle ist anzumerken, dass der in Abbildung 14 dargestellte VH-Probekörper mit seinen Dimensionen symbolisch zu betrachten ist, da dieses Modell auf der Ausziehfestigkeit einer repräsentativen Einzelschicht mit einer Schichtstärke von 6 bis 40 mm basiert.

5.1. k_{sys} als schichtabhängiger „Vergütungseffekt“

Wird eine Schraube in einen geschichteten Holzwerkstoff normal zur Schichtenebene eingebracht, so liegt für den Verbund des Gewindes im Holz ein System aus n Einzelschichten mit unterschiedlich ausgeprägten Parametern, wie etwa der Rohdichte vor.

Aufgrund der geringen Umlagerungsmöglichkeiten in diesem System zufolge des spröden Bruchverhaltens des Verbundes, wurde in [9] die Annahme getroffen, dass das Versagen von jener Schicht mit der höchsten Steifigkeit ausgeht. Aufgrund der Korrelation zwischen Steifigkeit und Rohdichte soll diese Schicht zugleich die höchste Rohdichte aufweisen. Besteht nun ein geschichteter Aufbau aus einer Reihe von Einzelschichten mit gleichmäßiger Rohdichteverteilung, konnte nachgewiesen werden, dass der Maximalwert der Rohdichte je Probekörper mit der Anzahl an Schichten steigt, was in weiterer Folge im Modell eine Erhöhung der mittleren Ausziehfestigkeit im Vergleich zu jener der Einzelschicht bewirkt.

Um die Ergebnisse der Prüfserien in BSH mit diesem Systemmodell verifizieren zu können, war es außerdem notwendig, die Erhöhung der mittleren Rohdichte zufolge des in Abschnitt 4.3 festgestellten „Klebstoffeffekts“ zu berücksichtigen.

Beide beschriebenen Einflüsse wurden durch k -Beiwerte erfasst und bilden zusammen den Beiwert k_{sys} , der wie folgt definiert ist:

$$k_{\text{sys}} = k_{\text{glue}} \cdot k_{\text{layer}}$$

mit

k_{glue} als Beiwert zur Berücksichtigung des erhöhten Klebstoffanteils im Rahmen der Prüfserie und

k_{layer} als Beiwert zur Berücksichtigung des Einflusses der Schichtanzahl.

Beide Faktoren sind Funktionen in Abhängigkeit der Schichtanzahl und werden wie folgt ermittelt:

$$k_{\text{glue}} = 1 + \frac{\Delta m_{(n-1)}}{m_{\text{KP}}} = 1 + \left[\frac{\rho_{\text{Kleber}} \cdot t_{\text{Fuge}} \cdot (n-1)}{n \cdot t_{\text{layer}} \cdot \rho_{\text{VH,mean},n=1}} \right],$$

mit

$\Delta m_{(n-1)}$ als Masse der Klebstofffugen in Abhängigkeit Schichtanzahl in [kg],

m_{KP} als Masse der Kleinprobe in [kg],

ρ_{Kleber} als Rohdichte des Klebstoffes in [kg/m³],

t_{Fuge} als mittlere Klebstofffugendicke in [mm],

t_{layer} als Stärke der Einzelschicht in [mm],

$\rho_{\text{VH,mean},n=1}$ als Rohdichte der Einzelschicht (VH) in [kg/m³] und

n als Anzahl der Einzelschichten [-].

und

$$k_{\text{layer}} = \frac{1}{\left[\ln(n) \cdot \beta_{\rho, \text{mean}} + 1 \right]^{\alpha_{\rho, \text{mean}}}},$$

mit

$\alpha_{\rho, \text{mean}}, \beta_{\rho, \text{mean}}$ als konstante Faktoren (siehe Tabelle 4) [-] und

n als Anzahl der Einzelschichten [-].

Das Modell für die Funktion zur Ermittlung von k_{layer} wurde im Rahmen der Arbeiten in [9] der Dissertation von Brandner [10] entnommen. In der dargestellten Form ist diese Funktion eine Modifikation der Potenzfunktion nach Weibull (1939) gemäß der „weakest link theory“ und geeignet, die Veränderung ausgewählter Statistiken von Minima und Maxima auf Basis lognormal- bzw. normalverteilter Zufallsvariablen abzubilden. Der damit resultierende, degressive Verlauf berücksichtigt die Reduktion des relativen Einflusses auf die Ausziehfestigkeit bei zunehmender Schichtanzahl. Die in Tabelle 4 angeführten Faktoren $\alpha_{\rho,\text{mean}}$ und $\beta_{\rho,\text{mean}}$ basieren auf einer Simulation einer lognormalverteilten Rohdichte der Einzelschicht für einen Variationskoeffizienten $\text{COV}_{n=1}$ von 6%, 8% und 10% und decken somit die baupraktisch auftretende Bandbreite dieses Parameters ab.

