

**Blockscheren von Holzbauteilen
im Verbindungsbereich axial
beanspruchter Vollgewindeschrauben**

T 3373

T 3373

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0400-3

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Hans Joachim Blaß und Marcus Flaig

Blockscheren von Holzbauteilen im Verbindungsbereich axial beanspruchter Vollgewindeschrauben

Vorwort

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde die Tragfähigkeit von Holzbauteilen im Verbindungsbereich axial beanspruchter Vollgewindeschrauben bei Beanspruchungskomponenten rechtwinklig zur Faserrichtung untersucht. Insbesondere bei geringen Abständen der Schrauben untereinander besteht die Gefahr spröder Versagensmechanismen im Verbindungsbereich wie z.B. Quersugversagen oder Rollschubversagen. Aus diesem Grund enthält das EAD 130118-00-0603 „SCREWS FOR USE IN TIMBER CONSTRUCTIONS“ die Forderung nach einem entsprechenden Nachweis der Tragfähigkeit des Bauteils. Ein allgemein anerkanntes Nachweisverfahren existiert jedoch bisher nicht.

Das Forschungsprojekt „Blockscheren von Holzbauteilen im Verbindungsbereich axial beanspruchter Vollgewindeschrauben“ wurde vom Deutschen Institut für Bautechnik DIBt unter dem Geschäftszeichen P 52-5-13.192-2019/18 gefördert. Kooperationspartner war der Fachverband Werkzeugindustrie e. V. aus Remscheid.

Die Versuche wurden im HolzbauLaboratorium der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine am Karlsruher Institut für Technologie ausgeführt. Für die Herstellung der Versuchskörper und der Versuchseinrichtung waren die Labormitarbeiter Michael Deeg, Sören Hartmann und Martin Huber verantwortlich. Außerdem hat Herr B.Sc. Ewald Koch mit der Durchführung von Reihen- und Blockscherversuchen tatkräftig an diesem Forschungsvorhaben mitgewirkt.

Allen Beteiligten ist für ihre Mitarbeit zu danken.

Die Verfasser

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Versagensmechanismen in Holzverbindungen	7
2.1	Beanspruchung auf Abscheren in Faserrichtung	7
2.2	Beanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung	8
3	Rechenmodelle für Queranschlüsse	11
3.1	Foschi	11
3.2	Ehlbeck und Görlacher	13
3.3	Van der Put und Leijten	16
3.4	Mahlknecht und Brandner	18
3.5	Meyer und Blaß	22
4	Versuche	24
4.1	Reihenscheren	24
4.2	Blockscheren	28
4.2.1	Versuche von Mahlknecht und Brandner	28
4.2.2	Versuche von Ringhofer und Schickhofer	33
4.2.3	Versuche von Koch	39
5	Vorschlag für den Nachweis des Blockscherens	45
6	Zusammenfassung und Ausblick	49
	Literaturverzeichnis	51

1 Einleitung

Die Entwicklung selbstbohrender Holzschrauben hat im letzten Jahrzehnt große Fortschritte gemacht. Inzwischen werden Holzschrauben verwendet, die, je nach Verwendungsnachweis und abhängig von der Holzrohddichte, bis zu einem Durchmesser von 14 mm und Längen bis zu 1500 mm ohne Vorbohren in Nadelholz eingedreht werden können. Obwohl selbstbohrende Holzschrauben in außerordentlich großer Vielfalt erhältlich sind – z.B. als Schrauben mit glattem Schaftbereich, Vollgewindeschrauben, Schrauben mit unterschiedlichen Kopf- oder Gewindeformen oder aus unterschiedlichen Stahlsorten – unterscheidet sich die **Tragfähigkeit** für den Versagensmechanismus Herausziehen aus dem Holz bei gleichem Gewindeaußendurchmesser und gleicher Einschraubtiefe nur wenig.

Die mögliche **Schraubenanordnung**, insbesondere die Mindestabstände untereinander und vom Rand des Holzbauteils, unterscheiden sich je nach Hersteller und Schraubentyp oder Schraubenbeanspruchung (axial oder lateral) allerdings erheblich. Für Mindestabstände, die unterhalb der Werte in EN 1995-1-1 liegen, enthält das EAD 130118-00-0603 „SCREWS FOR USE IN TIMBER CONSTRUCTIONS“ Verfahren zum Nachweis der Eignung der Schrauben. Nach erfolgreich bestandenen Prüfungen dürfen die Schrauben dann mit geringeren als in EN 1995-1-1 angegebenen Mindestabständen bzw. Holzdicken verwendet werden. Allerdings fordert EAD 130118-00-0603 Abschnitt 2.2.10.2 in diesem Fall einen Blockschernachweis bei der Bemessung der angeschlossenen Holzbauteile:

„Are the spacing, end and edge distances less than the distances and thicknesses given in EN 1995-1-1 the verification of resistance according to EN 1995-1-1:2004 +AC:2006 + A1:2008, clause 8.7.2 (1) the failure along the circumference of a group of screws has to be considered also for connections without steel plates. That has to be pointed out in the European Technical Assessment of the screws.“

Während EN 1995-1-1 im informativen Anhang A ein Nachweisverfahren für das Blockscherversagen **auf Abscheren** in Faserrichtung beanspruchter stiftförmiger Verbindungsmittel in Stahlblech-Holz-Verbindungen enthält, sind entsprechende Nachweise für auf Abscheren beanspruchte Holz-Holz-Verbindungen bzw. für **auf Herausziehen** rechtwinklig zur Faserrichtung beanspruchte Schraubengruppen für Tragwerksplaner nicht ohne Weiteres verfügbar. Unter Fachleuten wird

diskutiert, ob die Bemessungsregel in Gleichung (8.41) der Norm EN 1995-1-1, mit der eine wirksame Anzahl n_{ef} der in einer Verbindung zusammenwirkenden, in Schaftrichtung beanspruchten Schrauben berechnet wird, ausreichend zuverlässig auch den Versagensmechanismus „Blockscheren“ bei Bauteilen aus Nadelholz abdeckt.

Um selbstbohrende Vollgewindeschrauben als hocheffiziente und wirtschaftliche Verbindungsmittel im Holzbau mit ausreichender Zuverlässigkeit verwenden zu können, sind zutreffende Werte der Tragfähigkeit kompakter, axial beanspruchter Schraubengruppen dringend erforderlich. Für diejenigen Fälle, in denen der Tragfähigkeitsverlust durch den Versagensmechanismus Blockscheren nicht ausreichend durch die wirksame Anzahl n_{ef} berücksichtigt wird, ist das Blockscheren unmittelbar sicherheitsrelevant.

Eine zutreffende Bemessungsmethode zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben und reduzierten Mindestabständen ist daher sowohl als Grundlage zukünftiger Regeln in der europäischen Bemessungsnorm Eurocode 5 wie auch durch die Forderung des Europäischen Bewertungsdokuments (EAD 130118-00-0603) für selbstbohrende Holzschrauben unentbehrlich.

2 Versagensmechanismen in Holzverbindungen

2.1 Beanspruchung auf Abscheren in Faserrichtung

Die Bemessung von Holzverbindungen mit auf Abscheren beanspruchten stiftförmigen Verbindungsmitteln in vielen Bemessungsnormen basiert auf dem erstmals von Johansen [1] veröffentlichten vereinfachten Fließgelenkmodell mit ausschließlich duktilen Versagensmechanismen. Das Holz versagt in diesem Modell ausschließlich durch Erreichen der Lochleibungsfestigkeit, der Stift kann zusätzlich seine Biegetragfähigkeit in einem oder mehreren Fließgelenken erreichen. Dieses Modell beschreibt die Tragfähigkeit eines einzelnen Stiftes im Holz zutreffend, später wurde es durch Stahlblech-Holz-Verbindungen oder durch die Berücksichtigung des Seileffekts erweitert.

In Holzkonstruktionen enthalten mechanische Verbindungen in der Regel mehr als einen einzigen Stift. Tragfähigkeitsversuche mit Verbindungen mit mehreren Stiften zeigen, dass vor dem Erreichen ausgeprägter plastischer Verformungen spröde Versagensmechanismen im Holz auftreten können. Dies wird tritt umso häufiger sein, je größer die Anzahl in Kraft- und Faserrichtung hintereinander angeordneter Verbindungsmittel ist, je größer das Verhältnis aus Stiftdurchmesser zu Holzdicke ist oder je kleiner die Abstände der Verbindungsmittel untereinander oder vom beanspruchten Hirnholzende sind.

Der Einfluss spröder Versagensmechanismen wird in der Bemessung durch Beiwerte oder eine rechnerische Verringerung der tatsächlichen Anzahl der Verbindungsmittel im Anschluss berücksichtigt. Die spröden Versagensmechanismen sind dabei Zugversagen im Nettoquerschnitt, Blockscheren, Reihenscheren und Aufspalten (siehe Bild 2-1). Systematische Untersuchungen zum Blockscheren in Verbindungen mit auf Abscheren beanspruchten stiftförmigen Verbindungsmitteln bei einer Beanspruchung in Faserrichtung wurden erstmals von Foschi [3] sowie Foschi und Longworth [4] durchgeführt. Spätere Arbeiten wurden von Quenneville und Mohammad [5], Johnsson [6], Marjerrison [7] und insbesondere Zarnani [8] veröffentlicht.

Neuere Ansätze (Quenneville [2]) berücksichtigen explizit die unterschiedlichen spröden Versagensmechanismen mit den zugehörigen Festigkeitseigenschaften des Holzes wie z.B. der Zugfestigkeit parallel zur Faser $f_{t,0}$ oder der Schubfestigkeit f_v .

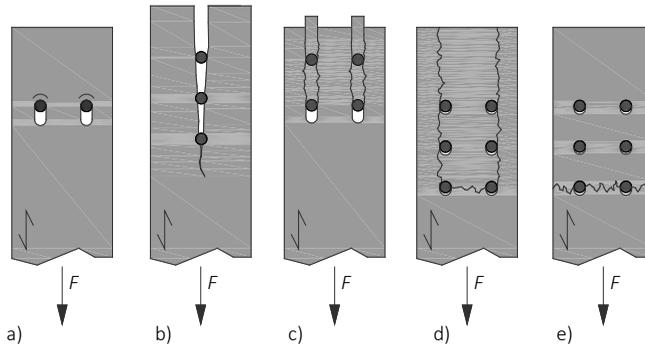


Bild 2-1 Versagensmechanismen des Holzes in Verbindungen mit auf Abscheren in Faserrichtung beanspruchten stiftförmigen Verbindungsmitteln, (a) Lochleibung, (b) Aufspalten, (c) Reihenscheren, (d) Blockscheren, (e) Zugversagen im Nettoquerschnitt

2.2 Beanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung

Während das Blockscheren parallel zur Faser bereits Eingang in die Bemessungsregeln des Eurocode 5 gefunden hat, liegen zum Blockscheren rechtwinklig zur Faser, das durch axial auf Herausziehen beanspruchte Schraubengruppen verursacht werden kann, keine allgemein anerkannten expliziten Bemessungsregeln vor. Allerdings kann auch bei axial beanspruchten Schrauben der geplante Versagensmechanismus „Herausziehen der Schraube aus dem Holz“ oder „Zugversagen der Schraube“ durch ein vorzeitiges sprödes Versagen des Holzbauteils verhindert und die Tragfähigkeit des Anschlusses dadurch verringert werden. Auch hier gilt, dass bestimmte Parameter diese vorzeitigen spröden Versagensmechanismen begünstigen. Spröde Versagensmechanismen treten häufiger bei geringen Abständen der Schrauben untereinander insbesondere in Faserrichtung oder bei geringen Verhältniswerten von Einschraubtiefe zu Bauteildicke auf. Analog zur wirksamen Verbindungsmittelanzahl bei auf Abscheren beanspruchten stiftförmigen Verbindungsmitteln wird auch bei mehreren auf Herausziehen beanspruchten Schrauben die tatsächliche Schraubenanzahl für die Bemessung

rechnerisch verringert. Dies geschieht allerdings grundsätzlich und damit nicht nur in denjenigen Fällen, in denen die genannten Parameter spröde Versagensmechanismen begünstigen.

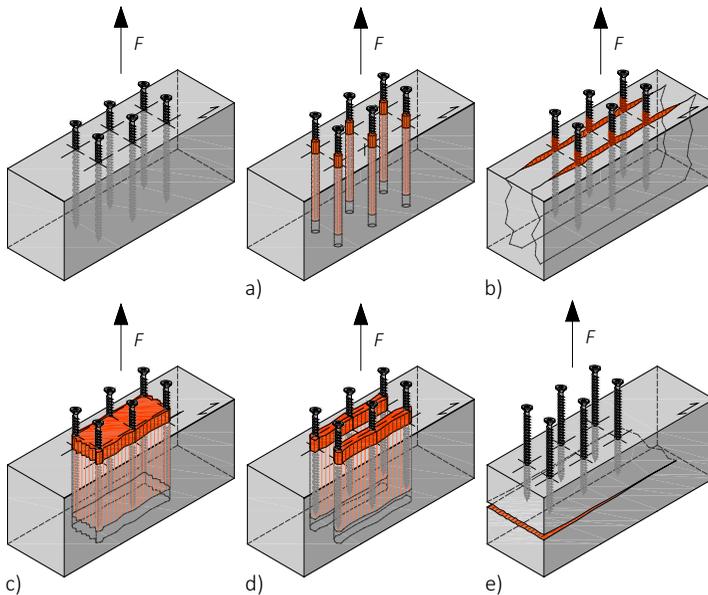


Bild 2-2 Versagensmechanismen des Holzes in Verbindungen mit auf Herausziehen rechtwinklig zur Faserrichtung beanspruchten stiftförmigen Verbindungsmitteln, (a) Herausziehen des Gewindes aus dem Holz, (b) Aufspalten, (c) Blockscheren, (d) Reihenscheren, (e) Querzugversagen

Lediglich das durch Querzugbeanspruchungen verursachte Spalten von Holzbau­teilen im Bereich von Queranschlüssen (Versagensmechanismus (e) in Bild 2-2) wird in Bemessungsregeln explizit berücksichtigt. Erste Untersuchungen hierzu stammen von Foschi [9] sowie Ehlbeck und Görlacher [10], spätere Arbeiten wurden u.a. von Van der Put und Leijten [11], Kasim und Quenneville [12], Franke und Quenneville [13] oder Jensen et al. [14] veröffentlicht. Allerdings wird in der Bemessung von Queranschlüssen lediglich die Querzugfestigkeit bzw. die Bruchenergie im Modus 1 berücksichtigt, beim Blockscheren kann darüber hinaus der Rollschubwiderstand zur Tragfähigkeit beitragen (siehe Bild 2-3 und Bild 2-4).



