

# Brettsperrholz –

## Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln

### 1 Einleitung

Der Holzwerkstoff Brettsperrholz (BSPH) besteht aus mehreren, kreuzweise miteinander verklebten Brettlagen. Brettsperrholzprodukte werden seit einigen Jahren hergestellt und unter verschiedenen Bezeichnungen vermarktet. Sie werden nicht nur als Bestandteil eines Bauteils eingesetzt, wie dieses z. B. vornehmlich für Mehrschichtplatten zutrifft, sondern selbst als Bauteile. Ganze Gebäude können aus Brettsperrholz in Form von Decken- oder Wandelementen errichtet werden [8]. Des Weiteren wird Brettsperrholz auch bei Brückenbauten verwendet, so hat es sich z. B. als Fahrbahnplatte der Brücke Ruderting bewährt.

Die Produkte und ihre Bemessung sind bisher in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen geregelt, wobei Vorschläge vorliegen, sie in einer Produktnorm und in einer Bemessungsnorm zu regeln [3], [4] u. [5].

In den letzten Jahren hat die Massivholzbauweise insbesondere im ein- und mehrgeschossigen Wohnungs- und Gewerbebau an Bedeutung gewonnen. Inzwischen erweitern immer mehr Hersteller ihr Angebot um Brettsperrholzprodukte größerer Dicke, die als statisch wirksames Bauteil verwendet werden können. Dieses belegt auch die steigende Anzahl der durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) erteilten allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für Brettsperrholz.

Das Trag- und Verformungsverhalten von Brettsperrholz wurde bereits weitgehend untersucht. Es kann mit unterschiedlichen Verfahren wie der Verbundtheorie, dem Schubanalogieverfahren oder der Theorie der nachgiebig verbundenen Biegeträger berechnet werden (s. a. [7]).

Der effiziente Einsatz von Brettsperrholzprodukten in einem Bauwerk erfordert es, diese untereinander oder mit anderen Bauteilen zu verbinden. Hierzu bietet es sich an, stiftförmige Verbindungsmittel wie u. a. Stabdübel, Schrauben oder Nägel einzusetzen. Diese Verbindungsmittel können sowohl in den Seitenflächen als auch in den Schmalflächen von Brettsperrholzplatten angeordnet werden. Als Seitenfläche werden die zur Plattenebene parallelen Oberflächen bezeichnet. Diese werden durch die äußeren Brettlagen gebildet. Die Oberflächen rechtwinklig zur Plattenebene werden als Schmalflächen bezeichnet und begrenzen die Brettsperrholzplatten an den jeweiligen Kanten.

Die Schmalflächen enthalten sowohl Seitenholzflächen als auch Hirnholzflächen der einzelnen Brettlagen. In Bild 1 sind die Flächen entsprechend ihrer Definition gekennzeichnet.

Die Bemessung und Ausführung von Verbindungen in Brettsperrholzprodukten ist bisher nicht allgemein gültig geregelt. Für die in Deutschland bauaufsichtlich zugelassenen Brettsperrholzprodukte werden zum Teil Regelungen zur Bemessung von Verbindungen in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen angegeben.

In den letzten Jahren wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens das Trag- und Verformungsverhalten von stiftförmigen Verbindungsmitteln in BSPH am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe (TH) untersucht [6].

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Hierauf aufbauend wurden neue Bemessungsvorschläge für Verbindungen in den Seiten- und Schmalflächen von Brettsperrhölzern entwickelt. Diese Bemessungsvorschläge wurden z. T. bereits in neueren allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen berücksichtigt. Inwiefern diese Vorschläge in allgemeingültige Bemessungsregeln innerhalb einer Bemessungsnorm einfließen, ist bisher noch nicht abzusehen.

Neben den nationalen bzw. europäisch-technischen Zulassungen des jeweiligen BSPH sind für die Bemessung und Ausführung von Verbindungen mit bauaufsichtlich zugelassenen Verbindungsmitteln ggf. die Regelungen der jeweiligen Zulassung zu beachten.



**Bild 1: Geöffnete Stabdübelverbindung in Seiten- und Schmalflächen von Brettsperrholz**

## 2 Eigenschaften von Brettsperrholz

Brettsperrholz besteht aus kreuzweise verklebten Brettlagen, wobei eine Brettlage aus mehreren, nebeneinander liegenden Brettern gebildet wird. Je nach Produkt können die Einzelbretter einer Brettlage an deren Schmalseiten mit oder ohne Fugen gestoßen bzw. sogar verklebt sein.

Bei einigen Produkten werden Entlastungsnuten mit einer Breite von rund 2,5 mm in Faserlängsrichtung der Bretter eingesägt. Die Größe der Fugen wird in bauaufsichtlichen Zulassungen auf einen Maximalwert von 6 mm beschränkt. Eine Untersuchung der Fugen an Brettsperrholzplatten dreier Hersteller ergab einen 95%-Quantilwert der Fugenbreite von 1 bis 1,6 mm für die äußeren Brettlagen und von 1,8 bis 4,5 mm für die inneren Brettlagen. Der größte Mittelwert der Fugenbreiten wurde in den Mittellagen festgestellt und betrug 2 mm. Bild 2 zeigt die Ausbildung von Brettstößen und Nuten bei unterschiedlichen Brettsperrholzprodukten. Eine statistische Auswertung der Fugenbreiten der unterschiedlichen Brettsperrholzprodukte ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

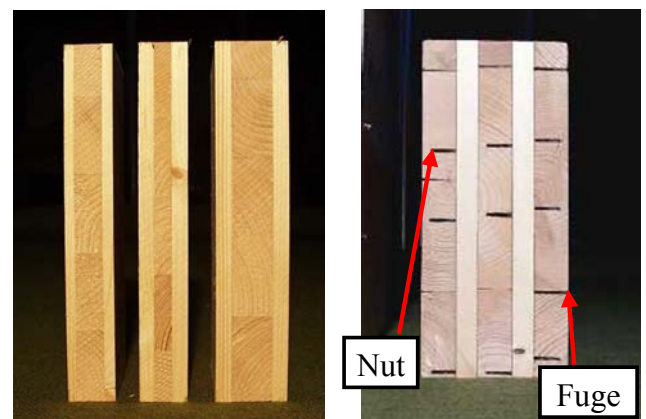
Bei einer Beanspruchung auf Abscheren kann die Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln nach der Theorie von Johansen ermittelt werden. Hierzu wird als Eingangsgröße, neben der Geometrie der Verbindung und dem Fließmoment des Verbindungsmittels, die Lochleibungsfestigkeit der Bauteile benötigt. Die Tragfähigkeit von Schrauben oder Nägeln, die auf Herausziehen beansprucht werden, lässt sich mit Hilfe der Herausziehwiderstände bzw. Ausziehparameter berechnen. Die Lochleibungsfestigkeit und der Herausziehwiderstand wurden für Brettsperrhölzer bisher nicht allgemein gültig untersucht. Beide Parameter sind nicht als reine Werkstoffeigenschaften, sondern als Systemeigenschaften zu betrachten. Sie korrelieren mit der Rohdichte des Holzes bzw. des Holzwerkstoffes. Daher ist die Kenntnis über die Rohdichte von Brettsperrholz für die Bemessung von Verbindungen erforderlich.