Tabelle 4: beste Schätzer der konstanten Faktoren $\alpha_{\rho,\text{mean}}$ und $\beta_{\rho,\text{mean}}$ in Abhängigkeit von $\text{COV}_{n=1}$, nach [9]

$\text{COV}_{n=1}$	$\alpha_{\rho,\text{mean}}$	$\beta_{\rho,\text{mean}}$
6%	-0,2514	0,3557
8%	-0,2006	0,3594
10%	-0,1501	0,3632

Wie bereits in Abschnitt 4.5 erläutert, wurden die geprüften Ausziehfestigkeiten in der Einzelschicht (VH) tangential zur Lage der Jahrringe durchgeführt. Diese sind aufgrund der abweichenden Beanspruchungssituation somit nicht zur Verifikation des Modells geeignet. Als Konsequenz daraus wurde am Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz im Rahmen einer Masterarbeit (siehe [11]) eine weitere Serie (246 Prüfungen) zur Ermittlung der Ausziehfestigkeit in repräsentativen Einzelschichten mit einer Schichtstärke von $t = 38 \text{ mm}$, radial zur Jahrringlage umgesetzt. Der Mittelwert der Ausziehfestigkeit betrug hierbei $f_{\text{ax,mean},n=1} = 5,47 \text{ N/mm}^2$ (entspricht $f_{\text{ax,VH,mean}}$ aus Abbildung 14) bei einer mittleren Rohdichte von 411 kg/m^3 , welche jenen erfassten Mittelwerten in [9] nahezu entspricht (siehe Tabelle 2).

Unter Ansatz von $f_{\text{ax,mean},n=1} = 5,47 \text{ N/mm}^2$ für die Einzelschicht und dem festgestellten Variationskoeffizienten der Rohdichte $\text{COV}_{\rho,n=1}$ von 10,3% wurden die aus den Prüfungen resultierenden Ausziehfestigkeiten für BSH mit jenen aus dem Modell verglichen; siehe Abbildung 15.

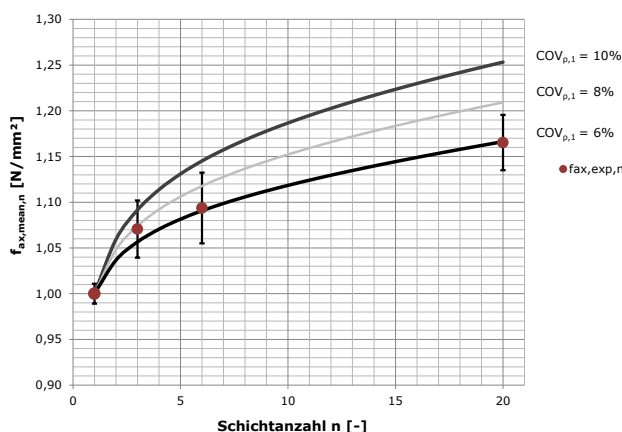


Abbildung 15: Vergleich der Prüfergebnisse von $f_{\text{ax,mean},n}$ mit den Modellergebnissen

Wie Abbildung 15 zu entnehmen ist, weisen die Prüfergebnisse tendenziell geringere Werte auf, als jene des Modells (höchste Linie, $\text{COV}_{\rho,1} = 10\%$). Die Differenz zwischen Vorhersage ($f_{\text{ax,pred},m,n}$) und Experiment ($f_{\text{ax,exp},m,n}$) wächst mit zunehmender Anzahl der Schichten und beträgt für baupraktisch relevante Anzahlen 2,1% ($n=3$) bzw. 5,1% ($n=6$) und im Maximum bei 20 Schichten 8,8%, bezogen auf die mittlere Ausziehfestigkeit der Einzelschicht. Die in Abbildung 15 dargestellten approximativen 95%-Konfidenzintervalle der gemittelten Messwerte wurden für das 50%-Quantil (Median) der jeweiligen Stichprobe ermittelt.