Bild 2-3 Blockscherversagen (Versagensmechanismus (c) in Bild 2-2) bei Endauflagern mit aufgeschraubten Blechen und Schrauben über die ganze Höhe des Holzbauteils



Bild 2-4 Reihenscherversagen (Versagensmechanismus (d) in Bild 2-2) bei Schraubenauszugsversuchen in LVL von Carradine et al. 2009 [16]

Die vorliegende Untersuchung hat zum Ziel, in der Bemessung von Queranschlüssen neben der Querkrafttragfähigkeit des Holzes auch dessen Schub- und Rollschubwiderstand explizit zu berücksichtigen und dadurch eine wirklichkeitsnähere Bemessung der Anschlussbereiche von axial beanspruchten Schraubengruppen insbesondere mit reduzierten Abständen untereinander in Faserrichtung zu ermöglichen. Dazu werden im nächsten Abschnitt die bisher bekannten Bemessungsmodelle vorgestellt und kurz bewertet.

3 Rechenmodelle für Queranschlüsse

3.1 Foschi

Foschi untersuchte die Tragfähigkeit stabförmiger Holzbauteile mit Queranschlüssen am Beispiel von einschnittig beanspruchten Nagelverbindungen mit „glulam rivets“. Glulam rivets sind Nägel mit Rechteckquerschnitt (3,2 mm x 6,4 mm) für Stahlblech-Holz-Verbindungen, die längere Querschnittsseite wird immer parallel zur Faser ausgerichtet. Für die Versuche wurde Brettschichtholz aus Douglasie verwendet. Die Verbindungen waren in der Nähe des freien Trägers angeordnet.

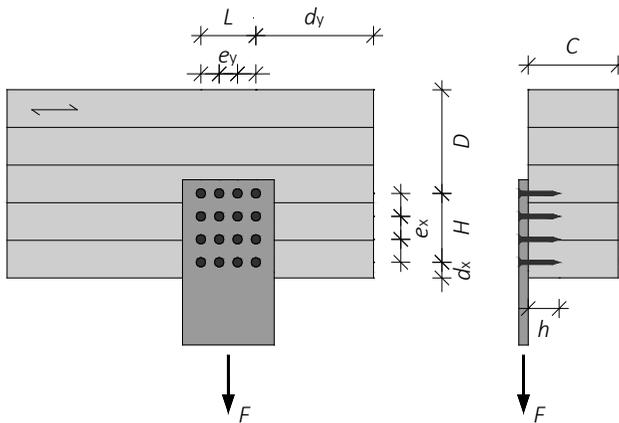


Bild 3-1 Versuchsanordnung von Foschi [9] aus [17]

Foschi berechnete die Querkzugspannungsverteilung im Holzbauteil mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode und leitete daraus eine Gleichung zur Bestimmung der Querkzugtragfähigkeit ab:

$$P_t = \frac{\sigma \cdot A_t \cdot r}{K_t \cdot \beta_t \cdot \beta_D} \quad (3-1)$$

Hierin bedeuten:

$$A_t = L \cdot h$$

L Länge des Anschlussbildes in Faserrichtung, $L = (NR - 1) \cdot e_y$

h Eindringtiefe der glulam rivets

NC Anzahl der Nägel in einer Spalte rechtwinklig zur Faser

NR Anzahl der Nägel in einer Reihe parallel zur Faser

e_x Nagelabstand rechtwinklig zur Faserrichtung

e_y Nagelabstand in Faserrichtung

P_t Tragfähigkeit des Queranschlusses

σ Querkzugfestigkeit des Holzes

K_t, β_t, β_D Beiwerte zur Berücksichtigung der Verbindungsmittelanordnung

D Abstand zwischen Trägeroberkante und oberster Nagelreihe

r Beiwert zur Berücksichtigung der Trägerbreite

Die Beiwerte K_t , β_t und β_D sind in Tabellenform angegeben und hier nicht wiedergegeben. Die Werte von K_t sind abhängig von der Anzahl der Nägel rechtwinklig und parallel zur Faser im Anschluss, β_t wird von der Anzahl der Nägel rechtwinklig zur Faser sowie von den Nagelabständen rechtwinklig und parallel zur Faser beeinflusst, während β_D vom Verhältnis D/H abhängt. Hierin ist H die Höhe des Anschlussbildes.

Das von Foschi veröffentlichte Rechenverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen mit Queranschlüssen gilt nur für glulam rivets als Verbindungsmittel und ist auf die von ihm betrachteten Anschlussbilder beschränkt.

3.2 Ehlbeck und Görlacher

Ehlbeck und Görlacher untersuchten ebenfalls die Tragfähigkeit stabförmiger Holzbauteile mit Queranschlüssen mit einschnittig beanspruchten Nagelverbindungen mit Sondernägeln der Durchmesser 4 mm und 6 mm für die Stahlblech-Holz-Nagelung. Bild 3-2 zeigt die Bezeichnungen für die Queranschlüsse.

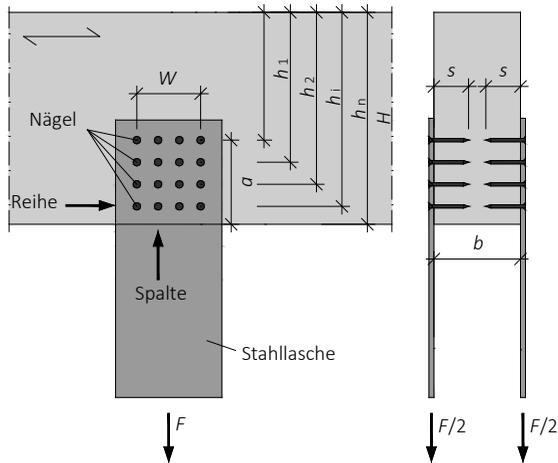


Bild 3-2 Bezeichnungen für Queranschlüsse nach Ehlbeck und Görlacher [10]

Für die Versuche wurde Brettschichtholz aus Fichte/Tanne verwendet. Folgende Versuchsparameter wurden variiert:

- Lage des Anschlusses bezüglich der geometrischen Längsachse des Trägers, d. h. Variation des Verhältniswertes a/H ;
- Lage des Anschlusses in Trägermitte oder am Kragarmende;
- Gegenseitiger Abstand von zwei Anschlüssen;
- Spannweite und Breite des Trägers;
- Nageldurchmesser und Nagellänge;

Ehlbeck und Görlacher schlagen folgende Gleichung zur Bestimmung der Querzugtragfähigkeit vor:

$$F_u = \frac{f_{t,90} \cdot A_{ef}}{\eta \cdot k} \quad (3-2)$$

Mit:

$$\eta = 1 - 3 \cdot \left(\frac{a}{H}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{a}{H}\right)^3 \quad (3-3)$$

$$k = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{h_1}{h_i}\right)^2 \quad (3-4)$$

$$A_{ef} = W_{ef} \cdot b_{ef} \quad (3-5)$$

$$W_{ef} = \sqrt{W^2 + \frac{16 \cdot a \cdot H}{9} \cdot \left(1 - \frac{a}{H}\right)^3} \quad (3-6)$$

$$b_{ef} = \min\left\{\sum s; b\right\} \text{ mit } s \leq 15 \cdot d \quad (3-7)$$

Die Querzugfestigkeit des Brettschichtholzes wurde abhängig von der querzugbeanspruchten Fläche wie folgt vorgeschlagen:

$$f_{t,90} = 10 \cdot A_{ef}^{-0,2} \quad (3-8)$$

Hierin bedeuten:

F_u Querzugtragfähigkeit in N

$f_{t,90}$ Querzugfestigkeit in N/mm²

A_{ef} wirksame Querzugfläche in mm²

a Größter Abstand einer Nagelreihe vom beanspruchten Rand in mm

H	Trägerhöhe in mm
h_i	Abstand der Nagelreihe i vom unbeanspruchten Rand in mm
W	Länge des Anschlussbildes in Faserrichtung in mm
s	Nageleindringtiefe in mm

Das von Ehlbeck und Görlacher vorgeschlagene Bemessungsmodell für Queranschlüsse mit Stahlblech-Holz-Nagelverbindungen wurde zunächst mit zulässigen Querkzugspannungen verwendet. Mit der Änderung des Normenformats der DIN 1052:2004 auf das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte wurden die Nachweisgleichungen gestrafft, auf sämtliche stiftförmige Verbindungsmittel sowie auf Dübel besonderer Bauart erweitert und durch folgende Gleichung zur Bestimmung der Querkzugtragfähigkeit $F_{90,R}$ ersetzt:

$$F_{90,R} = k_s \cdot k_r \cdot \left(6,5 + \frac{18 \cdot a^2}{h^2} \right) \cdot (t_{ef} \cdot h)^{0,8} \cdot f_{t,90} \quad (3-9)$$

Mit:

$$k_s = \max \left\{ 1; 0,7 + \frac{1,4 \cdot a_r}{h} \right\} \quad (3-10)$$

$$k_r = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_1}{h_i} \right)^2} \quad (3-11)$$

Hierin bedeuten:

$F_{90,R}$	Querkzugtragfähigkeit in N
$f_{t,90}$	Querkzugfestigkeit in N/mm ²
k_s	Beiwert zur Berücksichtigung mehrerer nebeneinander angeordneter Verbindungsmittel
k_r	Beiwert zur Berücksichtigung mehrerer übereinander angeordneter Verbindungsmittel

a_r	Länge des Anschlussbildes in Faserrichtung in mm
h	Trägerhöhe in mm
h_i	Abstand der Nagelreihe i vom unbeanspruchten Rand in mm
t_{ef}	Wirksame Eindringtiefe der Verbindungsmittel in mm

Das in DIN 1052:2004 enthaltene Nachweisverfahren für Queranschlüsse enthält erstmals auch die Möglichkeit, Verbindungen mit zugbeanspruchten Verbindungsmitteln wie z.B. eingeklebte Stahlstäbe zu bemessen. Dabei werden die Verbindungsmittel nicht in die Trägerseiten eingebracht wie z.B. in Bild 3-2 dargestellt, sondern in die Trägerunterseite. Der Riss entsteht dabei nicht mehr in der Ebene der obersten auf Abscheren beanspruchten Verbindungsmittelreihe, sondern in einer Ebene, die von den Enden der auf Herausziehen beanspruchten Verbindungsmittel im Holz definiert wird. Für diesen Fall ist die wirksame Eindringtiefe, die der Breite der querzugbeanspruchten Fläche rechtwinklig zur Trägerachse entspricht, als Kleinstwert aus der Trägerbreite und dem sechsfachen des Verbindungsmitteldurchmessers definiert. Damit ist dieses Bemessungsverfahren auch für zugbeanspruchte Schrauben anwendbar.

3.3 Van der Put und Leijten

Auf der Grundlage der Bruchmechanik und durch Auswertung von Versuchsergebnissen wurde von Van der Put und Leijten [11] folgender Nachweis für Queranschlüsse in Nadelholz vorgeschlagen, der später auch in den Eurocode 5 aufgenommen wurde:

$$F_{90,R} = 14 \cdot b \cdot w \cdot \left(\frac{h_e}{\left(1 - \frac{h_e}{h} \right)} \right) \quad (3-12)$$

Hierin bedeuten:

$F_{90,R}$ Querzugtragfähigkeit für Verbindungen in Nadelholz in N

b Trägerbreite in mm

h_e Abstand der vom beanspruchten Holzrand am weitesten entfernt angeordneten Verbindungsmittel in mm

h Trägerhöhe in mm

$$w = \begin{cases} \max \left\{ 1; \left(\frac{w_{pl}}{100} \right)^{0,35} \right\} & \text{für Nagelplatten} \\ 1 & \text{für andere Verbindungsmittel} \end{cases} \quad (3-13)$$

w_{pl} Nagelplattenbreite in Faserrichtung in mm

In Gleichung (3-12) sind Parameter der linear-elastischen Bruchmechanik wie die kritische Bruchenergie G_c oder der Schubmodul des Holzes G bereits eingearbeitet. Dies ist der Grund, weshalb Gleichung (3-12) nur für Nadelhölzer gilt, da lediglich Ergebnisse aus Versuchen mit Nadelholz herangezogen wurden. Auch ist auffällig, dass Materialeigenschaften wie bspw. die Querkzugfestigkeit $f_{t,90}$ in Gleichung (3-12) nicht auftauchen, sondern lediglich geometrische Informationen zur Bestimmung der Querkzugtragfähigkeit notwendig sind.