Zur Bestimmung der charakteristischen Rohdichte wurden insgesamt 2299 Rohdichteproben von Brettsperrhölzern unterschiedlicher Hersteller und Aufbauten untersucht, siehe Tabelle 2.

Auf Grundlage dieser Untersuchung kann für Brettsperrholzprodukte aus Fichte (*Pinus abies*) unabhängig vom Hersteller eine charakteristische Rohdichte von 400 kg/m<sup>3</sup> vorgeschlagen werden. Die in den folgenden Abschnitten angegebenen Gleichungen zur Berechnung der Parameter Lochleibungsfestigkeit und Herausziehfähigkeit beruhen auf dieser Anforderung an die charakteristische Rohdichte.

**Tabelle 2: Rohdichte von BSPH unterschiedlicher Hersteller**

Hersteller	Probenanzahl	$\rho_{\text{mean}}$ in kg/m <sup>3</sup>	CoV in %	$\rho_k$ in kg/m <sup>3</sup>
1	515	470	5,11	430
2	906	437	6,02	400
3	208	458	5,18	423
4	670	459	5,75	419



**Bild 2: Ausbildung von Brettstößen in unterschiedlichen BSPH**

**Tabelle 1: Fugenbreiten von Brettsperrholzprodukten**

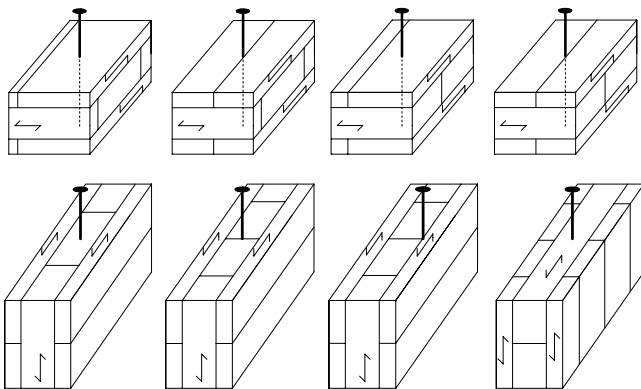
Hersteller	Lagenanzahl	Fugenbreite $t_F$ in mm								
		Außenlagen			Zwischenlagen			Mittellage		
		Mittelwert	Maximum	95%-Quantil	Mittelwert	Maximum	95%-Quantil	Mittelwert	Maximum	95%-Quantil
1	5	0,6	2,1	1,6	1,6	7,3	3,4	1	3	2,3
2	3	0,4	2	1,3	-	-	-	0,5	2,2	1,8
2	5	0,2	1	1	1,4	6,8	3,3	2	6,7	4,5
4	5	0	0	0	0,6	5,4	3,5	0	0	0

### 3 Tragfähigkeit bei Beanspruchung in Richtung der Stiftachse

Die Tragfähigkeit axial belasteter Schrauben und Nägel ist abhängig von ihrer Tragfähigkeit auf Herausziehen, ihrer Zugtragfähigkeit und ggf. der Tragfähigkeit bei Beanspruchung auf Kopfdurchziehen.

Bei einigen Brettsperhölzern wird die Herausziehtragfähigkeit der Verbindungsmittel von ihrer Anordnung im Hinblick auf Fugen und Nuten beeinflusst. Auch bei einer ungünstigen Positionierung eines Verbindungsmittels innerhalb einer Fuge oder Nut ist eine zuverlässige Übertragung der Kräfte durch einen Anschluss zu gewährleisten. Daher sollten innerhalb eines Anschlusses die Verbindungsmittel in mindestens zwei Verbindungsmittelreihen zu jeweils mindestens zwei Verbindungsmitteln angeordnet werden. Die Eindringtiefe ist bei Verbindungen in den Seitenflächen so zu wählen, dass die Verbindungsmittelspitze mindestens die dritte Brettlage durchdringt.

In den Schmalflächen von Brettsperholz können Verbindungsmittel faserparallel oder auch rechtwinklig zur Faserrichtung einer Brettlage eingebracht werden. In Bild 3 sind die möglichen Anordnungen von Verbindungsmitteln in den Seiten- und Schmalflächen dargestellt. Hierbei wurde auch ihre Lage hinsichtlich von Fugen bzw. Nuten berücksichtigt.



**Bild 3: Mögliche Anordnungen von Verbindungsmitteln in den Seiten- und Schmalflächen von BSPH**

Die charakteristische Tragfähigkeit  $R_{ax,s,k}$  von auf Herausziehen beanspruchten selbstbohrenden Holzschrauben kann nach Gleichung (1) berechnet werden.

$$R_{ax,s,k} = \frac{31 \cdot d^{0,8} \cdot \ell_{ef}^{0,9}}{1,5 \cdot \cos^2 \varepsilon + \sin^2 \varepsilon} \text{ in N} \quad (1)$$

mit

- $d$  Nenndurchmesser der Schraube in mm
- $\ell_{ef}$  wirksame Einschraubtiefe in mm
- $\varepsilon$  für Verbindungen in den Seitenflächen:  $\varepsilon = 90^\circ$   
für Verbindungen in den Schmalflächen:  $\varepsilon = 0^\circ$

Gleichung (1) gilt für selbstbohrende Holzschrauben, die den im Forschungsvorhaben untersuchten Schrauben insbesondere bezüglich ihrer Geometrie entsprechen. Die Schrauben müssen bei einer Herausziehbeanspruchung aus Vollholz die Anforderungen an die Tragfähigkeitsklasse 3 nach DIN 1052: 2004-08 [9] erfüllen.

Für Verbindungen in den Seitenflächen von BSPH ( $\varepsilon = 90^\circ$ ) wird in Gleichung (1) implizit die charakteristische Rohdichte des Gesamtquerschnitts ( $\rho_k = 400 \text{ kg/m}^3$ ) berücksichtigt. Für die Schmalflächen wird zur Vereinfachung und konservativ angenommen, dass die Schraubenachse parallel zur Fasserrichtung angeordnet ist ( $\varepsilon = 0^\circ$ ). Hierbei wird gleichzeitig in Gleichung (1) die charakteristische Rohdichte der Brettlage ( $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ ) entsprechend des Ausgangsmaterials berücksichtigt.

Über das Langzeitverhalten von faserparallel eingedrehten Schrauben liegen bisher nur wenige Erkenntnisse vor. Ergebnisse von Versuchen mit Prüfkörpern aus Vollholz lassen vermuten, dass bei einer dauerhaften Beanspruchung mit deutlich geringeren Tragfähigkeiten zu rechnen ist. Langzeitversuche mit faserparallel in den Schmalflächen von BSPH angeordneten Holzschrauben werden zurzeit an der Universität Karlsruhe durchgeführt, siehe auch Abschnitt 6. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in ca. drei Jahren vorliegen. Zwischenzeitlich wird zur Übertragung von axialen Kräften in den Schmalflächen empfohlen, die Schrauben in die Brettlagen einzudrehen, deren Faserrichtung rechtwinklig zur Schraubenachse verläuft.