Auf Basis dieses Vorhersagemodells für die Veränderung der mittleren Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit der Schichtanzahl, wurde das Modell zur Ermittlung des 5%-Wertes der

Ausziehfestigkeit definiert. Dazu wurde, unter Annahme lognormalverteilter Ausziehfestigkeiten ($f_{ax} \sim 2pLND$), folgender Ansatz gewählt:

$$f_{ax,05,n} = \exp\left[\mu_X(n) - \Phi^{-1}(0,05) \cdot \sigma_X(n)\right].$$

Mit der Annahme von

$$COV_\rho(n) = COV_\rho(1) \cdot \frac{1}{[\ln(n) \cdot \beta_\rho + 1]^{\alpha_\rho}}$$

und

$$COV_{f_{ax,1}} \approx 1,47 \cdot COV_{\rho,1}$$

(Anmerkung: Der Verhältnisfaktor **1,47** der beiden Variationskoeffizienten entstammt Beobachtungen, getätigt an einer Vielzahl von Prüfserien zur Ermittlung der Ausziehfestigkeit.)

resultiert

$$f_{ax,05,n} = \exp\left[\ln\left(f_{ax,mean,n}^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + COV_\rho(n)}}\right) - 1,645 \cdot \sqrt{\ln[COV_\rho^2(n) + 1] + \ln\left(\frac{1,47^2 \cdot COV_\rho^2(1) + 1}{COV_\rho^2(1) + 1}\right)}\right].$$

Zur Umsetzung des Modells zur Beschreibung des 5%-Fraktilwertes, war es notwendig, den Variationskoeffizienten $COV_\rho(n)$ des Maximums der Rohdichte in Abhängigkeit der Schichtanzahl zu definieren. Auch dieser folgt dem Modell von Brandner [10] und weist für die Faktoren α_ρ und β_ρ folgende Werte auf:

Tabelle 5: beste Schätzer der konstanten Faktoren α_ρ und β_ρ in Abhängigkeit von $COV_{n=1}$, nach [9]

$COV_{n=1}$	α_ρ	β_ρ
6%	0,9999	0,3228
8%	0,9866	0,3295
10%	0,9737	0,3364

In weiterer Folge wurde das Modell mit den aus den Prüfungen resultierenden 5%-Werten der Ausziehfestigkeit aus [9] verifiziert. Diese Gegenüberstellung ist erneut in Abhängigkeit der Schichtanzahl in Abbildung 16 dargestellt. Die dargestellten approximativen 95%-Konfidenzintervalle der Messwerte wurden für das 5%-Quantil der jeweiligen Stichprobe ermittelt.

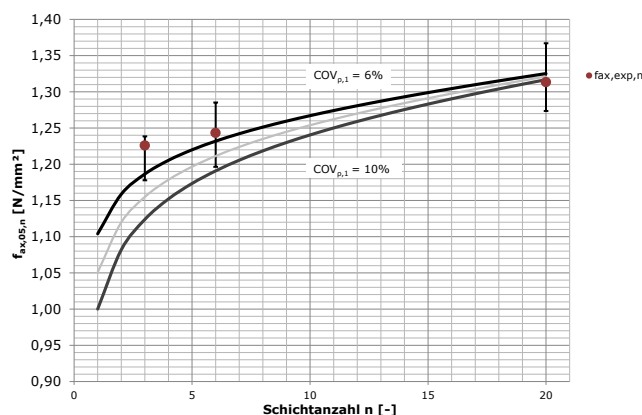


Abbildung 16: Vergleich der Prüfergebnisse von $f_{ax,05,n}$ mit den Modellergebnissen

Im Gegensatz zur Gegenüberstellung der Ergebnisse auf dem Niveau der Mittelwerte ist hier ersichtlich, dass die 5%-Werte der Prüfergebnisse tendenziell höher sind als jene aus dem Modell resultierenden. Diese Differenz sinkt mit dem Anstieg der Schichtanzahl und