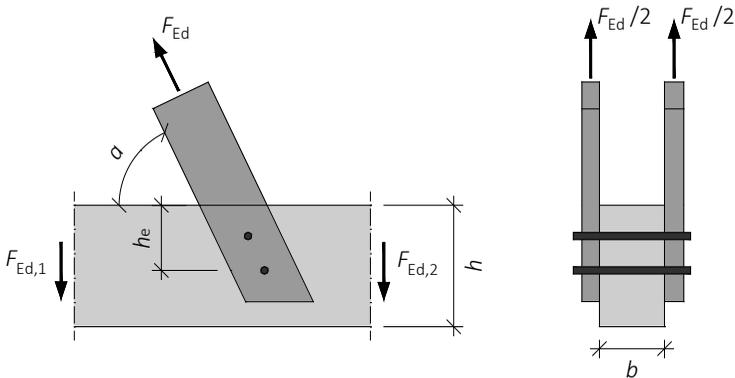


Bild 3-3 Unter einem Winkel zur Faserrichtung wirkende Anschlusskraft [10]

Ein Problem des oben dargestellten Nachweises ist die Tatsache, dass er nur für die in Bild 3-3 gezeigte Verbindungskonfiguration gültig ist. Bei baupraktischen Problemen treten jedoch meist andere Verbindungskonfigurationen mit mehr als einer Verbindungsmittelreihe auf. Ein Verteilen der Verbindungsmittel über eine größere Länge in Faserrichtung verringert die Querzugspannungen und erhöht damit die Tragfähigkeit.

3.4 Mahlknecht und Brandner

Mahlknecht und Brandner [19] untersuchten das Tragverhalten von Anschlüssen mit axial beanspruchten Schraubengruppen an Prüfkörpern aus Brettschichtholz (BSH) und Brettsperrholz (BSP). Für Brettschichtholz wurden Versuche für die Krafrichtungen von 45° und 90° zur Faserrichtung durchgeführt, für Brettsperrholz nur für 90°. Das von Mahlknecht und Brandner vorgeschlagene Bemessungsmodell zur Berücksichtigung des Blockscherversagens bei Beanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes lehnt sich an die Vorgehensweise von Zarnani [8] für das Blockscherversagen bei Beanspruchung parallel zur Faser an. Hierbei werden die Steifigkeiten der auf Querzug, Rollschub oder Schub beanspruchten Flächen des Quaders (siehe Bild 3-4) als lineare Federsteifigkeiten ermittelt und zunächst diejenige Fläche(n) bestimmt, für die das Verhältnis aus Tragfähigkeit zu Steifigkeit – also die Bruchverformung – am geringsten ist. Die Beanspruchungen der noch intakten Flächen (Federn) bei der Bruchverformung der 1. Fläche wird zur Tragfähigkeit der zuerst versagenden Fläche addiert. Die Summe der Beiträge sämtlicher Flächen ist dann die Tragfähigkeit des Anschlusses, falls nicht nach dem Versagen der ersten Feder die aufnehmbaren Lasten der beiden übrig gebliebenen Federn höher sind. Dies wird durch eine Ausfallbetrachtung der zuerst versagenden Feder und gegebenenfalls auch der zweiten ausfallenden Feder überprüft.

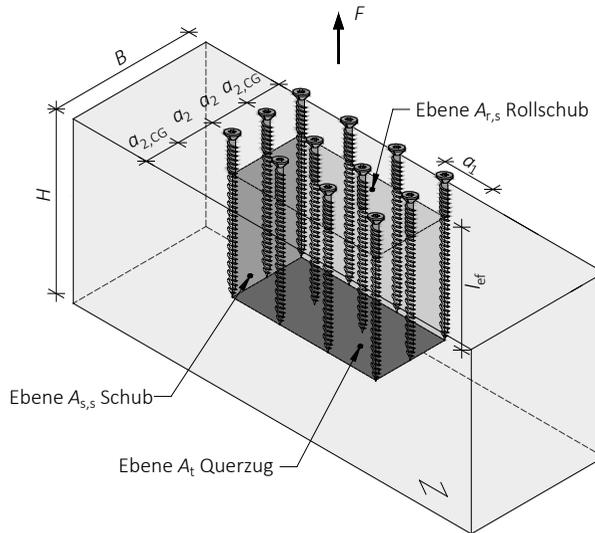


Bild 3-4 Auf Querzug, Rollschub oder Schub beanspruchte Flächen des die Schraubengruppe umhüllenden Quaders

Die Tragfähigkeit des Anschlusses beträgt beim Versagensmechanismus Blockscheren:

$$F_{90,R} = F_{t,90} + 2 \cdot F_r + 2 \cdot F_s \quad (3-14)$$

Die Federsteifigkeit einer durch Querzug, Rollschub oder Schub beanspruchten Fläche wird berechnet zu:

$$K_{t,90} = \frac{E_{t,90,mean} \cdot A_t}{0,8 \cdot l_{ef}} \quad (3-15)$$

$$K_r = \frac{G_{90,mean} \cdot A_{r,s}}{0,5 \cdot (s-1) \cdot a_2} + \frac{E_{t,90,mean} \cdot A_t}{20 \cdot l_{ef}} \quad (3-16)$$

$$K_s = \frac{G_{0,mean} \cdot A_{s,s}}{(r-1) \cdot a_1} + \frac{E_{t,90,mean} \cdot A_t}{10 \cdot l_{ef}} \quad (3-17)$$

Damit beträgt die Gesamtfedersteifigkeit vor dem Erreichen der Tragfähigkeit einer Fläche:

$$K_{ges} = K_{t,90} + 2 \cdot K_r + 2 \cdot K_s \quad (3-18)$$

Die Größe einer auf Querzug, Rollschub bzw. Schub beanspruchten Fläche beträgt:

$$A_t = (r-1) \cdot a_1 \cdot (s-1) \cdot a_2 \quad (3-19)$$

$$A_{r,s} = (r-1) \cdot a_1 \cdot \ell_{ef} \quad (3-20)$$

$$A_{s,s} = (s-1) \cdot a_2 \cdot \ell_{ef} \quad (3-21)$$

Die Bruchverformung einer durch Querzug, Rollschub oder Schub beanspruchten Fläche beträgt unabhängig von derjenigen der anderen Flächen:

$$e_{t,90} = \frac{0,8 \cdot f_{t,90} \cdot A_t}{K_{t,90}}; e_r = \frac{0,8 \cdot f_{v,r} \cdot A_{r,s}}{K_r}; e_s = \frac{0,8 \cdot f_{v,90} \cdot A_{s,s}}{K_s} \quad (3-22)$$

Die Bruchverformung der ersten Fläche beträgt:

$$e_1 = \min\{e_{t,90}; e_r; e_s\} \quad (3-23)$$

Die beiden verbleibenden Bruchverformungen sind e_2 und $e_3 = \max\{e_{t,90}; e_r; e_s\}$.

Die Gesamtlast beim Bruch der ersten Fläche ergibt sich damit zu:

$$F_{1,R} = K_{ges} \cdot e_1 \quad (3-24)$$

Im nächsten Schritt wird die Steifigkeit K_1 derjenigen Fläche(n) mit der geringsten Bruchverformung e_1 zu Null gesetzt und mit der nächsthöheren Bruchverformung e_2 die Last beim Bruch der zweiten Fläche(n) berechnet:

$$F_{2,R} = (K_2 + K_3) \cdot e_2 \quad (3-25)$$

Hierin sind K_2 bzw. K_3 die Federsteifigkeiten der zu e_2 bzw. e_3 gehörenden Flächen. Die Last beim Bruch der dritten Fläche(n) ergibt sich analog zu:

$$F_{3,R} = K_3 \cdot e_3 \quad (3-26)$$

Die Blockschertragfähigkeit beträgt schließlich:

$$F_{90,R} = \max\{F_{1,R}; F_{2,R}; F_{3,R}\} \quad (3-27)$$

In den obigen Gleichungen bedeuten:

- $F_{t,90}$ durch Querkzug übertragene Last in der Ebene A_t in N (siehe Bild 3-4)
- F_r durch Rollschub übertragene Last in einer Ebene $A_{r,s}$ in N (siehe Bild 3-4)
- F_s durch Schub übertragene Last in einer Ebene $A_{s,s}$ in N (siehe Bild 3-4)
- ℓ_{ef} Eindringtiefe der Schraube im Holz in mm
- $E_{t,90,mean}$ Elastizitätsmodul des Holzes rechtwinklig zur Faser in N/mm^2
- $G_{0,mean}$ Schubmodul des Holzes in N/mm^2
- $G_{90,mean}$ Rollschubmodul des Holzes in N/mm^2
- r Anzahl der Schrauben in Faserrichtung
- s Anzahl der Schrauben rechtwinklig zur Faserrichtung
- a_1 Schraubenabstand untereinander in Faserrichtung in mm
- a_2 Schraubenabstand untereinander rechtwinklig zur Faserrichtung in mm
- $f_{t,90}$ Querkzugfestigkeit des Holzes in N/mm^2
- $f_{v,r}$ Rollschubfestigkeit des Holzes in N/mm^2
- $f_{v,90}$ Schubfestigkeit des Holzes bei Abscheren rechtwinklig zur Faser in N/mm^2

Das von Mahlknecht und Brandner vorgestellte Bemessungsverfahren unterstellt ein progressives Versagen der Flächen des die Schraubengruppe umhüllenden Quaders (siehe Bild 3-4) durch Querkzug, Rollschub und Schub. Ein Scherver-sagen der Flächen $A_{s,s}$ in den Querschnittsflächen des Holzes wurde allerdings nicht beobachtet, in Versuchen treten in Faserrichtung über die Quaderlänge

reichende Rollschubflächen auf. Auch bei bestimmten geometrischen Konfigurationen werden andere Versagensflächen als die Umhüllungsflächen des Quaders in Bild 3-4 auftreten: bei einem geringen Verhältnis Einschraubtiefe ℓ_{ef} zu Bauteilhöhe H und einer großen Breite $a_2 \cdot (s-1)$ des Anschlusses wird sich ähnlich wie beim Modell von Ehlbeck und Görlacher [10] ein Querkzugversagen in der Ebene der Schraubenspitzen über die gesamte Breite B des Holzbauteils einstellen und Rollschub in den Flächen $A_{r,s}$ tritt nicht auf. Bei einem großen Verhältnis Einschraubtiefe ℓ_{ef} zu Bauteilhöhe H wird sich dagegen das Rollschubversagen der Flächen $A_{r,s}$ über die gesamte Bauteilhöhe H ausbreiten und Querkzugversagen in der Fläche A_r tritt wie z.B. in Bild 2-3 gezeigt nicht auf. Um diese alternativen Versagensflächen zu berücksichtigen, wäre eine Betrachtung sämtlicher sich möglicherweise einstellender Bruchflächen erforderlich, was das ohnehin bereits komplexe Bemessungsmodell in der Anwendung weiter erschweren würde.

3.5 Meyer und Blaß

Meyer und Blaß [22] untersuchten das Tragverhalten von Anschlüssen mit eingeklebten Stahlstäben in Furnierschichtholz aus Buche. Es wurden Anschlüsse mit axial beanspruchten metrischen Gewindestangen untersucht, die zwischen 0° und 90° zur Faserrichtung des Furnierschichtholzes angeordnet waren. Bei Anschlüssen rechtwinklig zur Faser mit mehreren Gewindestangen war die Tragfähigkeit des Anschlusses geringer als die einer einzelnen Gewindestange, multipliziert mit der Anzahl der Gewindestangen. Dieser scheinbare Verlust an Tragfähigkeit wurde bei den rechtwinklig zur Faserrichtung angeordneten Gewindestangen durch Reihenscheren (siehe Bild 2-2 (c)) verursacht: Ein Block Holz jeweils zwischen zwei in Faserrichtung hintereinander angeordneten Gewindestangen wird mit den Gewindestangen aus dem Holz herausgezogen.

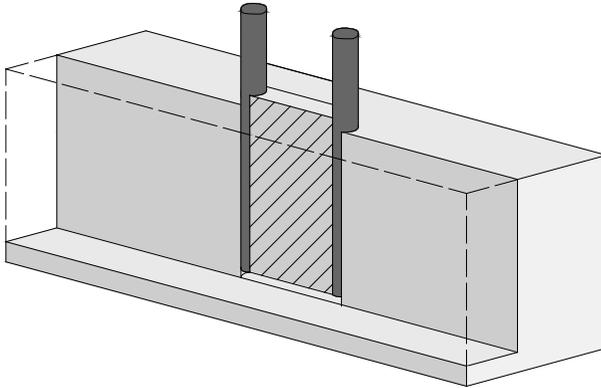


Bild 3-5 Rollschubversagen des Holzes zwischen zwei axial beanspruchten Verbindungsmitteln

Die Tragfähigkeit $F_{90,R}$ beim Versagensmechanismus „Reihenscheren“ beträgt mit den Bezeichnungen aus 3.4:

$$F_{90,R} = 2 \cdot (r - 1) \cdot f_{v,r} \cdot \ell_{ef} \cdot a_1 + f_{ax} \cdot \ell_{ef} \cdot d \quad (3-28)$$

Hierin bedeuten:

f_{ax} Ausziehparameter der Schraube in N/mm^2

d Verbindungsmitteldurchmesser in mm

4 Versuche

4.1 Reihenscheren

Tragfähigkeitsversuche mit zugbeanspruchten Schrauben in den Schmalflächen von Furnierschichtholz aus *Pinus Radiata* von Carradine et al. [16] zeigen Scherversagen in den Umfangsflächen von Schrauben, die in einer Reihe hintereinander angeordnet sind. Die Untersuchungen von Carradine et al. resultierten allerdings nicht in einer näheren Beschreibung des Versagensmechanismus oder der Entwicklung eines Bemessungsmodells für den Versagensmechanismus „Reihenscheren“. Für das verwendete Furnierschichtholz ist die Rollschubfestigkeit nicht angegeben, ein Vergleich mit dem Bemessungsmodell in Abschnitt 3.5 ist daher nur schwer möglich. Aus diesem Grund wurden im Rahmen einer von den Verfassern betreuten Masterarbeit [17] 28 Reihenscherversuche durchgeführt. Sämtliche Versuche sind in [17] im Detail dokumentiert.