Bei Schraubenverbindungen dürfen Einschraubtiefen  $\ell_{ef} < 4 \cdot d$  nicht in Rechnung gestellt werden. Der Minstdurchmesser der Schrauben sollte für Verbindungen in den Seitenflächen  $d = 6 \text{ mm}$  und für Verbindungen in Schmalflächen  $d = 8 \text{ mm}$  betragen.

Die charakteristische Tragfähigkeit  $R_{ax,n,k}$  von auf Herausziehen beanspruchten Sondernägeln (Kamm-, Rillen-, Schraubnägeln) der Tragfähigkeitsklasse 3 gemäß DIN 1052: 2004-08 [9] in den Seitenflächen von Brettsperholz kann mit Gleichung (2) berechnet werden.

$$R_{ax,n,k} = 14 \cdot d^{0,6} \cdot \ell_{ef} \text{ in N} \quad (2)$$

mit

- $d$  Nenndurchmesser des Sondernagels in mm
- $\ell_{ef}$  wirksame Einschlagtiefe in mm

Für Verbindungen in Brettsperholzprodukten mit Fugen und Nuten sollten Nägel mit einem Minstdurchmesser von  $d = 4 \text{ mm}$  verwendet werden. Bei diesen Produkten sollte für Nägel mit Durchmesser  $d < 6 \text{ mm}$  die Herausziehtragfähigkeit nur zu 80% des Wertes nach Gleichung (2) angesetzt werden.

Die wirksame Einschlagtiefe  $\ell_{ef}$  ist größer als  $8 \cdot d$  zu wählen. In den Schmalflächen von BSPH sollten keine Nagelverbindungen ausgeführt werden.

## 4 Tragfähigkeit bei Beanspruchung rechtwinklig zur Stiftachse

### 4.1 Allgemeines

Die Tragfähigkeit stiftförmiger Verbindungsmittel bei Beanspruchung auf Abscheren wird im Holzbau üblicherweise nach der Theorie von Johansen berechnet. Hierbei wird ein ideal-plastisches Verhalten des Holzes bzw. des Holzwerkstoffes unter Lochleibungsbeanspruchung und des stiftförmigen Verbindungsmittels unter Biegebeanspruchung vorausgesetzt. Gleichungen zur Berechnung der charakteristischen Tragfähigkeit von Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln sind z. B. im Anhang G der DIN 1052:2004-08 angegeben. Für Verbindungsmittel, die zudem Kräfte in Richtung der Stiftachse übertragen können (Passbolzen, Bolzen, Schrauben sowie Sondernägel in Stahlblech-Holz- und Holzwerkstoff-Holz-Verbindungen), darf die Tragfähigkeit unter Ausnutzung des Einhängeneffektes erhöht werden. Auch die Tragfähigkeit von Verbindungsmitteln in BSPH kann mit der Johansen-Theorie und unter Ausnutzung des Einhängeneffektes ermittelt werden. Die benötigten Lochleibungsfestigkeiten sowie die Besonderheiten bei der Berechnung der Tragfähigkeit werden folgend für Verbindungen in den Schmal- und Seitenflächen von Brettsperrholz vorgestellt.

### 4.2 Verbindungen in den Schmalflächen

Bei Verbindungen in den Schmalflächen kann die Stiftachse der Verbindungsmittel sowohl rechtwinklig als auch parallel zur Faserrichtung einer Brettlage angeordnet sein. Des Weiteren kann sich ein Verbindungsmittel gleichzeitig in Brettlagen unterschiedlicher Faserrichtung befinden. Um mit den üblichen Johansen-Gleichungen die Tragfähigkeit berechnen zu können, wird die Lochleibungsfestigkeit für die Verbindungsmittel in den Schmalflächen benötigt. Umfangreiche experimentelle Untersuchungen [6] haben gezeigt, dass die maßgebende Lochleibungsfestigkeit bei parallel zur Faserrichtung eingebrachten Verbindungsmitteln erreicht wird. Bei den empirischen Untersuchungen wurden auch die möglichen Positionen von Verbindungsmitteln bezüglich von Fugen und Nuten berücksichtigt. Unabhängig von der Anordnung des Verbindungsmittels in der Schmalseite kann daher ein konservativer, charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit für nicht vorgebohrte Brettsperrhölzer bei Schrauben- und Nagelverbindungen gemäß Gleichung (3) berechnet werden.

$$f_{h,k} = \frac{20}{\sqrt{d}} \quad \text{in N/mm}^2 \quad (3)$$

mit

$d$  Nenndurchmesser des Verbindungsmittels in mm

Die Lochleibungsfestigkeit in den Schmalseiten von Brettsperrholz bei Verbindungen mit Stabdübeln, Passbolzen und Bolzen kann mit Gleichung (4) ermittelt werden.

$$f_{h,k} = 9 \cdot (1 - 0,017 \cdot d) \quad \text{in N/mm}^2 \quad (4)$$

mit

$d$  Nenndurchmesser des Verbindungsmittels in mm

Bei Anordnung mehrerer Verbindungsmittel in einer Reihe kann ein Anschluss bei geringen Abständen der Verbindungsmittel untereinander durch Aufspalten versagen. Bei Verbindungen in den Schmalflächen von Brettsperrholz trifft dieses insbesondere auf Verbindungsmittel zu, die rechtwinklig zur Faserrichtung einer Brettlage angeordnet sind. Dieser spröde Versagensmechanismus kann durch Reduzierung der tatsächlichen Verbindungsmittelanzahl auf eine wirksame Anzahl  $n_{ef}$  berücksichtigt werden. Es wird empfohlen  $n_{ef}$  wie für Vollholz zu berechnen, siehe Abschnitt 12.3 Absatz (9) der DIN 1052:2004-08.

### 4.3 Verbindungen in den Seitenflächen

#### 4.3.1 Schrauben- und Nagelverbindungen

Die Lochleibungsfestigkeit für Schrauben und Nägel, die ohne Vorbohren eingebracht werden, ist unabhängig vom Winkel zwischen Krafrichtung und Faserrichtung. Es wird daher auch für BSPH angenommen, dass eine entlang der Stiftachse gleichmäßig verteilte Lochleibungsfestigkeit vorliegt. Zur Ermittlung der Verbindungsmitteltragfähigkeit können die üblichen Johansen-Gleichungen verwendet werden. Hierzu sind Vorschläge für die charakteristische Lochleibungsfestigkeit in den Gleichungen (5) und (6) angegeben. Die Lochleibungsfestigkeit für Schrauben und Nägel in den Seitenflächen von Brettsperrholz mit Brettlagendicken  $t_i \leq 9$  mm kann mit Gleichung (5) ermittelt werden.