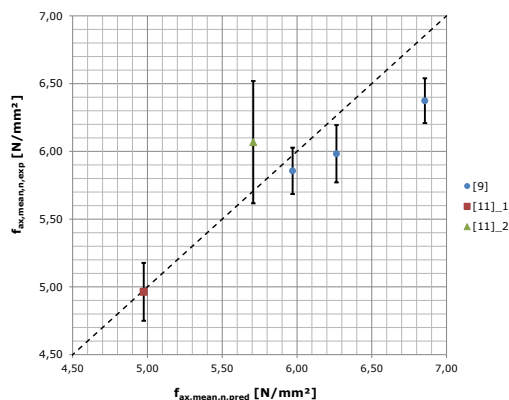
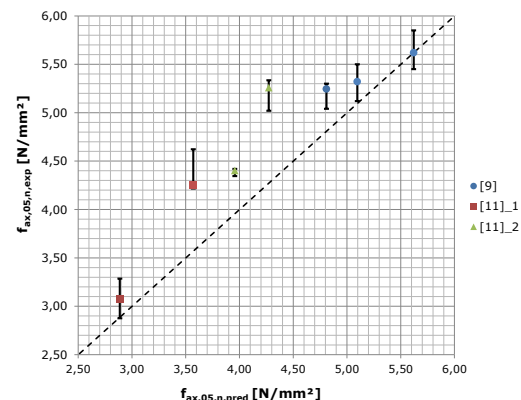
beträgt für baupraktisch relevante Anzahlen 10% (n=3) bzw. 5,2% (n=6) und bei der dargestellten Maximalanzahl an Schichten (n=20) 0,3%. Neben der Durchführung einer umfassenden Prüfserie in repräsentativen Einzelschichten, wurden in [11] auch n-schichtige BSH-Prüfkörper in Fichtenholz hergestellt, um die Ausziehfestigkeit in weiteren Schichtaufbauten und -konfigurationen mit diesem Modell verifizieren zu können. Tabelle 6 gibt einen Überblick über diese in [11] umgesetzten Serien.

Tabelle 6: Übersicht der durchgeführten Prüfserien in [11]

Serie		A0_2*	A0_1	A0_4*	A0_3
n	[-]	1	10	1	2
$f_{ax,mean}$	[N/mm ²]	4,18	4,96	5,39	6,07
$f_{ax,k}$	[N/mm ²]	3,07	4,25	4,40	5,26
COV _{fax}	[%]	22,4	7,27	18,6	13,2
ρ_{12}	[kg/m ³]	376	376	492	506
COV _{ρ}	[%]	11,6	5,28	10,9	11,4
COV _{fax} /COV _{ρ}	[-]	1,94	1,38	1,72	1,16

* jeweilige Referenzserie mit n=1

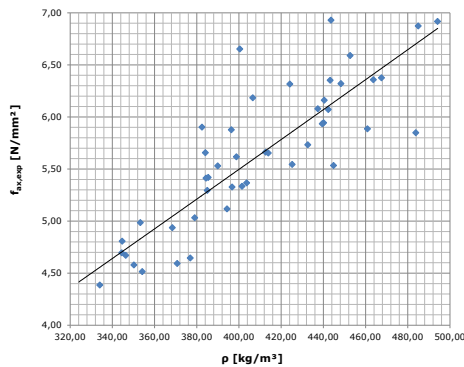
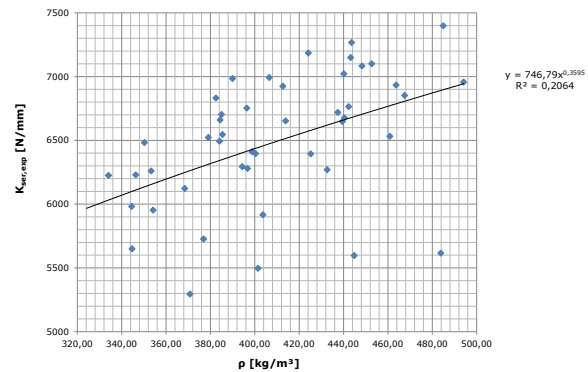
Abbildung 17 und Abbildung 18 vergleichen die experimentell ermittelten Mittelwerte und 5%-Werte der Ausziehfestigkeit aus [9] und [11] mit jenen aus den beiden Modellen. Hier wird erneut ersichtlich, dass die Mittelwerte der Ausziehfestigkeit tendenziell überschätzt werden, während die Modellergebnisse der 5%-Werte durchgehend tiefer als die experimentell ermittelten zu liegen kommen und somit eine konservative Ausprägung aufweisen. Die Ermittlung der Konfidenzintervalle in Abbildung 17 bzw. Abbildung 18 entsprach jener aus Abbildung 15 bzw. Abbildung 16.

Abbildung 17: Vergleich sämtlicher Prüfserien von $f_{ax,m,n}$ mit den ModellergebnissenAbbildung 18: Vergleich sämtlicher Prüfserien von $f_{ax,05,n}$ mit den Modellergebnissen

Ursachen für Abweichungen des Prognosemodells können wie folgt aufgelistet werden:

- Unschärfe im Modellparameter ρ_n ;
- Unschärfe im Basiswert für $f_{ax,1i}$;
- Unschärfe im Verhalten COV_{fax} / COV_{ρ} (Annahme eines multiplikativen Faktors von 1,47);
- Unschärfe zufolge der Annahme einer über die Einschraublänge konstanter Verbundspannungsverteilung (siehe Ermittlung von f_{ax});
- Unschärfe aus der Annahme der statistischen Verteilungen der Parameter ($f_{ax} \sim 2pLND$, $\rho \sim 2pLND$);
- Unschärfe in den Datensätzen für die Verifizierung.