Schrauben

Für die Versuche wurden Schrauben der Durchmesser 6 mm und 8 mm nach ETA-11/0190 gewählt. Es wurden Voll- und Teilgewindeschrauben verwendet, die Schrauben wiesen jedoch stets eine Gewindelänge auf, die größer als die Einschraubtiefe im Holz war. Die Schraubenlöcher wurden mit Durchmessern von 4 mm bzw. 5 mm für die Schraubendurchmesser 6 mm bzw. 8 mm vorgebohrt. Die Ausziehtragfähigkeit der Schrauben wurde durch jeweils 10 Ausziehversuche mit Einschraubtiefen $l_{ef} = 10 \cdot d$ bestimmt. Die Ausziehparameter betragen im Mittel $f_{ax} = 16,3 \text{ N/mm}^2$ für $d = 6 \text{ mm}$ und eine mittlere Rohdichte des Brettschichtholzes von 387 kg/m^3 und $f_{ax} = 18,9 \text{ N/mm}^2$ für $d = 8 \text{ mm}$ und eine mittlere Rohdichte des Brettschichtholzes von 459 kg/m^3 . Die charakteristischen Ausziehparameter nach ETA-11/0190 bezogen auf eine Rohdichte von 350 kg/m^3 betragen $f_{ax,k} = 11,5 \text{ N/mm}^2$ für $d = 6 \text{ mm}$ und $f_{ax,k} = 11,0 \text{ N/mm}^2$ für $d = 8 \text{ mm}$.

Holz

Die Reihenscherversuche wurden mit Schrauben in Brettschichtholz aus Fichte $b/h = 150/100 \text{ mm}^2$ durchgeführt. Die Probekörper waren 600 mm lang. Die Festigkeitsklasse war nicht bekannt, es wurde jedoch die Holzfeuchte und die Rohdichte jedes Probekörpers nach dem Versuch bestimmt. Die Schrauben wurden in fehlerfreie Bereiche des Brettschichtholzes sowohl radial als auch tangential eingedreht.

Für die Lasteinleitung wurden Bauteile aus Furnierschichtholz aus Buche verwendet (siehe Bild 4-1). Der Lichtabstand in Faserrichtung des Brettschichtholzes zwischen den Schrauben und den Befestigungsplatten aus Stahl betrug für die Prüfkörper aus Brettschichtholz $a_v = 130 \text{ mm}$.

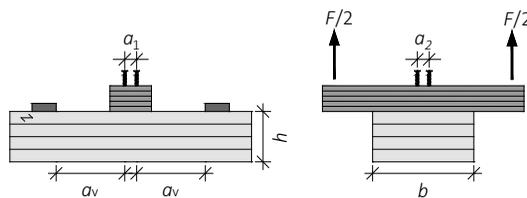


Bild 4-1 Versuchsanordnung für Reihenscherver- und Blockscherversuche aus [17]. Prüfkörper aus Brettschichtholz (unten) und Lasteinleiter aus Furnierschichtholz aus Buche (oben)

Versuche

Tabelle 4-1 zeigt eine Übersicht über die Reihenscherversuche. Versagensursache war bei den meisten Prüfkörpern mit einem Abstand $a_1 = 4 \cdot d$ (Versuchsreihen RS 1.1, RS 1.2, RS 2.1 und RS 2.2) Reihenscherversagen, einzelne Prüfkörper zeigten als Versagensursache Herausziehen der Schrauben aus dem Holz. Für die Prüfkörper mit einem Abstand $a_1 = 5 \cdot d$ (Versuchsreihen RS 3.1) wurde überwiegend Herausziehen der Schrauben aus dem Holz beobachtet. Bei zwei Prüfkörpern dieser Reihe wurde ein Stück Holz von der Oberfläche des Prüfkörpers mit herausgezogen. Bild 4-2 zeigt beispielhaft zwei Prüfkörper nach dem Versagen, ein Reihenscherversagen und ein kombiniertes Ausziehversagen mit Holzablösung.

Tabelle 4-1 Versuchsübersicht Reihenscherversuche

Versuchsreihe	RS 1.1	RS 1.2	RS 2.1	RS 2.2	RS 3.1
Anzahl Versuche	5	5	6	6	6
Orientierung Schraube	radial	tangential	radial	tangential	tangential
Schrauben $d \times \ell$ in mm	6 x 120	6 x 120	8 x 200	8 x 220	6 x 120
Anzahl r	3	3	3	3	3
Abstand a_1/d in mm	4	4	4	4	5
Einschraubtiefe ℓ_{ef} in mm	60	60	80	80	80



Bild 4-2 Reihenscherversagen im Prüfkörper RS 2.1 V4 (links) und kombiniertes Auszieh-Blockscherversagen im Prüfkörper RS 3.1 V3 (rechts)

Für den Vergleich der Versuchsergebnisse mit der Bemessungsgleichung (3-28) in Tabelle 4-2 werden die folgenden Parameter verwendet:

- Erwartete Zugtragfähigkeit der Schraube:
 $f_{tens} = 15 \text{ kN}$ für $d = 6 \text{ mm}$ und $f_{tens} = 26 \text{ kN}$ für $d = 8 \text{ mm}$
- Charakteristische Zugtragfähigkeit der Schraube:
 $f_{tens,k} = 12,5 \text{ kN}$ für $d = 6 \text{ mm}$ und $f_{tens,k} = 23 \text{ kN}$ für $d = 8 \text{ mm}$
- Erwarteter Ausziehparameter: $f_{ax} = 1,25 \cdot f_{ax,k} \cdot (\rho / 350)^{0,8}$
- Charakteristischer Ausziehparameter:
 $f_{ax,k} = 11,5 \text{ N/mm}^2$ für $d = 6 \text{ mm}$ und $f_{ax,k} = 11,0 \text{ N/mm}^2$ für $d = 8 \text{ mm}$
- Charakteristische Rohdichte des Brettschichtholzes: $\rho_k = 385 \text{ kg/m}^3$
- Erwartete Rollschubfestigkeit: $f_{v,r} = 2 \text{ N/mm}^2$
- Charakteristische Rollschubfestigkeit: $f_{v,r,k} = 1 \text{ N/mm}^2$

Tabelle 4-2 Gegenüberstellung der Höchstlasten aus den Versuchen mit den Ergebnissen der Gleichung (3-28) bzw. der Tragfähigkeit nach ETA

Versuch	F_{\max} in kN	ρ in kg/m ³	$F_{r,R}$ in kN	$F_{r,RK}$ in kN	$F_{ETA,R}$ in kN	$F_{ETA,RK}$ in kN
RS1.1V1	18,1	470	18,6	10,2	19,0	12,0
RS1.1V2	19,4	491	18,8	10,2	19,7	12,0
RS1.1V3	13,4	434	18,2	10,2	17,8	12,0
RS1.1V4	26,0	435	18,2	10,2	17,9	12,0
RS1.1V5	12,2	371	17,4	10,2	15,7	12,0
RS1.2V1	17,8	445	18,3	10,2	18,2	12,0
RS1.2V2	16,4	476	18,7	10,2	19,2	12,0
RS1.2V3	17,5	418	18,0	10,2	17,3	12,0
RS1.2V4	13,1	446	18,3	10,2	18,2	12,0
RS1.2V5	15,5	473	18,6	10,2	19,1	12,0
RS2.1V1	36,4	440	31,9	17,8	30,7	20,4
RS2.1V2	42,1	426	31,6	17,8	29,9	20,4
RS2.1V3	26,5	393	30,9	17,8	28,0	20,4
RS2.1V4	28,2	393	30,9	17,8	28,0	20,4
RS2.1V5	27,9	467	32,4	17,8	32,2	20,4
RS2.1V6	24,2	378	30,6	17,8	27,1	20,4
RS2.2V1	28,0	455	32,2	17,8	31,5	20,4
RS2.2V2	32,0	412	31,3	17,8	29,1	20,4
RS2.2V3	30,4	432	31,7	17,8	30,2	20,4
RS2.2V4	28,6	408	31,2	17,8	28,9	20,4
RS2.2V5	34,8	437	31,8	17,8	30,5	20,4
RS2.2V6	37,0	422	31,5	17,8	29,6	20,4
RS3.1V1	16,2	456	21,3	11,7	18,6	12,0
RS3.1V2	20,3	376	20,3	11,7	15,9	12,0
RS3.1V3	15,3	407	20,7	11,7	16,9	12,0
RS3.1V4	16,7	445	21,2	11,7	18,2	12,0
RS3.1V5	15,7	405	20,7	11,7	16,9	12,0
RS3.1V6	15,5	458	21,3	11,7	18,6	12,0

Bildet man die Verhältniszerte aus der Höchstlast im Versuch zur erwarteten Höchstlast, folgt ein **mittlerer** Verhältniszwert $F_{\max}/F_{r,R}$ von 0,93 und $F_{\max}/F_{ETA,R}$ von 0,98. Damit bildet das Modell des Reihenscherens nach Gleichung (3-28) die

Tragfähigkeit weniger gut ab als das Verfahren nach der ETA der Schrauben mit einer wirksamen Schraubenanzahl $n_{ef} = n^{0,9}$. Für ein ausreichend zuverlässiges Modell sollte der nach EN 14358 bestimmte **charakteristische** Verhältniswert aus Höchstlast im Versuch zur charakteristischen Tragfähigkeit den Wert 1,0 nicht unterschreiten. Für die in Tabelle 4-2 zusammengestellten Versuche betragen die **charakteristischen** Verhältniswerte $F_{max}/F_{r,Rk} = 1,14$ und $F_{max}/F_{ETA,Rk} = 1,03$. Die Minima dieser Verhältniswerte sind 1,19 bzw. 1,01. Damit führt sowohl das Modell Reihenscheren nach Gleichung (3-28) als auch die Bemessung nach ETA mit der axialen Tragfähigkeit der Schrauben und einer wirksamen Schraubenanzahl n_{ef} zu einer ausreichenden Tragfähigkeit von axial beanspruchten, in Reihen parallel zur Faser angeordneten Schrauben. Das Modell des Reihenscherens ist dabei etwas konservativer.

4.2 Blockscheren

4.2.1 Versuche von Mahlknecht und Brandner

Mahlknecht und Brandner [19] führten gezielte Tragfähigkeitsversuche mit zugbeanspruchten Schraubengruppen in den Seitenflächen von Brettschichtholz aus Fichte durch. Es wurden 103 Versuche mit axial belasteten Schraubengruppen in BSH mit den Winkeln 45° und 90° zwischen der Schraubenachse (Kraftrichtung) und der Faserrichtung und zusätzlich etwa 50 Versuche mit einzelnen axial beanspruchten Schrauben durchgeführt.

Folgende Parameter wurden variiert:

- Schraubendurchmesser $d = 6$ mm und $d = 8$ mm
- Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung 45° ($d = 6$ mm) und 90° ($d = 8$ mm)
- Anzahl der Schrauben pro Anschluss: $n = 8$ bis $n = 14$
- Abstand untereinander in Faserrichtung: $a_1 = 5,0 d$ bis $a_1 = 10,5 d$
- Abstand untereinander rechtwinklig zur Faserrichtung: $a_2 = 3,3 d$ bis $a_2 = 5,0 d$
- Einschraubtiefe: $\ell_{ef} = 18,5 d$ bis $\ell_{ef} = 31 d$
- Verhältnis Einschraubtiefe zu Bauteilhöhe: $\ell_{ef}/h = 0,41$ bis $\ell_{ef}/h = 0,88$

Schrauben

Für die Versuche wurden Schrauben der Durchmesser 6 mm und 8 mm nach ETA-12/0373 gewählt. Es wurden Voll- und Teilgewindeschrauben verwendet, die Schrauben wiesen jedoch stets eine Gewindelänge auf, die größer als die Einschraubtiefe im Holz war. Die Schraubenlöcher wurden nicht vorgebohrt. Die Auszieh- und Zugtragfähigkeit der Schrauben wurde durch über 50 Versuche mit Einschraubtiefen $\ell_{ef} = 18,5 \cdot d$ bis $\ell_{ef} = 31 \cdot d$ bestimmt. Die Ausziehparameter betragen im Mittel $f_{ax} = 22,2 \text{ N/mm}^2$ für $d = 6 \text{ mm}$ und eine mittlere Rohdichte des Brettschichtholzes von 488 kg/m^3 und $f_{ax} = 21,5 \text{ N/mm}^2$ für $d = 8 \text{ mm}$ und eine mittlere Rohdichte des Brettschichtholzes von 461 kg/m^3 . Die charakteristischen Ausziehparameter nach ETA-12/0373 bezogen auf eine Rohdichte von 350 kg/m^3 betragen $f_{ax,k} = 12,1 \text{ N/mm}^2$ für $d = 6 \text{ mm}$ und $f_{ax,k} = 10,9 \text{ N/mm}^2$ für $d = 8 \text{ mm}$. Die Zugtragfähigkeiten betragen im Mittel $15,6 \text{ kN}$ für $d = 6 \text{ mm}$ und $27,8 \text{ kN}$ für $d = 8 \text{ mm}$. Die charakteristischen Zugtragfähigkeiten nach ETA-12/0373 betragen $f_{tens,k} = 12,4 \text{ kN}$ für $d = 6 \text{ mm}$ und $f_{tens,k} = 22 \text{ kN}$ für $d = 8 \text{ mm}$.

Holz

Die Prüfkörper wurden aus BSH der Holzart Fichte hergestellt. Die Prüfkörper für die 90° -Versuche hatten die Querschnittsmaße Breite/Höhe $b/h = 180/180$ und $180/280 \text{ mm}$ und jene für die 45° -Versuche $160/200 \text{ mm}$. Die Prüfkörper für die Gruppenversuche wurden beidseitig mit 60 bis 70 mm breiten BSH-Trägern verklebt, um im Versuch eine höhere Steifigkeit bei Biegebeanspruchung in Prüfkörpermitte und genügend Auflagerfläche bei der Querdruckbeanspruchung an den Prüfkörperenden zu gewährleisten. Um einen möglichen Einfluss der seitlichen Verklebung auf den Tragwiderstand zu erhalten, wurden auch Prüfkörper ohne seitliche Verstärkung (osV) geprüft.