$$f_{h,k} = \frac{60}{\sqrt{d}} \quad \text{in N/mm}^2 \quad (5)$$

mit

$d$  Nenndurchmesser des Verbindungsmittels in mm

Bei BSPH mit Brettlagendicken  $t_i > 9$  mm ist die Lochleibungsfestigkeit wie für Vollholz zu ermitteln (z. B. nach Abschnitt 12 der DIN 1052 [9]). Für die Rohdichte ist hierbei die charakteristische Rohdichte des Ausgangsmaterials anzusetzen. Ggf. ist der Winkel zwischen Krafrichtung und Faserrichtung der Decklagen zu berücksichtigen. Für selbstbohrende Holzschrauben mit Vollgewinde z. B. kann die Lochleibungsfestigkeit nach einem Vorschlag von Blaß und Bejtka [1], [2] berechnet werden:

$$f_{h,VgSr,k} = 0,019 \cdot \rho_{B,k}^{1,24} \cdot d^{-0,3} \quad \text{in N/mm}^2 \quad (6)$$

mit

$d$  Außen- bzw. Nenndurchmesser der Schraube in mm

$\rho_{B,k}$  charakteristische Rohdichte des Ausgangsmaterials in  $\text{kg/m}^3$  (i. d. R.  $350 \text{ kg/m}^3$ )

### 4.3.2 Genaueres Modell für Verbindungen mit Stabdübeln, Passbolzen und Bolzen

Bei Verbindungsmitteln wie Stabdübel und Bolzen ist die Lochleibungsfestigkeit abhängig vom Winkel zwischen Krafrichtung und Faserrichtung. Aufgrund der kreuzweise verklebten Brettlagen liegen für diese Verbindungsmittel entlang der Stiftachse abschnittsweise unterschiedliche Lochleibungsfestigkeiten vor. Es sind genauere Betrachtungen notwendig, bei denen die Versagensmechanismen nach Johansen entsprechend zu erweitern sind.

Im Folgenden sollen die Versagensfälle für das vergleichsweise einfache Beispiel einer Stahlblech-BSPH-Verbindung mit innen liegendem Stahlblech gezeigt werden. Hierbei beschränkt sich die Betrachtung auf ein dreilagiges Brettsperholz. Für jede Brettlage wird die jeweilige Lochleibungsfestigkeit angesetzt. Diese ist für einen bestimmten Verbindungsmitteldurchmesser vom Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung sowie von der Rohdichte der Brettlage abhängig. Um die Anzahl möglicher Versagensfälle einzuschränken, wird vereinfachend angenommen, dass die Lochleibungsfestigkeit von Brettlagen gleicher Orientierung identisch ist. Das bedeutet, dass die Variation der Rohdichte über den Gesamtquerschnitt des Brettsperholzes vernachlässigt wird.

Im Versagensmechanismus 1 nach Johansen liegt eine reine Lochleibungsbeanspruchung über die gesamte Bauteildicke vor, siehe Bild 4. Die Summe der Lochleibungsfestigkeiten der einzelnen Brettlagen entspricht einer Lochleibungsfestigkeit, die am Gesamtquerschnitt ermittelt werden kann (siehe Abschnitt 4.3.3):

$$f_{h,BSPH} = \frac{1}{t_1} \cdot \sum_{i=1}^n f_{h,1,i} \cdot t_{1,i} \quad \text{in N/mm}^2 \quad (7)$$

Die Tragfähigkeit ergibt sich mit der Lochleibungsfestigkeit für den Gesamtquerschnitt aus Gleichung (24) zu:

$$R = f_{h,BSPH} \cdot d \cdot t_1 \quad (8)$$

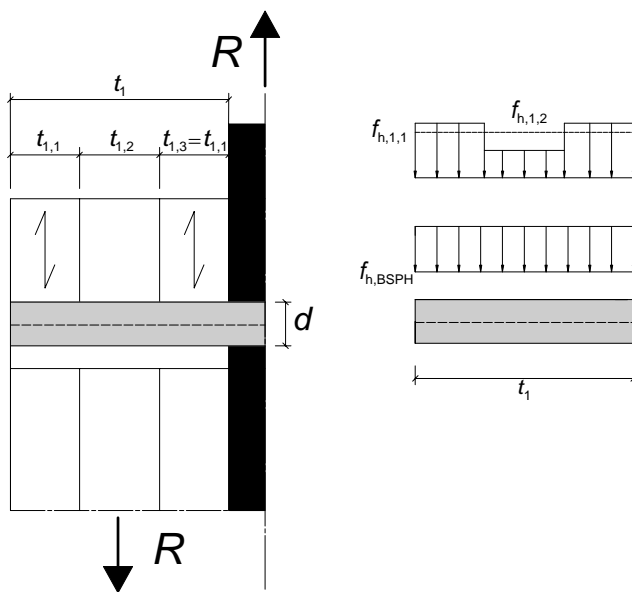


Bild 4: Versagensmechanismus 1

Der Versagensmechanismus 2 ist gekennzeichnet durch die Ausbildung eines Fließgelenkes pro Scherfuge und einer Lochleibungsbeanspruchung. Die Tragfähigkeit ist abhängig vom Abstand  $x$  zwischen Drehpunkt und Scherfuge. Für ein dreilagiges Brettsperholz ergeben sich je nach Lage des Drehpunktes die in Bild 5 dargestellten Versagensmechanismen 2.1 und 2.2.

Unter Verwendung der Substitutionen

$$\beta_{1,1,2} = \frac{f_{h,1,2}}{f_{h,1,1}} \quad (9)$$

und

$$\psi = \frac{t_{1,1}}{t_1} \quad (10)$$

ergibt sich die Tragfähigkeit im Versagensmechanismus 2.1 pro Scherfuge zu:

$$R_2 = f_{h,1,1} \cdot d \cdot t_1 \cdot \left[ \sqrt{2} \cdot \sqrt{\beta_{1,1,2} \cdot \left( 2 \cdot \psi^2 - 2 \cdot \psi + 1 \right) + 2 \cdot \psi (1 - \psi) + \frac{2 \cdot M_y}{f_{h,1,1} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta_{1,1,2} \right] \quad (11)$$

für  $\psi$  gemäß der Bedingung nach Gleichung (12).

$$\psi \leq \frac{1}{2} \cdot \left( \beta_{1,1,2} + 1 - \sqrt{\beta_{1,1,2}^2 + 1 + \frac{4 \cdot M_y}{f_{h,1,1} \cdot d \cdot t_1^2}} \right) \quad (12)$$

Die Tragfähigkeit im Versagensmechanismus 2.2 beträgt:

$$R_2 = f_{h,1,1} \cdot d \cdot t_1 \cdot \left[ \sqrt{2} \cdot \sqrt{\psi \cdot (2 \cdot \beta_{1,1,2} - 2) + 2 - \beta_{1,1,2} + \frac{2 \cdot M_y}{f_{h,1,1} \cdot d \cdot t_1^2}} + 2 \cdot \psi + \beta_{1,1,2} \cdot (1 - 2 \cdot \psi) - 2 \right] \quad (13)$$

für  $\psi$  gemäß der Bedingung nach Gleichung (14).