Die Unschärfe im Modellparameter ρ_n ist auf den Ansatz zurück zu führen, dass die Steifigkeit K_i und Ausziehfestigkeit $f_{ax,i}$ der Schicht i ideal durch den Wert der jeweiligen Rohdichte ρ_i beschrieben werden können. Abbildung 19 und Abbildung 20 geben anhand einer ausgewählten Prüfserie (aus [9]) exemplarisch die Beziehungen dieser Parameter wieder. Für die Beschreibung dieser wurden Regressionsmodelle als Potenzfunktionen mit dem Format f_{ax} bzw. $K_{ser} = \alpha \cdot \rho^{\beta}$ gewählt.

Abbildung 19: Beziehung zwischen $f_{ax,exp}$ und ρ_{12} Abbildung 20: Beziehung zwischen $K_{ser,exp}$ und ρ_{12}

Bei Betrachtung der Bestimmtheitsmaße R^2 für f_{ax} (0,74) und K_{ser} (0,21) wird ersichtlich, dass dieses für die Ausziehfestigkeit unerwartet hoch ausfällt, wohingegen die Steifigkeit der Verbindung durch die vorliegende Rohdichte nur unzureichend vorausgesagt werden kann.

5.2. k_{cross} als „Sperreffekt“ zufolge der Schichtorientierung

In Abschnitt 3.2 wurde bereits erwähnt, dass zwei der drei Schraubenausziehprüfungen je Probekörper vorgebohrt durchgeführt worden sind, um einen möglichen, unterschiedlich ausfallenden Effekt der (Mikro-)Rissbildung bei beiden Aufbauvarianten ausschließen zu können. Dies geschah aufgrund der Annahme, dass die kreuzweise Orientierung der Schichten in einem BSP-Probekörper eine Grenzschicht zwischen den Längs- und Querlagen erzeugt, welche als „produktinhärente Bewehrung“ dieses Aufreißen in Faserrichtung behindert. Darüber hinaus beschränkt sich ein etwaig auftretender Riss in Faserrichtung im Fall der Aufbauvariante „BSP“ ausschließlich auf die Höhe einer einzelnen Schicht, was ebenfalls zur Vergütung der Verbindung Holz-Schraube beitragen kann. Da es derzeit noch keine allgemeine Hypothese zur Erklärung der – verglichen mit BSH – erhöhten Ausziehfestigkeit in den Seitenflächen von BSP gibt, wurde im Rahmen der Untersuchungen in [9] davon ausgegangen, dass diese Differenz durch die beschriebenen Übergangszonen an den Schichtgrenzen zustande kommt. Dies zum Anlass nehmend, wurden zwei Modelle definiert, welche die möglichen Szenarien dieses „Sperreffektes“ abbilden können. Im ersten Modell wurde von einer gleichbleibenden Stärke der Einzelschicht und einer Zunahme der Schichtanzahl ausgegangen, was eine lineare Zunahme dieser Übergangsschichten und somit eine lineare Steigerung der Ausziehfestigkeit bewirkt. Das zweite Modell geht davon aus, dass die Gesamtstärke des geschichteten Aufbaus konstant bleibt, während die Anzahl der Einzelschichten zunimmt. In diesem Fall wird der Anstieg der Ausziehfestigkeit mit einem Potenzmodell beschrieben. Beide Anwendungsfälle sind in der folgenden Abbildung 21 dargestellt.