Die Prüfkörper wurden bei einer Holzfeuchte von 11,4% bis 16,0% verarbeitet und bis zu den Versuchen bei Normklima 20/65 nach ISO 554 gelagert.

Für die Lasteinleitung wurden Stahlteile verwendet. Die Lasteinleitung in das Stahlteil erfolgte über eine zentrale Lasche, die ein Eindrehen von einer oder zwei Schrauben im Zentrum des Schraubenbilds verhinderten (siehe Bild 4-3 und Bild 4-4).

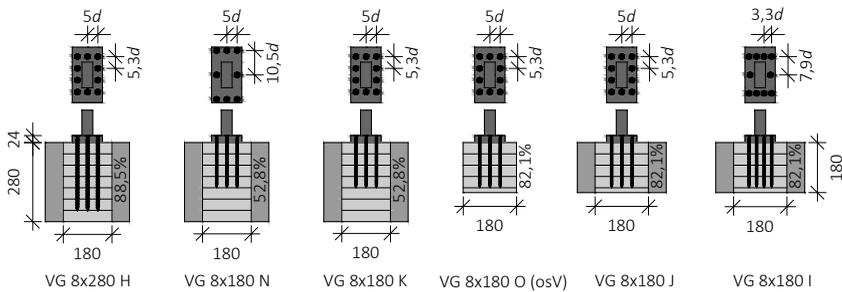


Bild 4-3 Anordnung der Schrauben und Prüfkörperquerschnitte der Versuche mit Schraubenanordnung 90° aus [19]

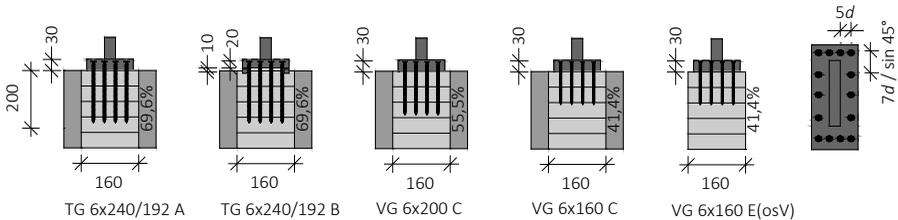


Bild 4-4 Anordnung der Schrauben und Prüfkörperquerschnitte der Versuche mit Schraubenanordnung 45° aus [19]

Versuche

Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 zeigen Übersichten über die Blockscherversuche mit unter 45° bzw. 90° zur Faserrichtung angeordneten Schrauben einschließlich der Versagensursachen. Für die Prüfkörper mit einer Einschraubtiefe $l_{ef} = 31 \cdot d$ (Versuchsreihen A, B und H) wurde ausschließlich Zugversagen der Schrauben beobachtet.

Tabelle 4-3 Versuchsübersicht Blockscherversuche 90°

Versuchsreihe	H	N	K	O	J	I
Anzahl Versuche	5	10	10	10	15	15
Schrauben $d \times \ell$ in mm	8 x 280	8 x 180	8 x 180	8 x 180	8 x 180	8 x 180
Anzahl r	4	3	4	4	4	3
Abstand a_1/d	5,3	10,5	5,3	5,3	5,3	7,9
Abstand a_2/d	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	3,3
Einschraubtiefe ℓ_{ef}/d	31	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5
Versagensursache	5 x S	3 x B 2 x R 5 x QZ	10 x B	6 x B 3 x R 1 x QZ	15 x B	15 x B

S ≡ Schraubenzug; B ≡ Blockscheren; R ≡ Rollschub; QZ ≡ Querzug

Tabelle 4-4 Versuchsübersicht Blockscherversuche 45°

Versuchsreihe	A	B	C	D	E
Anzahl Versuche	6	6	6	10	10
Schrauben $d \times \ell$ in mm	6 x 240	6 x 240	6 x 200	6 x 200	6 x 200
Anzahl r	5	5	5	5	5
Abstand a_1/d	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Abstand a_2/d	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Einschraubtiefe ℓ_{ef}/d	31	31	26	19,5	19,5
Versagensursache	6 x S	6 x S	5 x S 1 x QZ/Sb	10 x QZSb + R	10 x QZ/Sb

S ≡ Schraubenzug; QZ/Sb ≡ Querzug-Schub;

QZ/Sb+R ≡ Querzug-Schub mit Rollschub

Ein direkter Vergleich der Höchstlasten der einzelnen Versuche mit den Ergebnissen des Rechenmodells „Blockscheren“ oder der Bemessung nach ETA ist nicht möglich, da im Forschungsbericht [19] nur Mittelwerte der Versuchshöchstlasten der einzelnen Versuchsreihen angegeben sind. Allerdings ist aus den Abb. 14 und 18 in [19] erkennbar, dass kein einziger Wert der Tragfähigkeit aus den Versuchen unterhalb der charakteristischen Tragfähigkeit nach der ETA-

12/0373 lag. Dies bedeutet, dass die bisherige Bemessung auch für die geprüften Verbindungen mit Blockscherversagen eine ausreichende Tragfähigkeit ergibt.

Für den Vergleich der Versuchsergebnisse mit der Bemessungsgleichung (3-27) in Tabelle 4-5 werden die folgenden Parameter verwendet:

- mittlere Versuchshöchstlast der Reihe rechtwinklig zur Bauteilachse: F_{max}
- Erwartete Zugtragfähigkeit der Schraube:
 $f_{tens} = 15,6 \text{ kN}$ für $d = 6 \text{ mm}$ und $f_{tens} = 27,8 \text{ kN}$ für $d = 8 \text{ mm}$
- Erwarteter Ausziehparameter: $f_{ax} = 1,25 \cdot f_{ax,k} \cdot (\rho / 350)^{0,8}$
- Charakteristischer Ausziehparameter:
 $f_{ax,k} = 12,1 \text{ N/mm}^2$ für $d = 6 \text{ mm}$ und $f_{ax,k} = 10,9 \text{ N/mm}^2$ für $d = 8 \text{ mm}$
- Charakteristische Rohdichte des Brettschichtholzes: $\rho_k = 385 \text{ kg/m}^3$
- Erwartete Rollschubfestigkeit: $f_{v,r} = 2 \text{ N/mm}^2$
- Erwartete Querkzugfestigkeit: $f_{t,90} = 1 \text{ N/mm}^2$

Tabelle 4-5 Gegenüberstellung der mittleren Höchstlasten aus den Versuchen mit den erwarteten Tragfähigkeiten

Reihe	F_{max} in kN	ρ in kg/m^3	$n_{ef} \cdot F_{ax}$ in kN	$n_{ef} \cdot F_{tens}$ in kN	F_{QZ} in kN	F_{BS} in kN
H	275	428	252	221	1061	301
N	179	428	123	181	166	172
K	171	428	150	221	144	179
O	184	461	160	221	548	179
J	191	461	160	221	548	179
I	183	461	131	181	543	177
A	155	486	177	119	393	188
B	155	486	177	119	393	188
C	145	486	141	119	212	153
D	120	486	105	119	128	118
E	127	486	105	119	128	118

In Tabelle 4-5 bedeuten:

$n_{ef} \cdot F_{ax}$	Erwartete Höchstlast beim Versagensmechanismus Herausziehen der Schrauben berechnet mit $n_{ef} = n^{0,9}$
$n_{ef} \cdot F_{tens}$	Erwartete Höchstlast beim Versagensmechanismus Zugversagen der Schrauben berechnet mit $n_{ef} = n^{0,9}$
F_{OZ}	Erwartete Höchstlast beim Versagensmechanismus Querzugversagen nach Gleichung (3-9)
F_{BS}	Erwartete Höchstlast beim Versagensmechanismus Blockscherversagen nach Gleichung (3-27)

Bildet man die mit der Anzahl der Prüfkörper gewichteten Verhältniswerte aus der Höchstlast im Versuch zur erwarteten Höchstlast, folgt ein **mittlerer** Verhältniswert $F_{max}/\min\{n_{ef} \cdot F_{ax}; n_{ef} \cdot F_{tens}; F_{OZ}\}$ von 1,25 und $F_{max}/\min\{n_{ef} \cdot F_{ax}; n_{ef} \cdot F_{tens}; F_{BS}\}$ von 1,26. Damit bilden beide Modelle die Tragfähigkeit gleich gut ab. Lediglich bei der Reihe K unterscheidet sich der rechnerisch maßgebende Versagensmechanismus: Der Querzugnachweis nach DIN EN 1995-1-1/NA führt in dieser Versuchsreihe zu einer etwas geringeren Tragfähigkeit als der mit dem Nachweis des Herausziehens und Zugversagens der Schrauben erweiterte Blockschernachweis nach Mahlknecht und Brandner [19]. Obwohl ein Vergleich der einzelnen Versuchsergebnisse mit den charakteristischen Tragfähigkeiten nach DIN EN 1995-1-1/NA und ETA nicht geführt werden kann, geht aus dem Forschungsbericht [19] doch hervor, dass in keinem einzigen der 103 durchgeführten Versuche die Höchstlast geringer war als die nach ETA-12/0373 und EN 1995-1-1/NA berechneten charakteristischen Tragfähigkeit der axial beanspruchten Schraubengruppe.

4.2.2 Versuche von Ringhofer und Schickhofer

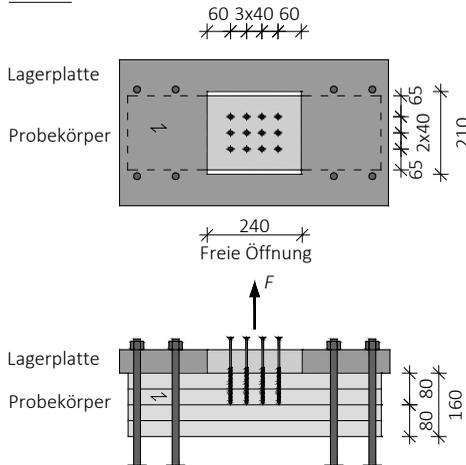
Ringhofer und Schickhofer [15] führten Tragfähigkeitsversuche mit zugbeanspruchten Schraubengruppen in den Seitenflächen von Brettschichtholz aus Fichte durch. Es wurden 30 Versuche mit axial belasteten Schraubengruppen mit einem Winkel von 90° zwischen der Schraubenachse (Kraftrichtung) und der Fasersrichtung durchgeführt. Es wurden HECO-TOPIX 8,0 x 300 Schrauben nach ETA-11/0284 mit einer Gewindelänge von 100 mm verwendet. Die Einschraubtiefe betrug $\ell_{ef} = 80$ mm, die Prüfkörperhöhe $h = 160$ mm. Bild 4-5 zeigt die Anordnung

der Schrauben. Der Prüfkörper aus BS-Holz wurde mit einer Lagerplatte aus Stahl gehalten, in der Lagerplatte befand sich eine Öffnung von 240 mm x 210 mm zur Aufnahme der Schrauben. Der Abstand des Öffnungsrandes in Faserrichtung zur nächsten Schraube betrug 60 mm. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass dieser geringe Abstand die Tragfähigkeit günstig beeinflusste.

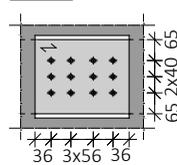
Folgende Parameter wurden variiert:

- Anzahl der Schrauben pro Anschluss: $n = 9$ bis $n = 12$
- Abstand untereinander in Faserrichtung: $a_1 = 5,0 d$ bis $a_1 = 10,0 d$
- Abstand untereinander rechtwinklig zur Faserrichtung: $a_2 = 2,5 d$ bis $a_2 = 5,0 d$

Pos. 2.2



Pos. 2.3



Pos. 2.4

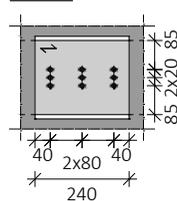


Bild 4-5 Anordnung der Schrauben in den Prüfkörpern aus [15].

Schrauben

Für die Versuche wurden Teilgewindeschrauben des Durchmessers 8 mm nach ETA-11/0284 verwendet. Die Gewindelänge war stets größer als die Einschraubtiefe im Holz. Die Schraubenlöcher wurden nicht vorgebohrt. Die Auszieh- und Zugtragfähigkeit der Schrauben wurde im Rahmen von Zulassungsversuchen bestimmt. Der Ausziehparameter betrug im Mittel $f_{ax} = 17,5 \text{ N/mm}^2$ für eine mittlere

Rohdichte des Brettschichtholzes von 497 kg/m^3 . Der charakteristische Ausziehparameter nach ETA-11/0284 bezogen auf eine Rohdichte von 350 kg/m^3 beträgt $f_{ax,k} = 11,8 \text{ N/mm}^2$. Die Zugtragfähigkeit betrug im Mittel $24,3 \text{ kN}$. Die charakteristische Zugtragfähigkeit nach ETA-11/0284 beträgt $f_{tens,k} = 20 \text{ kN}$.

Holz

Die Prüfkörper wurden aus BSH der Holzart Fichte mit Querschnittsmaßen Breite/Höhe $b/h = 188/160 \text{ mm}$ hergestellt. Die Prüfkörper wurden bis zu den Versuchen bei Normklima 20/65 nach ISO 554 gelagert.

Versuche

Tabelle 4-6 zeigt eine Übersicht über die Blockscherversuche mit unter 90° zur Faserrichtung angeordneten Schrauben. Als Versagensursache wurde ausschließlich Blockscherversagen beobachtet.

Tabelle 4-6 Versuchsübersicht Blockscherversuche aus [15]

Versuchsreihe	2.2	2.3	2.4
Anzahl Versuche	10	10	10
Schrauben $d \times \ell$ in mm	8 x 300	8 x 300	8 x 300
Anzahl r	4	4	3
Abstand a_1/d	5,0	7,0	10,0
Abstand a_2/d	5,0	5,0	2,5
Einschraubtiefe ℓ_{ef}/d	10,0	10,0	10,0
Versagensursache	10 x B	10 x B	10 x B

B \equiv Blockscheren

Für den Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen des Rechenmodells „Blockscheren“ oder der Bemessung nach ETA werden die folgenden Parameter verwendet:

- Versuchshöchstlast: F_{\max}
- Erwartete Zugtragfähigkeit der Schraube: $f_{tens} = 24,3 \text{ kN}$

- Charakteristische Zugtragfähigkeit der Schraube: $f_{tens,k} = 20 \text{ kN}$
- Erwarteter Ausziehparameter: $f_{ax} = 1,25 \cdot f_{ax,k} \cdot (\rho / 350)^{0,8}$
- Charakteristischer Ausziehparameter: $f_{ax,k} = 11,8 \text{ N/mm}^2$
- Charakteristische Rohdichte des Brettschichtholzes: $\rho_k = 385 \text{ kg/m}^3$
- Erwartete Rollschubfestigkeit: $f_{v,r} = 2 \text{ N/mm}^2$
- Charakteristische Rollschubfestigkeit: $f_{v,r,k} = 1 \text{ N/mm}^2$
- Erwartete Querkzugfestigkeit: $f_{t,90} = 1 \text{ N/mm}^2$
- Charakteristische Querkzugschubfestigkeit: $f_{t,90,k} = 0,5 \text{ N/mm}^2$

Bildet man die Verhältniswerte aus der Höchstlast im Versuch zur kleinsten **erwarteten** Tragfähigkeit aus den Versagensmechanismen Zugversagen und Herausziehen der Schrauben und Querkzugversagen des Holzes, folgt ein **mittlerer** Verhältniswert von 0,96. Für die Versagensmechanismen Zugversagen und Herausziehen der Schrauben und Blockscherversagen folgt ein **mittlerer** Verhältniswert von 1,08. Für ein ausreichend zuverlässiges Modell sollte der nach EN 14358 bestimmte **charakteristische** Verhältniswert aus Höchstlast im Versuch zur charakteristischen Tragfähigkeit den Wert 1,0 nicht unterschreiten. Für die in Tabelle 4-8 zusammengestellten Versuche betragen die **charakteristischen** Verhältniswerte aus der Höchstlast im Versuch zur kleinsten **charakteristischen** Tragfähigkeit aus den Versagensmechanismen Zugversagen und Herausziehen der Schrauben und Querkzugversagen des Holzes $F_{max}/F_{Rk} = 1,26$, für die Versagensmechanismen Zugversagen und Herausziehen der Schrauben und Blockscherversagen folgt $F_{max}/F_{Rk} = 1,34$. Die Minima dieser Verhältniswerte betragen 1,30 und 1,44. Damit führt sowohl das Modell Blockscheren nach Gleichung (3-27) als auch die Bemessung nach ETA und DIN EN 1995-1-1/NA mit der axialen Tragfähigkeit der Schrauben und einer wirksamen Schraubenanzahl n_{ef} sowie der Berücksichtigung des Querkzugversagens zu einer ausreichenden Tragfähigkeit von axial beanspruchten, in Gruppen angeordneter Schrauben. Das Modell des Blockscherens ist dabei etwas konservativer.

Tabelle 4-7 Gegenüberstellung der Höchstlasten aus den Versuchen mit den Erwartungswerten nach Gleichung (3-27) bzw. nach ETA

Versuch	F_{\max} in kN	ρ in kg/m ³	$n_{\text{ef}} \cdot F_{\text{ax}}$ in kN	$n_{\text{ef}} \cdot F_{\text{tens}}$ in kN	F_{QZ} in kN	F_{Bs} in kN
2.2-1	90,4	426	103	227	108	98,3
2.2-2	83,5	382	94,8	227	108	98,3
2.2-3	81,1	396	97,5	227	108	98,3
2.2-4	97,2	406	99,5	227	108	98,3
2.2-5	93,7	401	98,5	227	108	98,3
2.2-6	81,4	372	92,8	227	108	98,3
2.2-7	95,6	436	105	227	108	98,3
2.2-8	95,7	433	105	227	108	98,3
2.2-9	104	417	102	227	108	98,3
2.2-10	101	422	103	227	108	98,3
2.3-1	104	390	96,3	227	134	95,6
2.3-2	98,0	397	97,7	227	134	95,6
2.3-3	114	420	102	227	134	95,6
2.3-4	88,3	365	91,4	227	134	95,6
2.3-5	93,7	397	97,7	227	134	95,6
2.3-6	97,2	372	92,8	227	134	95,6
2.3-7	98,2	398	97,9	227	134	95,6
2.3-8	95,5	394	97,1	227	134	95,6
2.3-9	102	403	98,9	227	134	95,6
2.3-10	104	398	97,9	227	134	95,6
2.4-1	68,2	370	71,3	176	96,3	55,7
2.4-2	69,0	383	73,3	176	96,3	55,7
2.4-3	73,7	402	76,2	176	96,3	55,7
2.4-4	68,1	390	74,4	176	96,3	55,7
2.4-5	62,5	364	70,4	176	96,3	55,7
2.4-6	65,4	381	73,0	176	96,3	55,7
2.4-7	76,2	393	74,8	176	96,3	55,7
2.4-8	66,0	391	74,5	176	96,3	55,7
2.4-9	64,9	392	74,7	176	96,3	55,7
2.4-10	78,8	388	74,1	176	96,3	55,7

Tabelle 4-8 Gegenüberstellung der Höchstlasten aus den Versuchen mit den charakteristischen Werten nach Gleichung (3-27) bzw. nach ETA

Versuch	F_{\max} in kN	ρ in kg/m ³	$n_{\text{ef}} \cdot F_{\text{ax},k}$ in kN	$n_{\text{ef}} \cdot F_{\text{tens},k}$ in kN	$F_{\text{QZ},k}$ in kN	$F_{\text{BS},k}$ in kN
2.2-1	90,4	426	76,3	187	54,1	56,3
2.2-2	83,5	382	76,3	187	54,1	56,3
2.2-3	81,1	396	76,3	187	54,1	56,3
2.2-4	97,2	406	76,3	187	54,1	56,3
2.2-5	93,7	401	76,3	187	54,1	56,3
2.2-6	81,4	372	76,3	187	54,1	56,3
2.2-7	95,6	436	76,3	187	54,1	56,3
2.2-8	95,7	433	76,3	187	54,1	56,3
2.2-9	104	417	76,3	187	54,1	56,3
2.2-10	101	422	76,3	187	54,1	56,3
2.3-1	104	390	76,3	187	67,1	56,3
2.3-2	98,0	397	76,3	187	67,1	56,3
2.3-3	114	420	76,3	187	67,1	56,3
2.3-4	88,3	365	76,3	187	67,1	56,3
2.3-5	93,7	397	76,3	187	67,1	56,3
2.3-6	97,2	372	76,3	187	67,1	56,3
2.3-7	98,2	398	76,3	187	67,1	56,3
2.3-8	95,5	394	76,3	187	67,1	56,3
2.3-9	102	403	76,3	187	67,1	56,3
2.3-10	104	398	76,3	187	67,1	56,3
2.4-1	68,2	370	58,9	144	48,1	28,2
2.4-2	69,0	383	58,9	144	48,1	28,2
2.4-3	73,7	402	58,9	144	48,1	28,2
2.4-4	68,1	390	58,9	144	48,1	28,2
2.4-5	62,5	364	58,9	144	48,1	28,2
2.4-6	65,4	381	58,9	144	48,1	28,2
2.4-7	76,2	393	58,9	144	48,1	28,2
2.4-8	66,0	391	58,9	144	48,1	28,2
2.4-9	64,9	392	58,9	144	48,1	28,2
2.4-10	78,8	388	58,9	144	48,1	28,2

4.2.3 Versuche von Koch

Im Rahmen seiner Masterarbeit führte Koch [17] 6 Reihen mit insgesamt 34 Blockscherversuchen durch. Der Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung betrug 90° . Sämtliche Versuche sind in [17] im Detail dokumentiert.

Folgende Parameter wurden variiert:

- Schraubendurchmesser $d = 6$ mm und $d = 8$ mm
- Anzahl der Schrauben pro Anschluss: $n = 4$ bis $n = 8$
- Abstand a_1 untereinander in Faserrichtung: $a_1 = 4,0 d$ bis $a_1 = 5,0 d$
- Abstand a_2 untereinander rechtwinklig zur Faserrichtung:
 $a_2 = 4,0 d$ bis $a_2 = 5,0 d$
- Einschraubtiefe: $\ell_{ef} = 10 d$ bis $\ell_{ef} = 15 d$
- Verhältnis Einschraubtiefe zu Bauteilhöhe: $\ell_{ef}/h = 0,55$ bis $\ell_{ef}/h = 0,87$

Schrauben

Für die Versuche wurden Schrauben der Durchmesser 6 mm und 8 mm nach ETA-11/0190 verwendet. Es wurden Voll- und Teilgewindeschrauben verwendet, die Schrauben wiesen jedoch stets eine Gewindelänge auf, die größer als die Einschraubtiefe im Holz war. Die Schraubenlöcher wurden mit Durchmessern von 4 mm bzw. 5 mm für die Schraubendurchmesser 6 mm bzw. 8 mm vorgebohrt. Die Ausziehtragfähigkeit der Schrauben wurde durch jeweils 10 Ausziehversuche mit Einschraubtiefen $\ell_{ef} = 10 \cdot d$ bestimmt. Die Ausziehparameter betragen im Mittel $f_{ax} = 16,3$ N/mm² für $d = 6$ mm und eine mittlere Rohdichte des Brettschichtholzes von 387 kg/m³ und $f_{ax} = 18,9$ N/mm² für $d = 8$ mm und eine mittlere Rohdichte des Brettschichtholzes von 459 kg/m³. Die charakteristischen Ausziehparameter nach ETA-11/0190 bezogen auf eine Rohdichte von 350 kg/m³ betragen $f_{ax,k} = 11,5$ N/mm² für $d = 6$ mm und $f_{ax,k} = 11,0$ N/mm² für $d = 8$ mm.

Holz

Die Blockscherversuche wurden mit Schrauben in Brettschichtholz aus Fichte $b/h = 100/200$ mm² und $100/200$ mm² durchgeführt. Die Probekörper waren 600 mm

lang. Die Festigkeitsklasse war nicht bekannt, es wurde jedoch die Holzfeuchte und die Rohdichte jedes Probekörpers nach dem Versuch bestimmt. Die Schrauben wurden in fehlerfreie Bereiche des Brettschichtholzes radial eingedreht.

Für die Lasteinleitung wurden Bauteile aus Furnierschichtholz aus Buche verwendet (siehe Bild 4-1). Der Lichtabstand in Faserrichtung des Brettschichtholzes zwischen den Schrauben und den Befestigungsplatten aus Stahl betrug für die Prüfkörper aus Brettschichtholz $a_v = 120$ mm bis $a_v = 130$ mm.

Versuche

Tabelle 4-9 zeigt eine Übersicht über die Blockscherversuche. Die folgenden Versagensursachen wurden – oft in Kombination – beobachtet:

- Herausziehen eines Holzblocks mit einer Länge größer als das Anschlussbild und einer Tiefe kleiner als die Einschraubtiefe
- Herausziehen der Schrauben aus dem Holz
- Reihenscheren in beiden Schraubenreihen

Bild 4-6 und Bild 4-7 zeigen beispielhaft Blockscher-Prüfkörper nach dem Versagen. Ein „reines“ Blockscher-, Reihenscher- oder Ausziehversagen wurde kaum beobachtet, meist zeigte sich eine Kombination aus diesen Versagensmechanismen.

Tabelle 4-9 Versuchsübersicht Blockscherversuche [17]

Versuchsreihe	BS 1.1	BS 1.2	BS 2.1	BS 2.2	BS 3.1	BS 3.2
Anzahl Versuche	6	6	6	5	5	6
Schrauben $d \times \ell$ in mm	6 x 120	6 x 200	8 x 200	8 x 200	6 x 200	6 x 200
Anzahl r parallel	2	2	4	4	4	4
Anzahl s rechtwinklig	2	2	2	2	2	2
Abstand a_1/d	24	24	32	32	24	24
Abstand a_2/d	24	24	32	32	24	30
Einschraubtiefe ℓ_{ef} in mm	60	60	80	80	90	90



Bild 4-6 kombiniertes Auszieh-Blockscherungsversagen im Prüfkörper BS 1.2 V4 (links) und kombiniertes Auszieh- und Reihenscherungsversagen im Prüfkörper BS 2.1 V3 (rechts)



Bild 4-7 Blockscherungsversagen im Prüfkörper BS 3.2 V4 (links) und Reihenscherungsversagen im Prüfkörper BS 1.2 V1 (rechts)

Für den Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen des Rechenmodells „Blockscheren“ oder der Bemessung nach ETA werden die folgenden Parameter verwendet:

- Versuchshöchstlast: F_{\max}
- Erwartete Zugtragfähigkeit der Schraube:
 $f_{tens} = 16,2 \text{ kN}$ für $d = 6 \text{ mm}$ und $f_{tens} = 25,4 \text{ kN}$ für $d = 8 \text{ mm}$
- Charakteristische Zugtragfähigkeit der Schraube:
 $f_{tens,k} = 12,5 \text{ kN}$ für $d = 6 \text{ mm}$ und $f_{tens,k} = 21,5 \text{ kN}$ für $d = 8 \text{ mm}$
- Erwarteter Ausziehparameter: $f_{ax} = 1,25 \cdot f_{ax,k} \cdot (\rho / 350)^{0,8}$

- Charakteristischer Ausziehparameter:
 $f_{ax,k} = 11,5 \text{ N/mm}^2$ für $d = 6 \text{ mm}$ und $f_{ax,k} = 11,0 \text{ N/mm}^2$ für $d = 8 \text{ mm}$
- Charakteristische Rohdichte des Brettschichtholzes: $\rho_k = 385 \text{ kg/m}^3$
- Erwartete Rollschubfestigkeit: $f_{v,r} = 2 \text{ N/mm}^2$
- Charakteristische Rollschubfestigkeit: $f_{v,r,k} = 1 \text{ N/mm}^2$
- Erwartete Querkzugfestigkeit: $f_{t,90} = 1 \text{ N/mm}^2$
- Charakteristische Querkzugschubfestigkeit: $f_{t,90,k} = 0,5 \text{ N/mm}^2$

Bildet man die Verhältniswerte aus der Höchstlast im Versuch zur kleinsten **erwarteten** Tragfähigkeit aus den Versagensmechanismen Zugversagen und Herausziehen der Schrauben und Querkzugversagen des Holzes, folgt ein **mittlerer** Verhältniswert von 0,92. Für die Versagensmechanismen Zugversagen und Herausziehen der Schrauben und Blockscherversagen folgt ein **mittlerer** Verhältniswert von 1,48. Für ein ausreichend zuverlässiges Modell sollte der nach EN 14358 bestimmte **charakteristische** Verhältniswert aus Höchstlast im Versuch zur charakteristischen Tragfähigkeit den Wert 1,0 nicht unterschreiten. Für die in Tabelle 4-11 zusammengestellten Versuche betragen die **charakteristischen** Verhältniswerte aus der Höchstlast im Versuch zur kleinsten **charakteristischen** Tragfähigkeit aus den Versagensmechanismen Zugversagen und Herausziehen der Schrauben und Querkzugversagen des Holzes $F_{\max}/F_{Rk} = 0,97$, für die Versagensmechanismen Zugversagen und Herausziehen der Schrauben und Blockscherversagen folgt $F_{\max}/F_{Rk} = 1,26$. Die Minima dieser Verhältniswerte sind 0,86 bzw. 1,29. Der Verhältniswert $F_{\max}/F_{Rk} = 0,86$ stammt aus dem Versuch BS 1.2V3 und ist der einzige Verhältniswert aus den 34 Blockscherversuchen aus [17], der unterhalb von 1,0 liegt.

Damit führt sowohl das Modell Blockscheren nach Gleichung (3-27) als auch die Bemessung nach ETA und DIN EN 1995-1-1/NA mit der axialen Tragfähigkeit der Schrauben und einer wirksamen Schraubenanzahl n_{ef} sowie der Berücksichtigung des Querkzugversagens zu einer ausreichenden Tragfähigkeit von axial beanspruchten, in Gruppen angeordneten Schrauben. Das Modell des Blockscherens ist dabei deutlich konservativer. Obwohl das Blockscherversagen für sämtliche Versuche rechnerisch maßgebend war, stimmen die berechneten Tragfähigkeiten für die anderen Versagensmechanismen deutlich besser mit den Versuchsergebnissen überein.

Tabelle 4-10 Gegenüberstellung der Höchstlasten aus den Versuchen mit den Erwartungswerten nach Gleichung (3-27) bzw. nach ETA

Versuch	F_{max} in kN	ρ in kg/m ³	$n_{ef} \cdot F_{ax}$ in kN	$n_{ef} \cdot F_{tens}$ in kN	F_{QZ} in kN	F_{Bs} in kN
BS 1.1 V1	18,6	417	22,4	56,4	35,4	20,8
BS 1.1 V2	24,3	482	25,1	56,4	35,4	20,8
BS 1.1 V3	23,3	438	23,3	56,4	35,4	20,8
BS 1.1 V4	21,7	508	26,2	56,4	35,4	20,8
BS 1.1 V5	23,4	436	23,2	56,4	35,4	20,8
BS 1.1 V6	25,4	425	22,7	56,4	35,4	20,8
BS 1.2V1	31,2	447	44,1	105	58,4	21,9
BS 1.2V2	31,0	434	43,1	105	58,4	21,9
BS 1.2V3	25,2	408	41,0	105	58,4	21,9
BS 1.2V4	31,6	406	40,9	105	58,4	21,9
BS 1.2V5	35,8	461	45,2	105	58,4	21,9
BS 1.2V6	29,8	466	45,6	105	58,4	21,9
BS 2.1V1	37,4	438	39,7	88,4	137	36,9
BS 2.1V2	31,5	414	37,9	88,4	137	36,9
BS 2.1V3	45,9	411	37,7	88,4	137	36,9
BS 2.1V4	41,8	451	40,6	88,4	137	36,9
BS 2.1V5	34,8	391	36,2	88,4	137	36,9
BS 2.1V6	33,7	414	37,9	88,4	137	36,9
BS 2.2V1	61,0	442	74,6	165	244	38,9
BS 2.2V2	61,8	451	75,8	165	244	38,9
BS 2.2V3	69,0	470	78,3	165	244	38,9
BS 2.2V4	55,2	402	69,1	165	244	38,9
BS 2.2V5	68,6	460	77,0	165	244	38,9
BS 3.1V1	71,8	399	60,4	105	379	32,5
BS 3.1V2	61,8	451	66,7	105	379	32,5
BS 3.1V3	64,7	449	66,4	105	379	32,5
BS 3.1V4	65,2	402	60,8	105	379	32,5
BS 3.1V5	60,9	427	63,8	105	379	32,5
BS 3.2V1	61,9	402	60,8	105	435	35,5
BS 3.2V2	75,2	455	67,1	105	435	35,5
BS 3.2V3	58,2	405	61,2	105	435	35,5
BS 3.2V4	62,5	464	68,2	105	435	35,5
BS 3.2V5	67,1	456	67,3	105	435	35,5
BS 3.2V6	70,7	428	63,9	105	435	35,5

Tabelle 4-11 Gegenüberstellung der Höchstlasten aus den Versuchen mit den charakteristischen Werten nach Gleichung (3-27) bzw. nach ETA

Versuch	F_{max} in kN	ρ in kg/m ³	$n_{ef} \cdot F_{ax,k}$ in kN	$n_{ef} \cdot F_{tens,k}$ in kN	$F_{QZ,k}$ in kN	$F_{BS,k}$ in kN
BS 1.1 V1	18,6	417	16,8	43,5	17,7	13,7
BS 1.1 V2	24,3	482	16,8	43,5	17,7	13,7
BS 1.1 V3	23,3	438	16,8	43,5	17,7	13,7
BS 1.1 V4	21,7	508	16,8	43,5	17,7	13,7
BS 1.1 V5	23,4	436	16,8	43,5	17,7	13,7
BS 1.1 V6	25,4	425	16,8	43,5	17,7	13,7
BS 1.2V1	31,2	447	31,3	81,2	29,2	12,7
BS 1.2V2	31,0	434	31,3	81,2	29,2	12,7
BS 1.2V3	25,2	408	31,3	81,2	29,2	12,7
BS 1.2V4	31,6	406	31,3	81,2	29,2	12,7
BS 1.2V5	35,8	461	31,3	81,2	29,2	12,7
BS 1.2V6	29,8	466	31,3	81,2	29,2	12,7
BS 2.1V1	37,4	438	28,6	74,9	68,6	24,4
BS 2.1V2	31,5	414	28,6	74,9	68,6	24,4
BS 2.1V3	45,9	411	28,6	74,9	68,6	24,4
BS 2.1V4	41,8	451	28,6	74,9	68,6	24,4
BS 2.1V5	34,8	391	28,6	74,9	68,6	24,4
BS 2.1V6	33,7	414	28,6	74,9	68,6	24,4
BS 2.2V1	61,0	442	53,4	140	122	22,5
BS 2.2V2	61,8	451	53,4	140	122	22,5
BS 2.2V3	69,0	470	53,4	140	122	22,5
BS 2.2V4	55,2	402	53,4	140	122	22,5
BS 2.2V5	68,6	460	53,4	140	122	22,5
BS 3.1V1	71,8	399	47,0	81,2	190	19,0
BS 3.1V2	61,8	451	47,0	81,2	190	19,0
BS 3.1V3	64,7	449	47,0	81,2	190	19,0
BS 3.1V4	65,2	402	47,0	81,2	190	19,0
BS 3.1V5	60,9	427	47,0	81,2	190	19,0
BS 3.2V1	61,9	402	47,0	81,2	218	19,0
BS 3.2V2	75,2	455	47,0	81,2	218	19,0
BS 3.2V3	58,2	405	47,0	81,2	218	19,0
BS 3.2V4	62,5	464	47,0	81,2	218	19,0
BS 3.2V5	67,1	456	47,0	81,2	218	19,0
BS 3.2V6	70,7	428	47,0	81,2	218	19,0

5 Vorschlag für den Nachweis des Blockscherens

Die meisten Prüfkörper, die im Hinblick auf die Tragfähigkeit im Versagensmechanismus „Blockscheren“ geprüft wurden, versagten durch Zugversagen der Schrauben, Herausziehen der Schrauben, durch Querkzugversagen des Holzes im Verbindungsbereich oder durch eine Kombination dieser Versagensmechanismen. Beobachtungen von Prüfkörpern, die durch Blockscheren versagten, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Es tritt meist Rollschub- und Querkzugversagen auf;
- Die Versagensflächen werden oft durch die äußeren Schraubenreihen und die Ebene der Schraubenspitzen gebildet;
- Die Versagensflächen erstrecken sich in Faserrichtung über eine größere Länge als der Anschluss selbst;
- Schubversagen des Holzes in einer Ebene rechtwinklig zur Faserrichtung tritt nicht auf.

Es ist aus den Versuchen nicht erkennbar, ob die Querkzugfläche oder die beiden Rollschubflächen nacheinander oder gleichzeitig versagen. Das Modell von Mahlknecht und Brandner [19] geht von einem konsekutiven Versagen der Querkzug-, Rollschub- und Schubversagensflächen aus. Dies bedeutet, dass ein vollständiges Zusammenwirken der Versagensflächen nicht auftritt. Für einen gegenüber dem Vorschlag [19] vereinfachten Nachweis wird ein Zusammenwirken der Querkzug- und Rollschubflächen vernachlässigt, die Schubflächen rechtwinklig zur Faser werden ebenfalls nicht berücksichtigt. Die Tragfähigkeit der Querkzugversagensfläche wird nach Gleichung (3-9) bestimmt. Da aus den Versuchsbeobachtungen hervorgeht, dass die Rollschubversagensflächen über die Länge des Anschlusses hinausgehen, werden diese länger angenommen, als die Länge des Anschlusses parallel zur Faserrichtung. Dieser Überstand, der die Tragfähigkeit bei Rollschubversagen erhöht, wurde aus denjenigen Prüfkörpern, die Rollschubversagen zeigten, zu $0,75 \ell_{ef}$ abgeschätzt.

Beim Versagensmechanismus Rollschub verursacht nur ein Teil der Anschlusskraft Rollschubspannungen. Dies wird am Beispiel eines Anschlusses mit $\ell_{ef} = h$ verdeutlicht (siehe Bild 5-1).

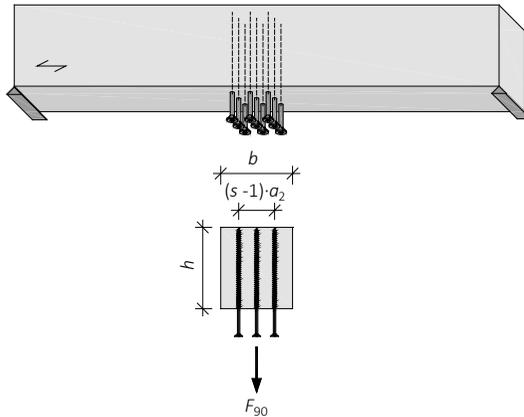


Bild 5-1 Beanspruchung eines Biegeträgers mit axial beanspruchten Vollgewindeschrauben

Der Biegeträger in Bild 5-1 wird durch eine Einzellast beansprucht, die durch axial beanspruchte Vollgewindeschrauben über die gesamte Trägerhöhe eingeleitet wird. Falls Rollschubversagen auftritt, wird ähnlich wie in Bild 2-3 erkennbar, der mittlere Querschnittsteil mit der Breite $(s - 1) \cdot a_2$ über eine bestimmte Länge nach unten herausgezogen. Vor dem Rollschubversagen bewirkt die Kraft F_{90} eine Durchbiegung des gesamten Trägers der Breite b . Dazu müssen auch die außerhalb der Anschlussbreite $(s - 1) \cdot a_2$ liegenden Querschnittsteile nach unten gezogen werden. Die Kraft F_{90} kann damit gedanklich in zwei Anteile aufgeteilt werden: ein Anteil bewirkt die Durchbiegung eines mittleren Trägerstreifens der Breite $(s - 1) \cdot a_2$, der restliche Anteil die Durchbiegung der beiden äußeren Trägerstreifen der Gesamtbreite $b - (s - 1) \cdot a_2$. Nur der zweite Anteil muss über Rollschubbeanspruchungen in die beiden äußeren Trägerstreifen eingeleitet werden und nur dieser Anteil verursacht folglich Rollschubbeanspruchungen.

Die Rollschubspannung beträgt unter der Annahme einer Länge der Rollschubflächen in Faserrichtung von $\ell_{RS} = (r - 1) \cdot a_1 + 1,5 \cdot \ell_{ef}$:

$$\tau_r = \frac{F_{90} \cdot (b - (s - 1) \cdot a_2)}{2 \cdot b \cdot \ell_{ef} \cdot (1,5 \cdot \ell_{ef} + (r - 1) \cdot a_1)} \quad (5-1)$$

Daraus folgt die charakteristische Tragfähigkeit beim Rollschubversagen:

$$F_{r,90,Rk} = \frac{f_{v,r,k} \cdot 2 \cdot b \cdot \ell_{ef} \cdot (1,5 \cdot \ell_{ef} + (r - 1) \cdot a_1)}{(b - (s - 1) \cdot a_2)} \quad (5-2)$$

Hierin bedeuten:

$f_{v,r,k}$	Charakteristische Rollschubfestigkeit des Holzes in N/mm ²
b	Trägerbreite in mm
r	Anzahl der Schrauben in Faserrichtung
s	Anzahl der Schrauben rechtwinklig zur Faserrichtung
a_1	Schraubenabstand untereinander in Faserrichtung in mm
a_2	Schraubenabstand untereinander rechtwinklig zur Faserrichtung in mm
ℓ_{ef}	Einschraubtiefe rechtwinklig zur Faserrichtung in mm

Der Bemessungswert der Tragfähigkeit einer Schraubengruppe mit axial beanspruchten Vollgewindeschrauben ist damit der Kleinstwert der Tragfähigkeit aus den Versagensmechanismen „Zugversagen der Schrauben“, „Herausziehen der Schrauben“, „Querzugversagen des Holzes im Verbindungsbereich“ und „Rollschubversagen des Holzes im Verbindungsbereich“.

$$F_{90,Rd} = \min \{ n_{ef} \cdot f_{tens,d}; n_{ef} \cdot F_{ax,Rd}; F_{QZ,90,Rd}; F_{r,90,Rd} \} \quad (5-3)$$

Hierin bedeuten:

$f_{tens,d}$	Bemessungswert der Zugtragfähigkeit einer Schraube in N
--------------	---

$F_{ax,Rd}$	Bemessungswert des Ausziehwidestandes einer Schraube nach ETA oder DIN EN 1995-1-1 in N
n_{ef}	Wirksame Anzahl der Schrauben nach DIN EN 1995-1-1, Gleichung (8.41)
$F_{QZ,90,Rd}$	Bemessungswert der Querzugtragfähigkeit des Bauteils nach DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08, Gleichung (NA.104) bzw. Gleichung (3-9) in N
$F_{r,90,Rd}$	Bemessungswert der Rollschubtragfähigkeit des Bauteils nach Gleichung (5-2) in N

Bildet man die Verhältniswerte aus der Höchstlast im Versuch zur kleinsten **erwarteten** Tragfähigkeit aus den Versagensmechanismen „Zugversagen“, „Ausziehversagen“, „Querzugversagen“ und „Rollschubversagen“, folgt ein **mittlerer** Verhältniswert von 1,10. Für ein ausreichend zuverlässiges Modell sollte der nach EN 14358 bestimmte **charakteristische** Verhältniswert aus Höchstlast im Versuch zur charakteristischen Tragfähigkeit den Wert 1,0 nicht unterschreiten. Für die in Tabelle 4-8 und Tabelle 4-11 zusammengestellten 64 Versuche ergibt sich der **charakteristische** Verhältniswert aus der Höchstlast im Versuch F_{max} zur kleinsten **charakteristischen** Tragfähigkeit F_{Rk} aus den Versagensmechanismen „Zugversagen“, „Ausziehversagen“, „Querzugversagen“ und „Rollschubversagen“ zu 1,20. Das Minimum dieses Verhältniswerts beträgt 1,10. Damit führt Gleichung (5-3) zu einer konservativen charakteristischen Tragfähigkeit von Schraubengruppen mit axial beanspruchten Vollgewindeschrauben. Die berechnete charakteristische Tragfähigkeit ist in den meisten Fällen deutlich höher als die mit Gleichung (3-27) bestimmte Blockschertragfähigkeit.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dem hier vorgestellten Forschungsprojekt wurde das Tragverhalten von Anschlüssen mit axial beanspruchten Holzschrauben untersucht, die eine Kraftkomponente rechtwinklig zur Faserrichtung in Holzbauteile einleiten. Im Fokus standen dabei die spröden Versagensmechanismen Querzugversagen und Rollschubversagen. Dazu wurden die in der Literatur verfügbaren Versuchsergebnisse analysiert und mit den Bemessungsvorschlägen von Mahlkecht und Brandner (2016) für Blockscherversagen, Meyer und Blass (2018) für Reihenscherversagen sowie mit dem in den meisten ETAs für Holzschrauben angegebenen Bemessungsverfahren mit einer wirksamen Schraubenanzahl n_{ef} verglichen. Obwohl die wirksame Schraubenanzahl n_{ef} vorrangig den Einfluss einer ungleichmäßigen Schraubenbeanspruchung innerhalb der Verbindung berücksichtigt, führt die Bemessung ohne einen direkten Nachweis des Versagensmechanismus Rollschub zu einer ausreichend zuverlässigen Bemessung auch in denjenigen Fällen, in denen Querzugversagen oder Rollschubversagen auftrat.

Um die Datenbasis mit Querzug- oder Rollschubversagen zu vergrößern, wurden gezielt weitere Versuche im Rahmen einer Masterarbeit (Koch, 2018) an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine mit dem Ziel durchgeführt, die bestehenden Rechenmodelle zu überprüfen und erforderlichenfalls zu modifizieren.

Das analytische Modell von Meyer und Blaß (2018) für Reihenscherversagen in Verbindungen mit axial beanspruchten, eingeklebten Stahlstäben ist in der Lage, die Tragfähigkeit entsprechender Schraubenverbindungen mit Schrauben, die in Faserrichtung hintereinander angeordnet sind, vorherzusagen. Das Reihenschervermodell kann auch für mehrreihige Schraubengruppen verwendet werden, wenn der Abstand a_2 der Schrauben untereinander rechtwinklig zur Faserrichtung groß ist.

Das von Mahlkecht und Brandner (2016) vorgeschlagene Bemessungsmodell für Blockscherversagen in Verbindungen mit axial beanspruchten Schraubengruppen und Lastkomponenten rechtwinklig zur Faserrichtung wurde in folgenden Punkten modifiziert, um eine bessere Übereinstimmung mit Versuchsbeobachtungen zu erzielen und um die Lasteintragung in querbeanspruchte Bauteile genauer zu berücksichtigen:

- Versagen in Scherflächen rechtwinklig zur Faserrichtung wurde nicht beobachtet und wird daher auch nicht berücksichtigt,
- Sprödes Versagen wird entweder durch Erreichen der Querkzugfestigkeit in der Ebene der Schraubenspitzen oder der Rollschubfestigkeit in der Ebene der beiden äußeren Schraubenreihen verursacht. Eine gleichzeitige Wirkung der Querkzug- und Rollschubflächen wird vernachlässigt,
- Die Querkzugtragfähigkeit wird nach DIN EN 1995-1-1/NA – Queranschlüsse – ermittelt,
- Die Rollschubflächen sind länger als die Länge des Anschlusses selbst. Dies wird durch eine Verlängerung dieser Flächen in Faserrichtung auf beiden Seiten um $0,75 \ell_{ef}$ in Rechnung gestellt,
- Zur Bestimmung der Rollschubspannung wird nur derjenige Teil der Lastkomponente rechtwinklig zur Faser berücksichtigt, der in die seitlich über die beiden äußeren Schraubenreihen überstehenden Teile des Bauteils eingeleitet wird.

Um das vorgeschlagene analytische Modell zu verifizieren, wurden die Höchstlasten sämtlicher verfügbarer Versuche mit den berechneten Tragfähigkeiten verglichen. Dabei wurde eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt. Da auch die Parameter Schraubenzugtragfähigkeit und –ausziehtragfähigkeit in das Modell eingehen, wurden diese vorab mit Versuchen an einzelnen Schrauben bestimmt. Wird Blockscherversagen in der Bemessung nicht berücksichtigt, führt eine Bemessung nach den ETAs der Schrauben und nach DIN EN 1995-1-1/NA für die geprüften Anschlussgeometrien dennoch zu ausreichenden Tragfähigkeiten.

Die in diesem Band präsentierten Ergebnisse ermöglichen eine einfache Bemessung von Verbindungen mit axial beanspruchten Schrauben und Lastkomponenten rechtwinklig zur Faser. Damit lässt sich die Forderung des EAD 130118-00-0603 „SCREWS FOR USE IN TIMBER CONSTRUCTIONS“ nach einem Blockschernachweis der Bauteile erfüllen.

Literaturverzeichnis

- [1] Johansen, K.W. (1949). "Theory of timber connections". International Association of Bridge and Structural Engineering. Publication No. 9:249-262, Bern, Switzerland.
- [2] Quenneville, P. (2018). "Brittle Failures of Connections Loaded Parallel-to-Grain". Proc., Conference of COST Action FP1402, International Conference on Connections in Timber Engineering – From Research to Standards, Graz, Austria, 154-165, ISBN 978-3-85125-553-9.
- [3] Foschi, R. O. (1973). "Stress analysis and design of glulam rivet connections for parallel-to-grain loading of wood." Information Report VP-X-116, Department of the Environment, Canadian Forestry Service, Vancouver, British Columbia.
- [4] Foschi, R. O. und Longworth, J. (1975). "Analysis and design of griplam nailed connections." J. Struct. Div. ASCE, 101(12), 2537-2555.
- [5] Quenneville, P. and Mohammad, M. (2000). "On the failure modes and strength of steel-wood-steel bolted timber connections loaded parallel-to-grain." Can. J. Civ. Eng., 27(4), 761-773.
- [6] Johnsson, H. (2003). "Plug shear failure in nailed timber connections: experimental studies." Proc., International Council for Research and Innovation in Building and Construction, CIB-W18, Colorado, paper 36-7-2.
- [7] Marjerrison, M. R. (2007). "Analysis of timber rivet connections loaded parallel to grain." M.Sc. dissertation, Dept. of Civil Eng., The Royal Military College of Canada, Ontario, Canada.
- [8] Zarnani, P. (2013). "Load-Carrying Capacity and Failure Mode Analysis of Timber Rivet Connections" Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Auckland, New Zealand.
- [9] Foschi, R. O. (1973). "Stress analysis and design of glulam rivet connections for perpendicular-to-grain loading of wood." Information Report VP-X-117, Department of the Environment, Canadian Forestry Service, Vancouver, British Columbia.

- [10] Ehlbeck, J. und Görlacher, R. (1983). „Tragverhalten von Queranschlüssen mittels Stahlformteilen, insbesondere Balkenschuhen, im Holzbau.“ Forschungsbericht, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine Abt. Ingenieurholzbau, Universität Fridericiana Karlsruhe.
- [11] Van der Put, T. A. C. M. and Leijten, A. J. M. (2000). “Evaluation of perpendicular to grain failure of beams caused by concentrated loads of joints.” Proc., International council for research and innovation in building and construction, CIB-W18, The Netherlands, paper 33-7-7.
- [12] Kasim, M. and Quenneville, P. (2002). “Effect of row spacing on the capacity of perpendicular to grain loaded timber joints with multiple timber connections.” Proc., International council for research and innovation in building and construction, CIB-W18, Kyoto, paper 35-7-6.
- [13] Franke, B. and Quenneville, P. (2011). “Design approach for the splitting failure of doweltype connections loaded perpendicular to grain.” Proc., International council for research and innovation in building and construction, CIB-W18, Italy, paper 44-7-5.
- [14] Jensen, J. L., Quenneville, P., Girhammar, U. A. and Källsner, B. (2012). “Splitting of timber beams loaded perpendicular to grain by connections - Combined effect of edge and end distance.” Construction and Building Materials, 35, 289-293.
- [15] Ringhofer, A. und Schickhofer, G. (2015). „Ausziehprüfungen von Schraubengruppen in Anlehnung an das EAD 130015-00-0603, Abschnitt 2.2.1.10 zur Bestimmung der Mindestabstände a_1 und a_2 “. Prüfbericht NR. PB15-471-1-01, Lignum Test Center (LTC), TU Graz, 42 S.
- [16] Carradine, D.M., Newcombe, M.P. und Buchanan, A.H. (2009). “Using Screws for Structural Applications in Laminated Veneer Lumber.” Proc., International council for research and innovation in building and construction, CIB-W18, Switzerland, paper 42-7-7.
- [17] Koch, E. (2018). “Blockscheren von Holzbauteilen“. Masterarbeit, KIT Holzbau und Baukonstruktionen, 157 S.
- [18] Ehlbeck, J. und Görlacher R. (1995) „Tension perpendicular to the grain in joints“. In: Timber Engineering STEP 1, Basis of design, material properties, structural components and joints. Lecture C2. Centrum Hout, The Netherlands, ISBN 90-5645-001-8.

- [19] Mahlkecht, U. und Brandner, R. (2013). „Untersuchungen des mechanischen Verhaltens von Schrauben - Verbindungsmittelgruppen in VH, BSH und BSP.“ Forschungsbericht focus_sts 3.1.2_1, holz.bau forschungs gmbh, Technische Universität Graz, 47 S.
- [20] Mahlkecht, U., Brandner, R. und Augustin M. (2016). „Block shear failure mode of axially loaded groups of screws.“ Proc., World Conference on Timber Engineering WCTE 2016, Wien, Österreich
- [21] Mahlkecht, U., Brandner, R. Ringhofer, A. und Schickhofer G. (2014). „Resistance and failure modes of axially loaded groups of screws.“ Materials and Joints in Timber Structures. Ed.: S. Aicher, RILEM Bookseries; 9, ISBN: 978-94-007-7810-8
- [22] Meyer, N. und Blaß H.J. (2018). „Connections with glued-in rods in trusses made of Beech-LVL“. Proc., World Conference on Timber Engineering WCTE 2018, Seoul, Südkorea