$$\psi \geq \frac{1}{2} \cdot \left( \beta_{1,1,2} + 1 - \sqrt{\beta_{1,1,2}^2 + 1 + \frac{4 \cdot M_y}{f_{h,1,1} \cdot d \cdot t_1^2}} \right) \quad (14)$$

Im Versagensmechanismus 3 bilden sich im Verbindungsmittel zwei Fließgelenke pro Scherfuge aus. Die Tragfähigkeit ist abhängig von der Lage des zweiten Fließgelenkes. Für ein BSPH mit drei Brettlagen sind drei Versagensmechanismen möglich, wie in Bild 6 gezeigt. Ist für  $\psi$  die Bedingung der Gleichung (16) erfüllt, kann die Tragfähigkeit im Versagensmechanismus 3.1 gemäß Gleichung (15) berechnet werden.

$$R_3 = \sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot f_{h,1,1} \cdot M_y \cdot d} \quad (15)$$

für

$$\psi \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{M_y}{f_{h,1,1} \cdot d \cdot t_1^2}} \quad (16)$$

Im Versagensmechanismus 3.2 kann die Tragfähigkeit nach Gleichung (17) berechnet werden, wenn die Bedingungen der Gleichungen (18) und (19) eingehalten sind.

$$R_3 = f_{h,1,1} \cdot d \cdot t_1 \cdot \psi \cdot \left[ 1 - \beta_{1,1,2} + \sqrt{\beta_{1,1,2} \cdot \left( \beta_{1,1,2} - 1 + \frac{4 \cdot M_y}{f_{h,1,1} \cdot d \cdot t_1^2 \cdot \psi^2} \right)} \right] \quad (17)$$

für

$$\psi \leq 2 \cdot \sqrt{\frac{M_y}{f_{h,1,1} \cdot d \cdot t_1^2}} \quad (18)$$

und

$$\frac{\psi}{\beta_{1,1,2}} \cdot \sqrt{\beta_{1,1,2} \cdot \left( \beta_{1,1,2} - 1 + \frac{4 \cdot M_y}{f_{h,1,1} \cdot d \cdot t_1^2 \cdot \psi^2} \right)} + \psi \leq 1 \quad (19)$$

Für Versagensmechanismus 3.3 gilt:

$$R_3 = f_{h,1,1} \cdot d \cdot t_1 \cdot \left[ \beta_{1,1,2} (1 - 2 \cdot \psi) + 2 \cdot \psi - 1 + \sqrt{2 \cdot \psi \cdot (\beta_{1,1,2} - 1) - \beta_{1,1,2} + 1 + \frac{4 \cdot M_y}{f_{h,1,1} \cdot d \cdot t_1^2}} \right] \quad (20)$$

für

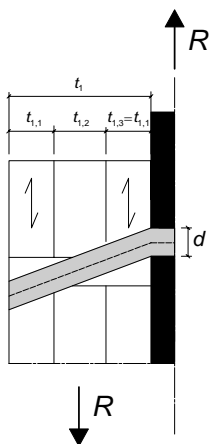
$$\psi \leq 2 \cdot \sqrt{\frac{M_y}{f_{h,1,1} \cdot d \cdot t_1^2}} \quad (21)$$

und

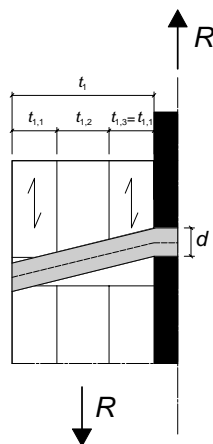
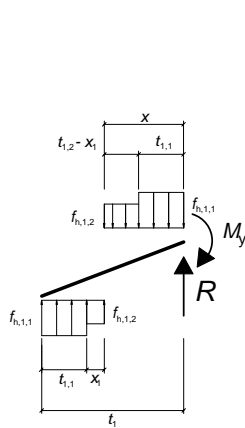
$$\sqrt{2 \cdot \psi \cdot (\beta_{1,1,2} - 1) - \beta_{1,1,2} + 1 + \frac{4 \cdot M_y}{f_{h,1,1} \cdot d \cdot t_1^2}} + \psi \geq 1 \quad (22)$$

Die Tragfähigkeit des Verbindungsmittels ergibt sich aus dem Minimum der betrachteten Versagensfälle, siehe Gleichung (23).

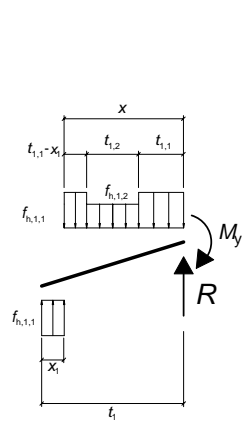
$$R = \min \{ R_1, R_2, R_3 \} \quad (23)$$



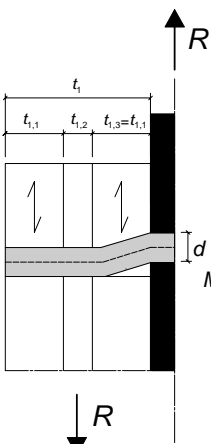
Vm. 2.1



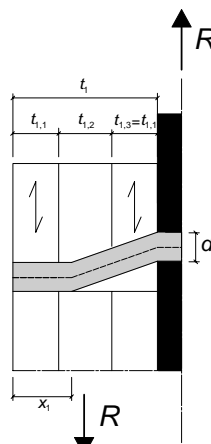
Vm. 2.2



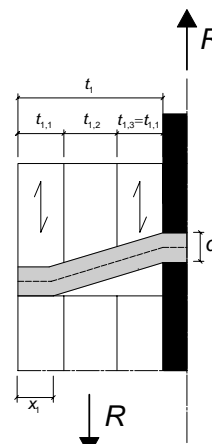
**Bild 5: Versagensmechanismen 2.1 und 2.2**



Vm. 3.1



Vm. 3.2



Vm. 3.3

**Bild 6: Versagensmechanismen 3.1 bis 3.3**

Die Herleitung der Tragfähigkeit ist bereits für den einfachen Fall einer Stahlblech-BSPH-Verbindung mit einem dreilagigen Brettspertholz vergleichsweise komplex und aufwändig. Mit zunehmender Anzahl der Brettlagen steigt auch der Aufwand der Berechnungen.

Zur Berechnung der Versagensmechanismen 2 und 3 wird die Lochleibungsfestigkeit (hier  $f_{h,1,i}$ ) der einzelnen Brettlagen benötigt. Eine Herleitung dieser Lochleibungsfestigkeiten ist sowohl analytisch als auch durch Versuche nur näherungsweise möglich. Die Einflüsse durch Anordnung der Verbindungsmittel in den Fugen und die Absperrwirkung der kreuzweise verklebten Brettlagen lassen sich nur schwer erfassen. Eine Näherungsgleichung für die Lochleibungsfestigkeit einer einzelnen Brettlage wird in [6] angegeben. Diese Näherung ist innerhalb ihrer Gültigkeitsgrenzen, die vom Brettspertholzaufbau abhängig sind, empirisch abgesichert.