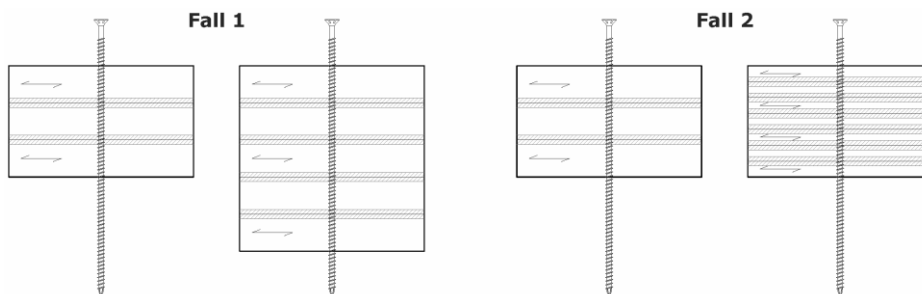


Abbildung 21: Gegenüberstellung der beiden möglichen Fälle des Sperreffektes, nach [9]

In beiden Fällen stellt dieser Sperreffekt, als k_{cross} bezeichnet, einen multiplikativen Faktor dar, der wie folgt berücksichtigt wird:

$$f_{ax,BSP,mean,n} = f_{ax,BSH,mean,n} \cdot k_{cross}$$

mit

$k_{cross} = 2 \cdot (n-1) \cdot \zeta_{clt} + 1$ für das lineare Modell, oder

$k_{cross} = \frac{1}{[\ln(n) \cdot \beta_{clt} + 1]^{\alpha_{clt}}}$ für das Potenzmodell (Funktion aus [10]) und

$\alpha_{clt}, \beta_{clt}, \zeta_{clt}$ als konstante Faktoren, die in [9] mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate an die Prüfergebnisse angepasst wurden und in Tabelle 7 aufgelistet sind.

Tabelle 7: beste Schätzer der konstanten Faktoren α_{clt} , β_{clt} und ζ_{clt} , aus [9]

lineares Modell	Potenzmodell	
ζ_{clt}	α_{clt}	β_{clt}
0,00111	-0,5993	0,0211

Abbildung 22 stellt die Ergebnisse der beiden Modelle den experimentell ermittelten gegenüber.

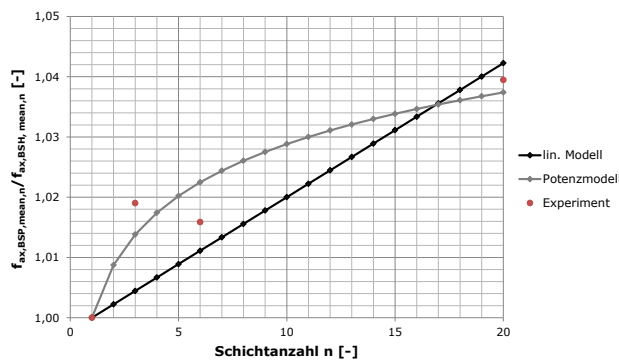


Abbildung 22: Gegenüberstellung der Vorhersagewerte von $f_{ax,BSP,mean}/f_{ax,BSH,mean}$ mit den experimentell ermittelten, Ø8, nach [9]

Beide Modelle weisen für diesen exemplarischen Fall maximale Abweichungen von 0,7% (Potenzmodell, $n=6$) bzw. 1,4% (lineares Modell, $n=3$) von den Prüfergebnissen auf, wobei das Potenzmodell diese qualitativ besser beschreibt als das lineare. Dies kann durch den Umstand erklärt werden, dass die Konzeption der Probekörper in [9] dem Fall 2 in Abbildung 21 entspricht.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrages wurde der derzeitige Stand der Normung hinsichtlich der Ermittlung der charakteristischen Ausziehfestigkeit für selbstbohrende Schrauben in Vollholz, Brettschichtholz und (den Seitenflächen von) Brettsperrholz untersucht, wobei festgestellt werden konnte, dass bei Vorliegen des selben Materials der Einzelschichten diese für Vollholz und Brettsperrholz ident ermittelt wird, während für Brettschichtholz eine Erhöhung zufolge einer nichtlinearen Rohdichtekorrektur angewendet wird. Hier ist erneut anzumerken, dass für Brettschichtholz keine Unterscheidung zufolge der Lage der Schraube im Aufbau (radial durch mehrere Schichten oder tangential in der Einzelschicht) stattfindet. Dies hat zur Folge, dass im Fall einer tangentialen Applikation ein charakteristischer Wert der Rohdichte des Holzes angesetzt wird (z.B. 380 kg/m^3 für GL24h), welcher in der einzelnen Schicht definitionsgemäß nicht vorliegt. Daher kann an dieser Stelle empfohlen werden, die Ausziehfestigkeit von Schrauben, deren Applikation parallel zur Schichtebene in den Einzelschichten von BSH erfolgt, **wie für Vollholz** zu ermitteln. Diesen Umstand unterstreichen auch die im Vergleich zur Verschraubung durch mehrere Schichten geringeren Werte der Schraubenausziehprüfungen in der Einzelschicht tangential zur Jahrringlage (siehe Tabelle 3).