### 4.3.3 Vereinfachte Berechnung für Verbindungen mit Stabdübeln, Passbolzen und Bolzen

Um den Berechnungsaufwand zu reduzieren, wird zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Verbindungen mit Stabdübeln, Passbolzen und Bolzen ein vereinfachtes Modell vorgeschlagen. Hierbei wird nicht für jede Brettlage eine differenzierte Lochleibungsfestigkeit angesetzt, sondern die durch Versuche ermittelte Lochleibungsfestigkeit für den Gesamtquerschnitt von Brettspertholz. Die Tragfähigkeit kann somit mit den herkömmlichen Johansen-Gleichungen für homogene Bauteile berechnet werden. Das vereinfachte Modell ist bei vielen Brettspertholzaufbauten anwendbar.

Bei der Berechnung muss die charakteristische Lochleibungsfestigkeit von Stabdübeln und Bolzen mit Gleichung (24) ermittelt werden. Die angegebene Lochleibungsfestigkeit ist in ihrem Gültigkeitsbereich unabhängig vom Aufbau und den Brettlagedicken.

$$f_{h,k} = \frac{32 \cdot (1 - 0,015 \cdot d)}{1,1 \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \text{ in N/mm}^2 \quad (24)$$

mit

$\alpha$  Winkel zwischen Krafrichtung und Faserrichtung der Decklagen

Folgende Bedingungen sollten bei einer Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit nach Gleichung (24) eingehalten werden:

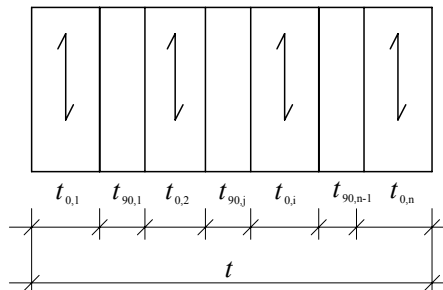
- maximale Brettlagedicke  $t_{i,max} \leq 40$  mm
- Mindestdicke / Mindesteinbindtiefe: drei Brettlagen
- Verhältnis der Brettlagen unterschiedlicher Orientierung  $\zeta$  nach Gleichung (25) zwischen 0,95 und 2,0; s. a. Bild 7

$$\zeta = \frac{\sum t_{0,i}}{\sum t_{90,j}} \quad (25)$$

mit

$t_{0,i}$  Dicke der einzelnen Brettlagen, parallel zur Faserrichtung der Decklagen

$t_{90,j}$  Dicke der einzelnen Brettlagen, rechtwinklig zur Faserrichtung der Decklagen



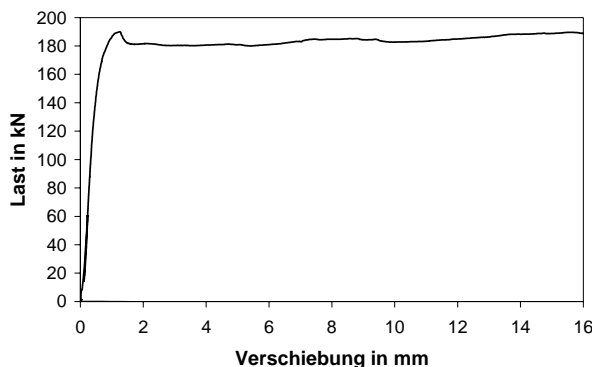
**Bild 7: Definition der Brettlagen zur Berechnung des Verhältnisses  $\zeta$**

Durch die kreuzweise verklebten Brettlagen darf für Verbindungen in den Seitenflächen von Brettspertholz von einer Querkzugverstärkung ausgegangen werden. Eine Tragfähigkeitsreduzierung durch ein frühzeitiges, sprödes Versagen durch Aufspalten tritt in der Regel nicht auf. Daher ist es nicht erforderlich die Anzahl hintereinander liegender Verbindungsmittel zu reduzieren, so dass für die wirksame Anzahl  $n_{ef}$  gilt:

$$n_{ef} = n \quad (26)$$

Bei Versuchen mit Stabdübelverbindungen in den Seitenflächen konnte allerdings teilweise ein Blockscheren in einzelnen Brettlagen beobachtet werden, siehe Bild 9. Dieses Blockscheren führt nicht zu einem völligen Versagen der Verbindung, jedoch wird die rechnerische Tragfähigkeit nicht ganz erreicht. Insgesamt zeigten diese Verbindungen ein äußerst duktilen Verhalten, wie das Last-Verschiebungsdiagramm in Bild 8 zeigt.

In Abschnitt 5 werden Mindestabstände der Verbindungsmittel untereinander und zum Rand angegeben. Unter Einhaltung dieser Abstände kann der Einfluss des Blockscherens von Decklagen auf die Tragfähigkeit zumeist minimiert werden oder sogar völlig verhindert werden. Die Auswirkungen des Blockscherens in den Brettlagen sind jedoch noch nicht abschließend geklärt. Daher wird empfohlen, bei konzentrierten Anschlüssen mit mehreren hintereinander liegenden Verbindungsmitteln unter Anwendung der kleinsten möglichen Abstände die Tragfähigkeitsnachweise nicht völlig auszunutzen. Als Richtwert kann hier ein Ausnutzungsgrad von ca. 80 % angegeben werden.



**Bild 8: Last-Verschiebungsdiagramm für eine Stabdübelverbindung bei Auftreten von Blockscheren in den Decklagen**



Bild 9: Blockscheren in den Decklagen

## 5 Konstruktive Ausbildung von Anschlüssen

Für Herausziehbeanspruchungen sind bereits im Abschnitt 3 einige Anforderungen an die Mindesteindringtiefen von Verbindungsmitteln sowie an die Anzahl der Vermeidungsmittel und Verbindungsmittelreihen aufgeführt. Zusätzlich sind Mindestabstände und Mindesteinbindetiefen einzuhalten.

Für Verbindungsmittel, die in die Seitenflächen von Brettsperrholz eingebracht werden, sind die Mindestabstände in Tabelle 3 angegeben. Eine Definition der Mindestabstände zeigt Bild 10.

In Bild 11 sind die Mindestabstände von Verbindungsmitteln in den Schmalflächen aufgeführt. Sie gelten bei Belastung der Verbindungsmittel in Plattenebene und sind unabhängig vom Winkel zwischen Stiftachse und Faserrichtung. Die Anforderungen an die Mindestdicken des Brettsperrholzes bzw. der maßgebenden Brettlagen sowie an die Mindesteinbindetiefen der Verbindungsmittel sind in Tabelle 4 aufgeführt. Bei Belastung rechtwinklig zur Plattenebene ist darüber hinaus ein Aufspalten der Schmalflächen bzw. die Querkzugbeanspruchung zu berücksichtigen.

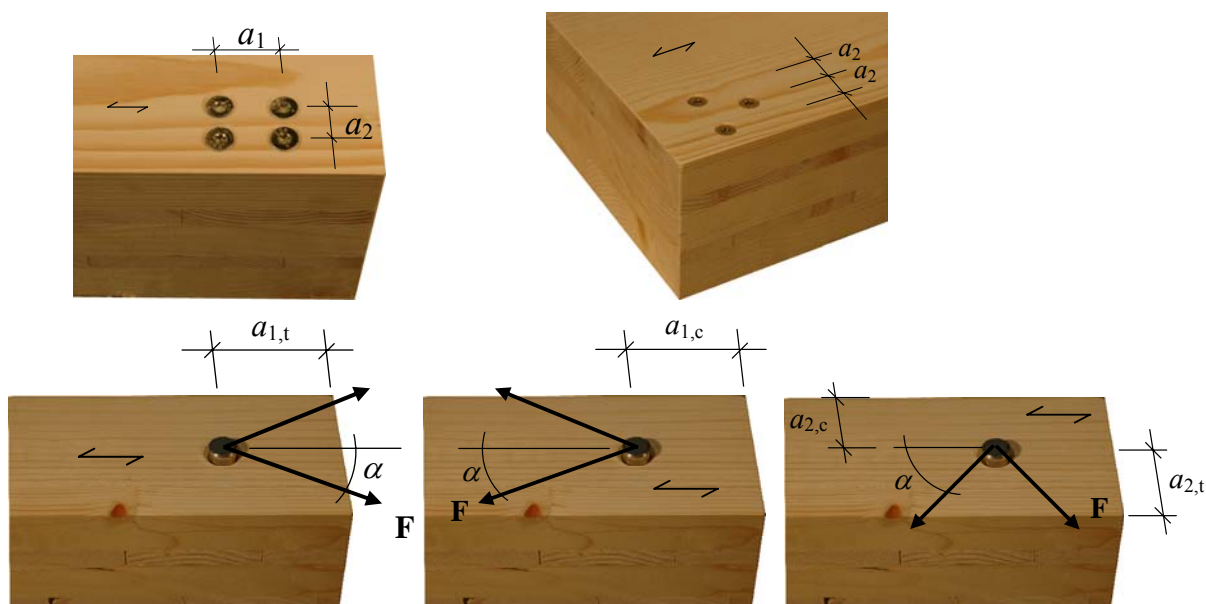


Bild 10: Definition der Mindestabstände von Verbindungsmitteln in den Seitenflächen.

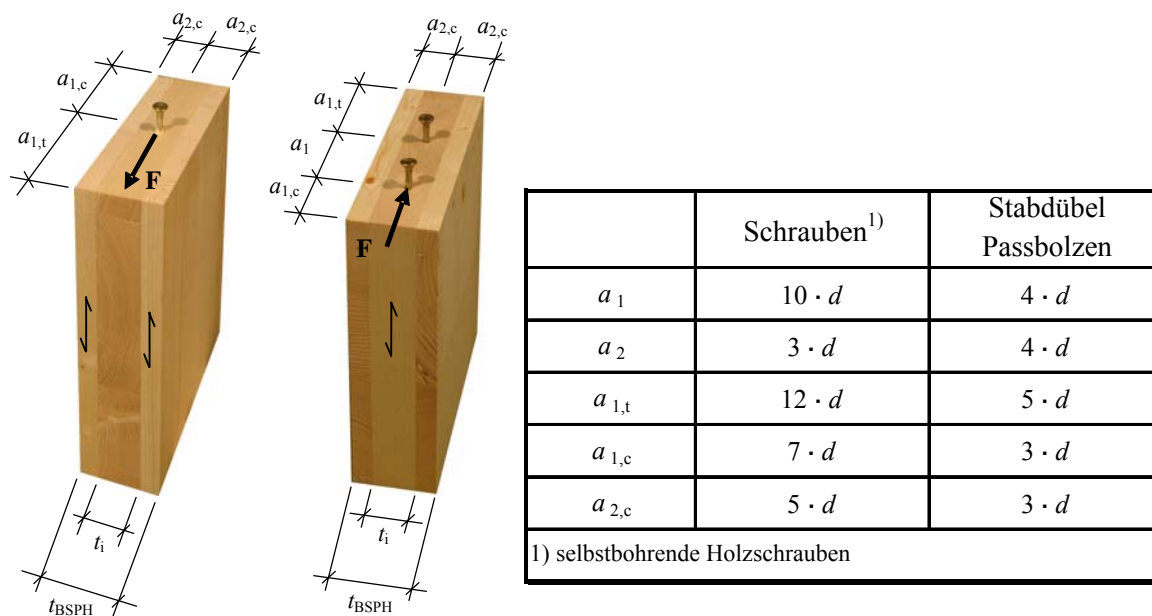
Tabelle 3: Mindestabstände von Verbindungsmitteln in den Seitenflächen

Verbindungsmittel	$a_{1,t}$	$a_{1,c}$	$a_1$	$a_{2,t}$	$a_{2,c}$	$a_2$
Schrauben <sup>1)</sup>	$6 \cdot d$	$6 \cdot d$	$4 \cdot d$	$6 \cdot d$	$2,5 \cdot d$	$2,5 \cdot d$
Nägel	$(7 + 3 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$6 \cdot d$	$(3 + 3 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$(3 + 4 \cdot \sin \alpha) \cdot d$	$3 \cdot d$	$3 \cdot d$
Stabdübel Passbolzen	$5 \cdot d$	$4 \cdot d \cdot \sin \alpha$ (min. $3 \cdot d$ )	$(3 + 2 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$3 \cdot d$	$3 \cdot d$	$4 \cdot d$

$\alpha$  Winkel zwischen Krafterichtung und Faserrichtung der Decklagen

1) selbstbohrende Holzschrauben





**Bild 11: Mindestabstände von Verbindungsmitteln in den Schmalflächen.**

**Tabelle 4: Mindestdicken, Mindesteinbindetiefen und Mindestbrettlagendicken für Verbindungen in den Schmalflächen**

Verbindungsmittel	Mindestdicke der maßgebenden Brettlage $t_i$ in mm	Mindestdicke des Brettsperrholzes $t_{BSPH}$ in mm	Mindestdicke des BSPH/ Mindesteinbindetiefe der VM $t_1 / t_2$ in mm
Schrauben	$d > 8 \text{ mm: } 3 \cdot d$ $d \leq 8 \text{ mm: } 2 \cdot d$	$10 \cdot d$	$10 \cdot d$
Stabdübel Passbolzen	$d$	$6 \cdot d$	$5 \cdot d$

## 6 Langzeitverhalten

Mit in den Schmalflächen von Brettsperrholz angeordneten Verbindungsmitteln lassen sich Bauteile wirtschaftlich verbinden. Um diese Verbindungen effizient nutzen zu können, ist es erforderlich, auch Einwirkungen mit ständiger oder langer Lasteinwirkungsdauer (Eigengewicht, Nutzlasten) zuverlässig zu übertragen. Hierzu sind insbesondere für faserparallel angeordnete Verbindungsmittel Aussagen über das Langzeitverhalten erforderlich. Für Schraubenverbindungen in den Schmalflächen von BSPH wird das Langzeitverhalten zurzeit am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe untersucht. Hierzu werden sowohl Herausziehversuche als auch Zug-Scherversuche mit faserparallel in eine Brettlage eingedrehten, selbstbohrenden Holzschrauben durchgeführt, siehe Bild 12. Nach einem Beobachtungszeitraum von drei Jahren sollen diese Prüfkörper entlastet und die Resttragfähigkeit im Kurzzeitversuch ermittelt werden. Die Klimadaten werden über den Versuchszeitraum kontinuierlich erfasst.