Wird eine Schraube normal zur Ebene der Schichten eingeschraubt, so konnte festgestellt werden, dass die Anzahl der durchgeschraubten Schichten einen Einfluss auf die Ausziehfestigkeit des Verbindungsmittels ausübt. Da dieser Effekt zufolge des Anstiegs der jeweiligen Mittelwerte der Prüfergebnisse nicht durch eine aus der Homogenisierung des Mate-

rials resultierende geringere Streuung der Ausziehfestigkeit erklärbar ist, wurde im Rahmen der Untersuchungen in [9] die Hypothese aufgestellt, dass das Ausziehversagen der Verbindung Holz-Schraube von jener Schicht mit der höchsten Steifigkeit (bzw. der höchsten Rohdichte) definiert wird. Dieser Hypothese folgend, wurden zwei Modelle definiert, welche den Anstieg der Mittelwerte und der 5%-Werte der Ausziehfestigkeit bei Zunahme der (durchschraubten) Schichtanzahl erfassen:

$$f_{ax,mean,n} = f_{ax,mean,1} \cdot k_{sys}(n) = f_{ax,mean,1} \cdot k_{glue}(n) \cdot k_{layer}(n)$$

und

$$f_{ax,05,n} = \exp \left[\ln \left(f_{ax,mean,n}^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + COV_{\rho}(n)}} \right) - 1,645 \cdot \sqrt{\ln(COV_{\rho}^2(n) + 1) + \ln \left(\frac{1,47^2 \cdot COV_{\rho}^2(1) + 1}{COV_{\rho}^2(1) + 1} \right)} \right]$$

An dieser Stelle sei angemerkt, dass der Faktor k_{glue} , welcher zur Verifizierung des Modells berücksichtigt wurde, bei baupraktisch auftretenden Schichtanzahlen nicht relevant ist und zu $k_{glue} = 1,0$ gesetzt werden kann. Bei Kombination dieses Modells mit der Gleichung aus der EN 1995-1-1 [1] zur Ermittlung der Ausziehfestigkeit von selbstbohrenden Holzschrauben, kann zusammenfassend das in Abbildung 23 dargestellte Vorgehen vorgeschlagen werden.

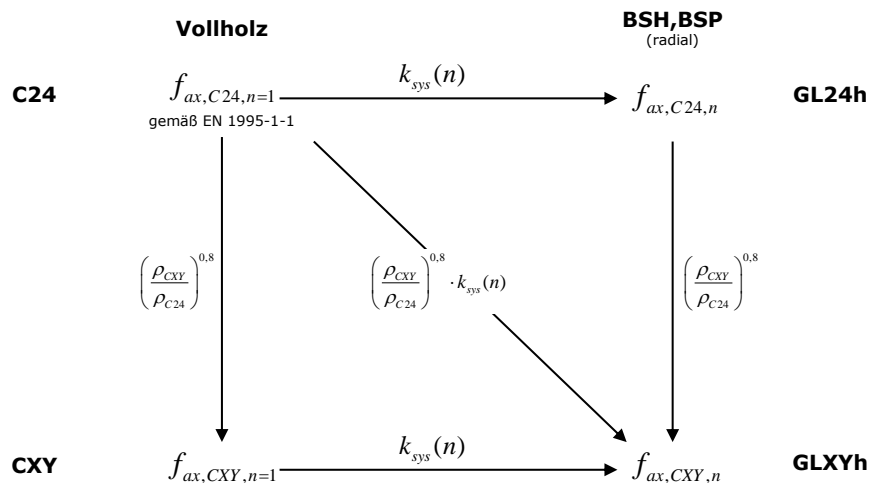


Abbildung 23: Vorschlag für Vorgehen zur Ermittlung der Ausziehfestigkeit von selbstbohrenden Holzschrauben in VH, BSH und BSP

Bei Gegenüberstellung der Vorhersagewerte aus dem jeweiligen Modell mit jenen aus den umgesetzten Prüfserien (Grundserie aus [9] und Serie zur Verifizierung aus [11]) zeigte sich, dass das Modell zur Ermittlung des Mittelwertes der Ausziehfestigkeit den tatsächlichen Anstieg tendenziell überschätzt, während die Ergebnisse des Modells für den 5%-Wert konservative Werte hervorbringen. Gründe für mögliche Abweichungen zu den experimentellen Werten liegen in der Unschärfe des Modells, wie etwa der Eignung des Parameters „Rohdichte“ zur Beschreibung eines mechanischen Verhaltens (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20).

Neben dem Anstieg der Ausziehfestigkeit bei Zunahme der Schichtanzahl wurden außerdem tendenziell höhere Werte für die Prüfungen in BSP verglichen mit jenen in BSH festgestellt, wobei diese Differenz erneut degressiv mit steigender Schichtanzahl zunimmt. Hierfür wurde folgender Ansatz gewählt:

$$f_{ax,BSP,mean} = f_{ax,BSH,mean} \cdot k_{cross}(n)$$

Wird für n eine baupraktisch übliche Schichtanzahl (3 bis max. 7 Schichten) angesetzt, so zeigt sich bei Anwendung des Modells wie auch bei Betrachtung der Prüfergebnisse, dass die Erhöhung der Ausziehfestigkeit im Vergleich zu BSH maximal 2% beträgt und somit vernachlässigbar ist ($k_{cross} = 1,0$). Neben den nahezu identen Prüfergebnissen für Schrauben in BSH- und BSP-Probekörpern (bei üblichen Schichtanzahlen) und dem Umstand, dass der 5%-Wert der Rohdichte und der Anstieg dieses bei zunehmender

Schichtanzahl mit jenen von BSH gleichzusetzen ist, wird an dieser Stelle empfohlen, die Ausziehfestigkeit von selbstbohrenden Holzschrauben in (den Seitenflächen von) BSP bei Anwendung der Gleichung der EN 1995-1-1 [1] **wie für BSH** zu ermitteln.

7. Danksagung

Die Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des Projektes „reinforce connection“ vom Kompetenzzentrum holz.bau forschungs gmbh finanziert und in Kooperation mit dem Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz und dem Industriepartner Hasslacher Holding GmbH bearbeitet. Das Projekt wird aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft, Familie und Jugend, des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, der Steirischen Wirtschaftsförderungs-gesellschaft mbH und des Landes Steiermark (A14) gefördert.

Die Verfasser möchten sich darüber hinaus bei den Unternehmen Schmid Schrauben Hainfeld GmbH und Jowat AG für die Bereitstellung der Holzschrauben und des Klebstoffes bedanken.

An dieser Stelle ist nochmals zu betonen, dass sämtliche Laboruntersuchungen für diesen Beitrag im Rahmen von zwei Masterarbeiten am Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz durchgeführt worden sind. Diesbezüglich möchten sich die Verfasser bei Frau DI Birgit Reichelt und Frau Katarina Bratulić, MSc. für die gute Zusammenarbeit bedanken.

8. Literatur

- [1] ÖNORM EN 1995-1-1:2009-07-01 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten. Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- [2] ÖNORM EN 338:2009-12-01 Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen
- [3] ÖNORM EN 1194:1999-09-01 Holzbauwerke. Brettschichtholz – Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte
- [4] ÖNORM EN 1382:1999 Holzbauwerke. Prüfverfahren, Ausziehtragfähigkeit von Verbindungsmitteln
- [5] CUAP 06.03/08 Common Understanding of Assessment Procedure for European Technical Approval according to Article 9.2 of the Construction Products Directive – Self tapping screws for use in timber constructions (Version Dezember 2010)
- [6] Z-9.1-435 Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, Holzbauschrauben Star Drive, Rapid, Rapid Perfekt und Schmid SP als Holzverbindungsmittel, Schmid Schrauben Hainfeld GmbH, Jahr 2009, gültig bis 31.12.2014
- [7] Z-9.1-519 Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, SPAX Schrauben mit Vollgewinde als Holzverbindungsmittel, SPAX International GmbH & Co. KG, Jahr 2011, gültig bis 30.04.2012
- [8] Produktdatenblatt. Jowapur. Flüssiger Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoff für den tragenden Holzleimbau, Jowat AG, 686.60, 07/10
- [9] Reichelt, B.: Einfluss der Sperrwirkung auf den Auszieh Widerstand selbstbohrender Holzschrauben – Eine vergleichende Betrachtung zwischen BSP und BSH. Masterarbeit am Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz 2012
- [10] Brandner, R.: Stochastic System Actions and Effects in Engineered Timber Products and Structures. Dissertation am Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz 2012
- [11] Bratulic, K.: Alteration of the withdrawal strength of self-tapping screws along the board and over a varying cross section of GLT. Master thesis at the Institute for Timber Engineering and Wood Technology, Graz University of Technology, 2012
- [12] Blaß, H. J.; Uibel, Th.: Bemessungsvorschläge von Verbindungsmittel in Brettsperrholz. Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH) 2007