Die Versuche werden im Freien unter einer Überdachung durchgeführt. Eine Bewitterung der Prüfkörper ist somit ausgeschlossen, so dass die klimatischen Verhältnisse der Nutzungsklasse 2 gemäß DIN 1052 entsprechen. Die Belastung der Prüfkörper erfolgt in Höhe des Bemessungswertes der Tragfähigkeit. Hierbei wurde bei den Versuchen mit rechtwinklig zur Stiftachse belasteten Schrauben der Modifikationsbeiwert für die Lasteinwirkungsdauer mit  $k_{mod} = 0,8$  berücksichtigt. Die Beanspruchung ist somit höher als für die Klasse der Lasteinwirkungsdauer ständig ( $k_{mod} = 0,6$ ). Bezogen auf die Standzeit der Versuche von drei Jahren kann so ein konservativer Wert für die Tragfähigkeit unter Langzeitbeanspruchung ermittelt werden. Bei den auf Herausziehen beanspruchten Schrauben wurde die Belastung auf 70% des Bemessungswertes der Tragfähigkeit für einem Modifikationsbeiwert von  $k_{mod} = 0,8$  reduziert.



**Bild 12: Langzeitversuche mit auf Herausziehen und mit auf Abscheren beanspruchten selbstbohrenden Holzschrauben**

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die effiziente Verwendung von Bauteilen aus Brettsper Holz erfordert es, diese untereinander und mit anderen Bauteilen zu verbinden. Eine wirtschaftliche Lösung hierfür bietet der Einsatz von stiftförmigen Verbindungsmitteln, die in den Seiten- und Schmalflächen von Brettsper Holz angeordnet werden können. Hierdurch ist es auch möglich, die Bauteile ohne zusätzliche Verbindungselemente wie z. B. Stahlblech-Winkel direkt zu verbinden.

Auf Grundlage der Ergebnisse eines Forschungsvorhabens konnten Vorschläge für die Bemessung von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsper Holz entwickelt werden.

Zur Berechnung der Tragfähigkeit von Holzschrauben und Sondernägeln unter axialer Beanspruchung werden Gleichungen zur Ermittlung der Herausziehtragfähigkeit angegeben. Die vorgestellten Berechnungsmodelle auf der Grundlage der Theorie von Johansen ermöglichen es, die Tragfähigkeit von Verbindungen unter Beanspruchung auf Abscheren zu ermitteln. Für die meisten Verbindungskonfigurationen kann die Tragfähigkeit mit einem vereinfachten Berechnungsansatz bestimmt werden.

Die zur Ermittlung der Verbindungsmitteltragfähigkeit erforderliche charakteristische Lochleibungsfestigkeit kann mit Hilfe der hierfür angegebenen Gleichungen berechnet werden.

In den Seitenflächen von Brettsper Holz sind geringe Abstände der Verbindungsmittel untereinander und zum Rand möglich. Außerdem wird ein Spaltversagen von Verbindungen durch die Querlagen verhindert. Diese Querspannung und das duktile Verhalten der Verbindung erlauben es, auf die Reduzierung der tatsächlichen Verbindungsmittelanzahl auf eine wirksame Anzahl zu verzichten ( $n_{ef} = n$ ).

Anschlüsse in den Seitenflächen von Brettsper Holz können folglich eine höhere Tragfähigkeit aufweisen als in Vollholz oder Brettschichtholz. Das bedeutet, dass sich mit stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsper Holz auf kleinen Anschlussflächen vergleichsweise große Kräfte übertragen lassen. In BSPH wird unter Ausnutzung der Mindestabstände häufig ein Bauteilversagen maßgebend. Aufgrund der kreuzweise verklebten Brettlagen weist BSPH eine geringere Tragfähigkeit in Faserrichtung der Decklagen auf als ein vergleichbarer Vollholzquerschnitt.

Bei den im Holzbau üblichen stabförmigen Bauteilen aus Voll- oder Brettschichtholz wird hingegen häufig die Querschnittsdimensionierung nicht durch die Bauteiltragfähigkeit, sondern durch die Größe der Anschlussflächen bestimmt. Hier bietet sich die Möglichkeit, das Potential von Brettsper Holz auch für diese Bauteile wie z. B. Zugstäbe zu nutzen. Durch Reduzierung der Brettstärke der Querlagen wäre es möglich, den Aufbau des Brettsper Holzes zur Übertragung von Zugkräften zu optimieren. Damit können für Stabtragwerke schlankere Bauteile eingesetzt werden, bei denen ein nahezu ausgeglichenes Verhältnis zwischen Bauteiltragfähigkeit und Anschlusstragfähigkeit besteht. Des Weiteren verfügen diese Bauteile über weitere positive Eigenschaften des Brettsper Holzes wie z. B. bezüglich des Quell- und Schwindverhaltens oder der Querspannungsfähigkeit.

## 8 Literatur

- [1] Bejtka, I.: Verstärkungen von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben. *Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau*, Band 2, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen (Hrsg.), Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2005
- [2] Blaß, H. J.; Bejtka, I.; Uibel, T.: Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde, *Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau*, Band 4, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen (Hrsg.), Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2006
- [3] Blaß, H. J.; Fellmoser, P.: Design of solid wood panels with cross layers. In: *Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering*, Volume II, Lahti, Finnland 2004.
- [4] Blaß, H. J.; Görlacher, R.: Bemessung im Holzbau – Brettsperrholz. Berechnungsgrundlagen, *Holzbaukalender 2003*. Bruderverlag, Karlsruhe 2003, S. 580-598
- [5] Blaß, H. J.; Görlacher, R.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von Brettsperrholz-Elementen bei Beanspruchung in Plattenebene, *Bauen mit Holz 104 (2002)*, H. 11 S. 34-41, H. 12 S. 30-34
- [6] Blaß, H. J.; Uibel, T.: Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsperrholz, *Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau*, Band 8, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen (Hrsg.), Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2007
- [7] Görlacher, R.: Brettsperrholz – Berechnung von Elementen mit kreuzweise verklebten Brettern bei Beanspruchung in Plattenebene In: Tagungsband: *Ingenieurholzbau - Karlsruher Tage*, Bruderverlag, Karlsruhe 2002.
- [8] Schickhofer, G.: Brettsperrholz – Anwendungen und Konstruktionsdetails im mehrgeschossigen Wohn- und Kommunalbau, In: Tagungsband: *Ingenieurholzbau - Karlsruher Tage*, Bruderverlag, Karlsruhe 2002.
- [9] DIN 1052:2004-08: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau