

Schubverstärkung von Holz mit Holzschrauben und Gewindestangen

**Dipl.-Ing.
Oliver Krüger**

**Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Hans Joachim Blaß**

**Holzbau und
Baukonstruktionen
Karlsruher Institut für
Technologie (KIT)**

oliver.krueger@kit.edu



Zusammenfassung

Durch eine Verstärkung von schubbeanspruchten Bauteilen mit selbstbohrenden Vollgewindeschrauben oder Gewindestangen kann deren Schubtragfähigkeit gesteigert werden. Zur Berechnung der Schubtragfähigkeit verstärkter Träger wurde ein numerisches Modell entwickelt. Hierzu notwendige Grundlagenkenntnisse, wie das Materialverhalten des Holzes bei Schubbeanspruchung und das Verbundverhalten der Verstärkungselemente, werden vorgestellt. Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen werden mit den Ergebnissen von Versuchen mit schubverstärkten Trägern verglichen.

1 Einleitung

Bei biegebeanspruchten Trägern aus Brettschichtholz und Vollholz kann bei gedrungenen Trägerformen oder bei auflagnaher Lasteinleitung der Schubspannungsnachweis die rechnerische Bauteiltragfähigkeit bestimmen. Durch klimatische Beanspruchung entstandene Risse im Holz verringern die Schubtragfähigkeit des Trägers. Eine wirkungsvolle Maßnahme zur Erhöhung der Schubtragfähigkeit mit innen liegenden Verstärkungselementen gibt es im Ingenieurholzbau gegenwärtig nicht. Bei anderen Werkstoffen wie beispielsweise Stahlbeton sind Schubverstärkungen von Bauteilen hingegen gängige Praxis. Durch eine geeignete Schubverstärkung ist es möglich, größere Querkräfte zu übertragen und damit die Schubtragfähigkeit zu steigern. Selbstbohrende Holzschrauben und Gewindestangen mit einem Gewinde nach DIN 7998 eignen sich aufgrund ihrer hohen axialen Verbundsteifigkeit zur Verstärkung schubbeanspruchter Bauteile. Durch die Simulation des Trag- und Versagensverhaltens schubverstärkter Träger in einem numerischen Modell kann mit geringem Versuchsaufwand die Auswirkung einer Schubverstärkung auf die Tragfähigkeit bestimmt werden.

2 Verstärkungselemente

Für eine wirkungsvolle Schubverstärkung müssen Verstärkungsmittel unabhängig von ihrer Anordnung eine hohe Steifigkeit aufweisen. Je größer die Steifigkeit der Verstärkungsmittel, desto geringer ist die Schubverzerrung des Holzes und damit der Querkraftanteil des Holzbauteils selbst. Die Steifigkeit stiftförmiger Verbindungsmittel ist bei Beanspruchung rechtwinklig zur Stiftachse vergleichsweise gering. Durch die Anordnung von Holzschrauben oder Gewindestangen unter Winkeln von weniger als 90° zur Faserrichtung des Holzes kann die hohe axiale Steifigkeit ausgenutzt werden. Am besten eignet sich ein Einschraubwinkel der Verstärkungselemente von 45° zur Holzfaser.

Selbstbohrende Holzschrauben haben sich in den letzten Jahren im Holzbau aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Tragfähigkeit auf Herausziehen und der einfachen Montage als leistungsfähiges Verbindungsmittel durchgesetzt. Sie sind in Durchmessern bis 13 mm und Längen bis 1000 mm auf dem Markt verfügbar. Das Verlaufen der Schrauben aus der Sollachse beim Einschrauben setzt der Verwendung von langen selbstbohrenden Holzschrauben jedoch Grenzen, wenn diese nahe am Bauteilrand eingesetzt werden oder es auf eine präzise Lage der Schraube im Holz ankommt.

Für große Einschraubängen bestens geeignet sind Gewindestangen mit einem Gewinde nach DIN 7998. Diese Holzschrauben sind in Längen bis zu drei Metern und Nenndurchmessern von 16 mm und 20 mm erhältlich. Nach dem Vorbohren des Holzes mit einem Bohrdurchmesser, der dem Kerndurchmesser der Gewindestange zuzüglich eines halben bis einem Millimeter entspricht, wird die Gewindestange in das Bohrloch eingeschraubt. Manche Hersteller produzieren Gewindestangen in unterschiedlichen Längen mit einem Kopf zum Ansetzen der Einschraubmaschine, andere Hersteller produzieren die Stangen in einer festen Länge und verzichten auf einen Kopf. Bei diesem Typ Gewindestangen muss eine spezielle Hülse zum Einschrauben verwendet werden. Die langen Gewindestangen lassen sich so durch Zuschnitt passend einsetzen. Mit Hilfe spezieller Bohrsysteme können auch noch zwei Meter lange Bohrungen mit hoher Präzision ausgeführt werden. Das Bohrloch kann zur Verringerung des Einschraubwiderstandes gefettet werden. In der Querverstärkung von Satteldachbindern und gekrümmten Bauteilen werden Gewindestangen bereits erfolgreich eingesetzt.

3 Rechenmodell

Die numerische Simulation des Tragverhaltens schubverstärkter Träger wird an einem Finite-Elemente-Modell mit ebenen Vier-Knoten-Elementen zur Abbildung der Trägerstruktur durchgeführt. Unter Ausnutzung der Symmetrie wird das halbe Trägersystem modelliert. Die Belastung, als Einzel- oder Gleichstreckenlast, wird in kleinen Lastschritten aufgebracht. Für jeden Lastschritt werden die Elementspannungen ausgelesen. Mit Hilfe eines Versagenskriteriums, welches die Interaktion von Schub- und Querspannungen berücksichtigt, wird nach jedem Lastschritt eine Überprüfung der Elementschubspannungen durchgeführt. Aus Robustheitsgründen wird ein Schubversagen des gesamten Trägers bei Erreichen der kritischen Elementschubspannung in drei Elementen definiert. Geneigt angeordnete, zugbeanspruchte Verstärkungselemente bewirken im Träger zusätzliche Querdruckspannungen, die sich positiv auf die Schubfestigkeit auswirken.

Die Verstärkungselemente werden durch Balkenelemente modelliert. Deren Verbundverhalten mit dem Holz wird über nichtlineare Federelemente, welche die Elementknoten von Träger und Verstärkungselement verknüpfen, abgebildet. Zur Ermittlung einer optimalen Verstärkungskonfiguration für einen gegebenen Einfeldträger werden für eine unterschiedliche Anzahl von Verstärkungselementen je Trägerseite verschiedene Verstärkungsmittelanordnungen berechnet. Dabei werden der Abstand des ersten Verstärkungselements zum Hirnholzende sowie der Abstand der Verstärkungselemente untereinander variiert.

3.1 Schubfestigkeit von Nadelholz

Die Schubfestigkeit von Fichtenholz bei kombinierter Beanspruchung aus Schub und Querspannungen wurde von Spengler [1] untersucht. Aus repräsentativ ausgewählten Brettern wurden in Faserrichtung 220 mm lange Probekörper entnommen. Die Breite der Proben lag zwischen 80 und 140 mm, die Höhe zwischen 22 und 32 mm. Die Probekörper wurden, wie in Abb. 1 dargestellt, an den Seitenflächen mit den Lasteinleitungsplatten flächig verklebt. Zum Abbau von Spannungsspitzen und zum Ausgleich für ungleichmäßige Lasteinleitung an den Hirnholzenden wurden die Prüfkörper mit 15 mm weiten Bohrungen und Schlitzern an den Enden versehen. Diese Versuchskonfiguration erlaubt im Vergleich zu Scherversuchen eine Schubverzerrung des Holzes. Insgesamt wurden etwa 740 Versuche zur Schub-Querspannungsinteraktion mit Holzfeuchten von 8%, 12% und 18% durchgeführt.

Die Ergebnisse der Versuche mit einer Holzfeuchte von 12% sind in einem Interaktionsdiagramm in Abb. 2 dargestellt. Durch eine multiple Regressionsanalyse wurde folgende Gleichung mit einem Korrelationskoeffizienten von $R = 0,871$ zur Beschreibung des Interaktionsverhaltens bei kombinierter Beanspruchung aus Schub und Querspannung ermittelt:

$$\tau = 4,75 \text{ N/mm}^2 - 1,15 \cdot \sigma_{\perp} - 0,13 \cdot \sigma_{\perp}^2 \quad (1)$$

Ohne Querspannungen beträgt die Schubfestigkeit demnach $4,75 \text{ N/mm}^2$.

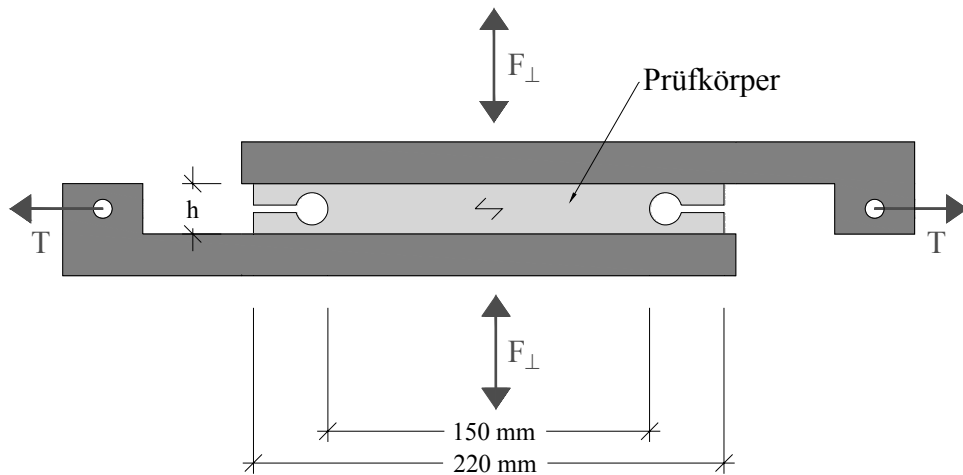


Abb. 1 Versuchsanordnung nach Spengler [1]

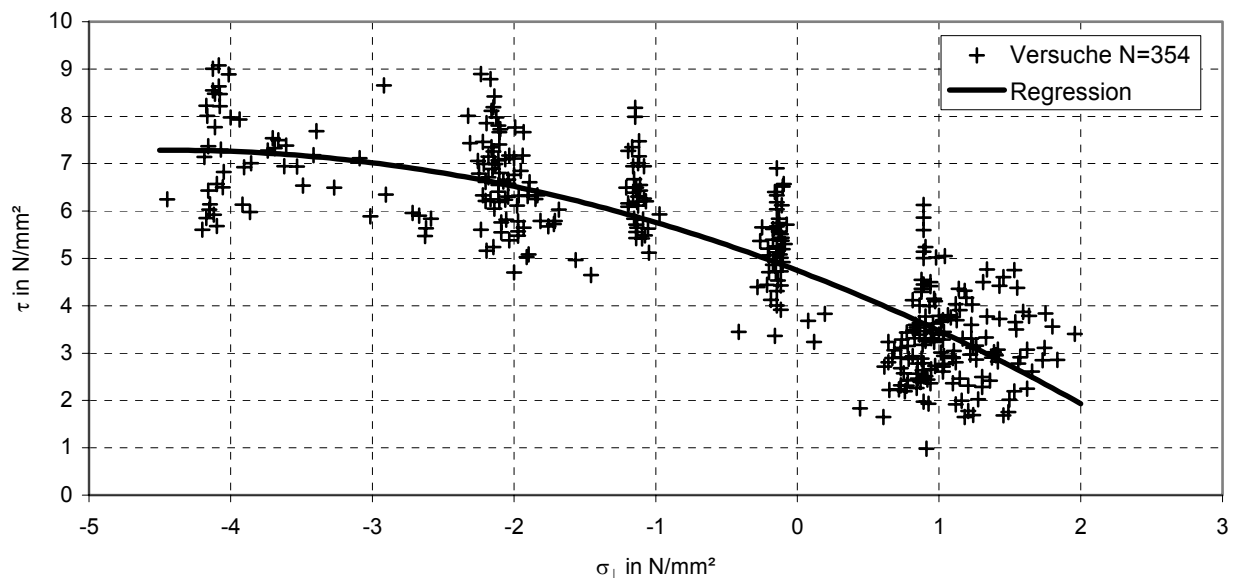


Abb. 2 Schubbruchspannung bei kombinierter Beanspruchung, $u \approx 12\%$

Die Schubfestigkeit von Bauteilen ist u.a. abhängig vom schubbeanspruchten Volumen sowie in geringerem Maße von der Ästigkeit und der Rohdichte und damit von der jeweiligen Festigkeitsklasse. Daher wird Gleichung (1) für die untersuchten Bauteile kalibriert, um eine bestmögliche Übereinstimmung der Rechenergebnisse mit den Versuchsergebnissen zu erzielen. Dies wird mit einer Anpassung der Schubfestigkeit τ_0 für den Zustand ohne Querspannungen erreicht. Der Wert τ_0 wird so gewählt, dass die im Modell berechnete Schubtragfähigkeit mit der aus Versuchen ermittelten Tragfähigkeit unverstärkter Träger übereinstimmt.

$$\tau_{\text{krit}} = \tau_0 - 1,15 \cdot \sigma_{\perp} - 0,13 \cdot \sigma_{\perp}^2 \quad (2)$$

Schubversagen tritt ein, wenn die Schubspannung im Element die ertragbare Schubspannung bei kombinierter Beanspruchung überschreitet. Das Schubversagenskriterium lässt sich damit wie folgt formulieren:

$$\tau_{\text{elem}} > \tau_{\text{krit}}(\sigma_{\perp, \text{elem}}) \quad (3)$$

3.2 Verbundeigenschaften der Verstärkungselemente

In Blaß et al. [2] wird das Verbundverhalten selbstbohrender Vollgewindeschrauben bei axialer Beanspruchung beschrieben. Aufgrund der weit streuenden Versuchsergebnisse bei Schrauben unterschiedlichen Typs wird jedoch empfohlen, für den jeweiligen Schraubentyp das Verbundverhalten durch Versuche zu ermitteln. Das Verbundverhalten kann durch den axialen Verschiebungsmodul K_{ax} , durch den Auszieh Widerstand R_{ax} sowie durch die zugehörige Grenzverformung δ_{ax} beschrieben werden.

$$R_{ax} = \frac{0,6 \cdot \sqrt{d} \cdot l_s^{0,9} \cdot \rho^{0,8}}{1,2 \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \quad \text{in N} \quad (4)$$

$$\delta_{ax,\alpha} = \frac{0,0016 \cdot d \cdot \sqrt{\rho \cdot l_s}}{1,54 \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \quad \text{in N/mm} \quad (5)$$

$$K_{ax} = 234 \cdot (\rho \cdot d)^{0,2} \cdot l_s^{0,4} \quad \text{in mm} \quad (6)$$

Mit l_s Länge des im Holz eingedrehten Gewindebereiches in mm
 ρ Rohdichte des Holzes in kg/m^3
 d Nenndurchmesser der Schraube in mm
 α Winkel zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung.

Diese Gleichungen wurden an zahlreichen Versuchsergebnissen kalibriert und bilden damit den mittleren Trend der Versuchsergebnisse ab. Es wurden Schraubendurchmesser bis 12 mm untersucht, die Verankerungslängen der Schrauben im Holz lagen zwischen 20 und 120 mm. Die Gleichungen zur Bestimmung des Auszieh Widerstandes R_{ax} und der Grenzverformung δ_{ax} sind für beliebige Kraft-Faserwinkel, die Gleichung für den axialen Verschiebungsmodul K_{ax} ist jedoch nur für Kraft-Faserwinkel von 90° gültig. Sofern das Verstärkungsmittel nicht durch Ausknicken versagt, entspricht das Last-Verformungsverhalten druckbeanspruchter Schrauben dem Verhalten zugbeanspruchter Schrauben.

Die in [2] untersuchten Einschraubblängen sind mit maximal 120 mm im Vergleich zu den möglichen Einschraubblängen bei Vollgewindeschrauben von bis zu 1000 mm gering. Eine Überprüfung der Gleichungen im Hinblick auf Ihre Gültigkeit für die Beschreibung des Verbundverhaltens von Gewindestangen und bei größeren Verankerungslängen von Vollgewindeschrauben war daher nötig, um das Verbundverhalten von Schubverstärkungen im Rechenmodell richtig abbilden zu können.

Für Gewindestangen mit Durchmessern von 16 und 20 mm wurden jeweils 10 Ausziehversuche aus Brettschichtholz bei Verankerungslängen von 200 und 400 mm unter einem Winkel von 45° zur Faserrichtung des Holzes ausgewertet. Die Prüfkörper für diese Versuche wurden aus zwei Brettschichtholzträgern herausgesägt, so dass daraus quaderförmige Prüfkörper mit einem Winkel zwischen Längsachse und Faserrichtung von 45° entstanden. Der Vorbohrdurchmesser entsprach dem Kerndurchmesser der Gewindestangen zuzüglich einem Millimeter. Die Prüfkörper waren normal-klimatisiert. Der Versuchsaufbau mit den Stellen der Verformungsmessungen ist in Abb. 3 dargestellt. Gemessen wurden die Relativverformungen zwischen dem unbelasteten Schraubenende und dem Prüfkörper sowie zwischen dem belasteten Ende und dem Prüfkörper. Die axiale Verbundsteifigkeit wurde zwischen dem lastfreien Zustand und einer Belastung von 80% der Höchstlast ermittelt. Die Ergebnisse der Messstelle am unbelasteten Schraubenende enthalten keine Verformungen des Stahles der Gewindestange und liefern daher eine Beschreibung des Verbundverhaltens.

Die Ergebnisse der 40 Ausziehversuche sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst. Neben den Mittelwerten sind in Klammern die jeweiligen Variationskoeffizienten angegeben. Zur Beschreibung des Verbundverhaltens von Gewindestangen können die Gleichungen (4) bis (6) nicht herangezogen werden. Ein Einfluss der Verankerungslänge auf die Grenzverformung δ_{ax} ist nicht zu erkennen.

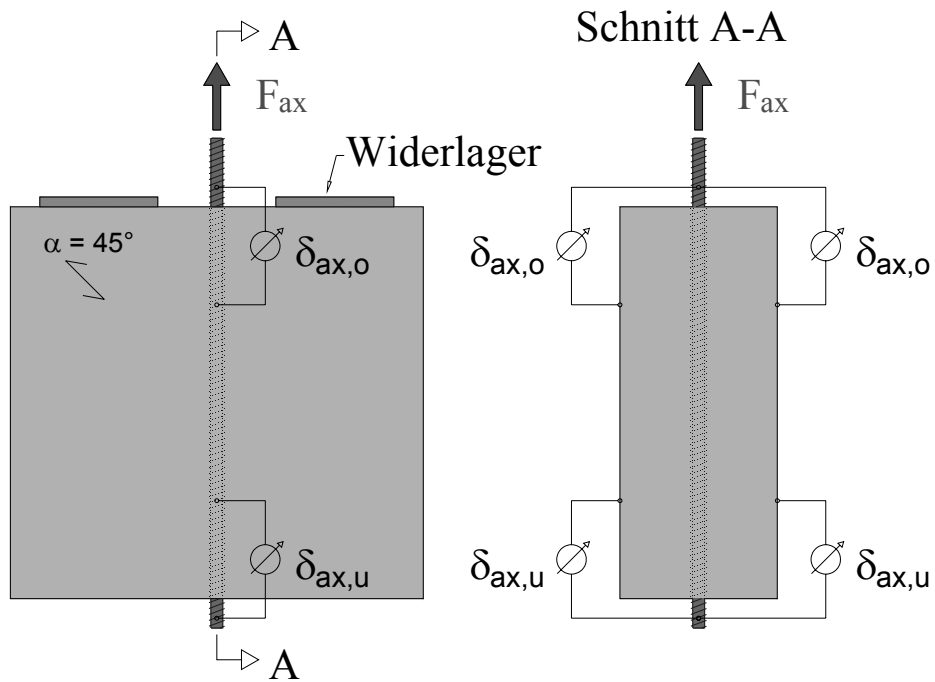


Abb. 3 Versuchsanordnung, Herausziehen von Gewindestangen

Tabelle 3-1 Ergebnisse – Ausziehversuche mit Gewindestangen, Kraft-Faserwinkel 45°

| Durchmesser in mm | l_s in mm | ρ in kg/m ³ | R_{ax} in kN | $\delta_{ax,u}$ in mm | $K_{ax,u}$ in N/mm |
|----------------------|----------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|
| 16 | 200 | 430 (0,3%) | 45,6 (11%) | 2,41 (8,8%) | 43.700 (11%) |
| | 400 | 433 (0,8%) | 92,4 (6,4%) | 2,29 (11%) | 103.000 (19%) |
| 20 | 200 | 431 (0,3%) | 56,6 (11%) | 2,73 (11%) | 44.800 (22%) |
| | 400 | 433 (0,8%) | 117 (7,1%) | 2,52 (7,6%) | 120.000 (13%) |

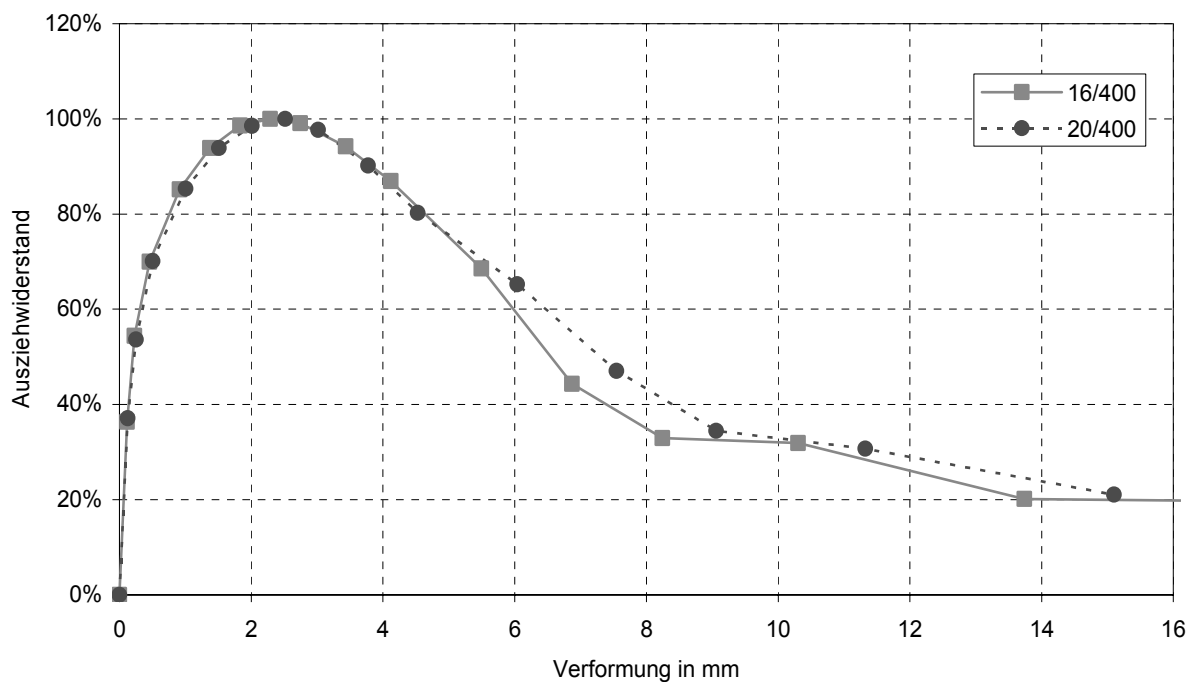


Abb. 4 Last-Verformungsbeziehung von Gewindestangen $\varnothing 16$ mm und $\varnothing 20$ mm

Aus den Last-Verformungskurven der einzelnen Versuche wurden mittlere Last-Verformungskurven bestimmt. Für eine Verankerungslänge von 400 mm sind diese in Abb. 4 dargestellt. Der Auszieh-widerstand wird in Relation zum Maximalwert angegeben.

Das Verbundverhalten bei axialer Beanspruchung der Verstärkungselemente mit dem Holz wird im Modell mit Hilfe nichtlinearer Federelemente abgebildet. Diesen werden die jeweiligen Verbundeigenschaften, wie in Abb. 4 dargestellt, zugewiesen. Auch das Verbundverhalten bei einer Beanspruchung der Verstärkungselemente rechtwinklig zu ihrer Achse wird mit Federelementen modelliert. Für die Tragfähigkeit schubverstärkter Träger ist diese Art der Beanspruchung der Verstärkungselemente jedoch nicht relevant.

4 Ergebnisse der numerischen Berechnungen

Für den in Abb. 5 dargestellten Einfeldträger wurden unterschiedliche Verstärkungsvarianten simuliert. Mit einigen der ermittelten Verstärkungsvarianten wurden Tragfähigkeitsversuche durchgeführt. Der Querschnittsaufbau des Trägers wurde in Anlehnung an Untersuchungen von Schickhofer und Pischl [3] gewählt. Zur Ermittlung beanspruchungsgerechter Schubfestigkeiten wurden an der TU Graz Versuche mit Brettschichtholz-Stegträgern durchgeführt. Durch die gewählte Querschnittsform, mit den im Vergleich zum Steg deutlich breiteren Flanschen, erhöht sich die Biegetragfähigkeit des Trägers.

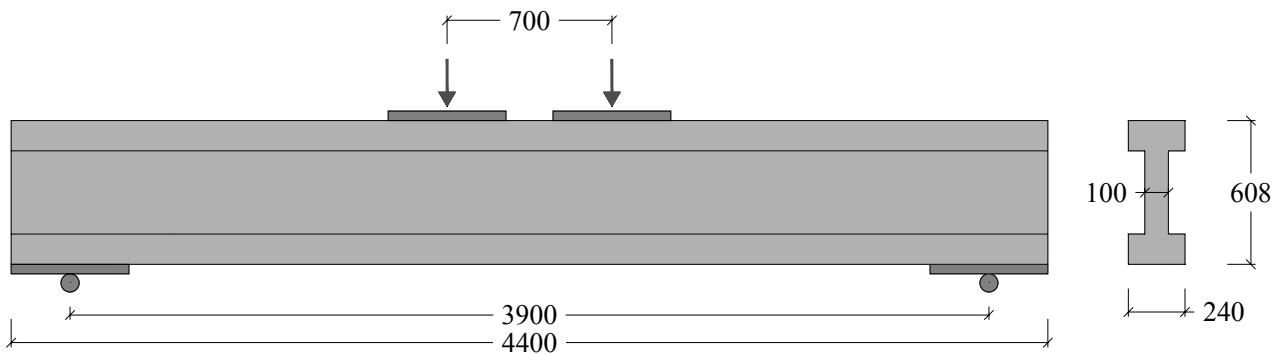
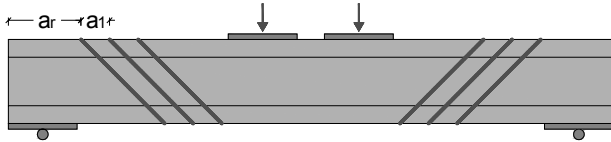


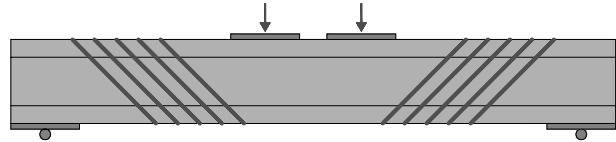
Abb. 5 Geometrie Einfeldträger, Maße in mm

Für die Berechnungen wurden die vorgestellten Verbundeigenschaften von Gewindestangen $\varnothing 16$ mm mit einem Gewinde nach DIN 7998 verwendet. Für eine zunehmende Anzahl von Verstärkungselementen je Trägerseite wurden der Randabstand a_r und der Zwischenabstand in Faserichtung a_1 der Verstärkungselemente in Schritten von 16 mm variiert. Die Versuchskonfigurationen mit den größten Tragfähigkeitssteigerungen im Vergleich zu einem identischen unverstärkten Träger sind in Abb. 6 dargestellt. Der berechnete Laststeigerungsfaktor LSF ist für jede Konfiguration angegeben.

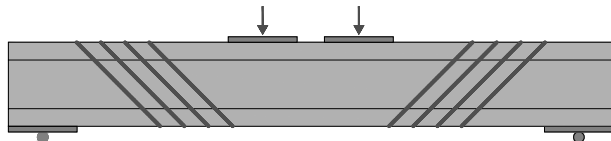
3 VM/Seite, $a_r = 528$ mm, $a_1 = 208$ mm, LSF 28%



5 VM/Seite, $a_r = 448$ mm, $a_1 = 160$ mm, LSF 39%



4 VM/Seite, $a_r = 496$ mm, $a_1 = 176$ mm, LSF 34%



6 VM/Seite, $a_r = 400$ mm, $a_1 = 144$ mm, LSF 42%

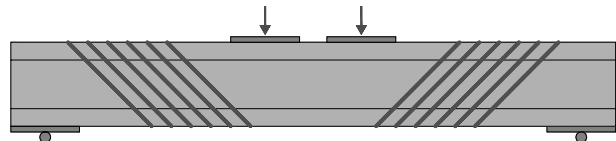


Abb. 6 Optimale Verstärkungsvarianten für unterschiedliche Anzahl von Verstärkungsmitteln

Die Schwerpunkte der Verstärkungsmittelgruppen liegen bei jeder Konfiguration in der Mitte des durch Querkraft beanspruchten Bereichs zwischen den Lasteinleitungsstellen. Mit zunehmender Verstärkungsmittelanzahl erhöht sich zwar die Traglast, die Wirksamkeit der einzelnen Verstärkungselemente verringert sich jedoch.

5 Tragfähigkeitsversuche

Für die Tragfähigkeitsversuche wurden Träger aus Bettschichtholz der Festigkeitsklasse GL36 hergestellt, um eine möglichst hohe Biegetragfähigkeit im Vergleich zur Schubtragfähigkeit zu erreichen. Die Trägergeometrie sowie die Versuchsabmessungen entsprachen der Darstellung in Abb. 5. Bei den Versuchen sollte möglichst ein Schubversagen vor einem Biegeversagen erreicht werden, um aussagekräftige Ergebnisse im Hinblick auf die Wirksamkeit der Verstärkungsmaßnahme zu erhalten. Als Referenz zur Tragfähigkeit der schubverstärkten Träger wurden zehn Träger im unverstärkten Zustand geprüft. Bei jedem dieser Versuche war Schubversagen bestimmend für die Tragfähigkeit. Die mittlere Schubtragfähigkeit betrug $f_v = 4,35 \text{ N/mm}^2$ bei einem Variationskoeffizienten von 12,7%. Das Versagensbild bei Schubversagen war zumeist gekennzeichnet durch einen Schubriss im Bereich des Übergangs zwischen Steg und Gurten. In einigen Fällen wurde auch ein Schubriss im Mittelbereich des Steges festgestellt.

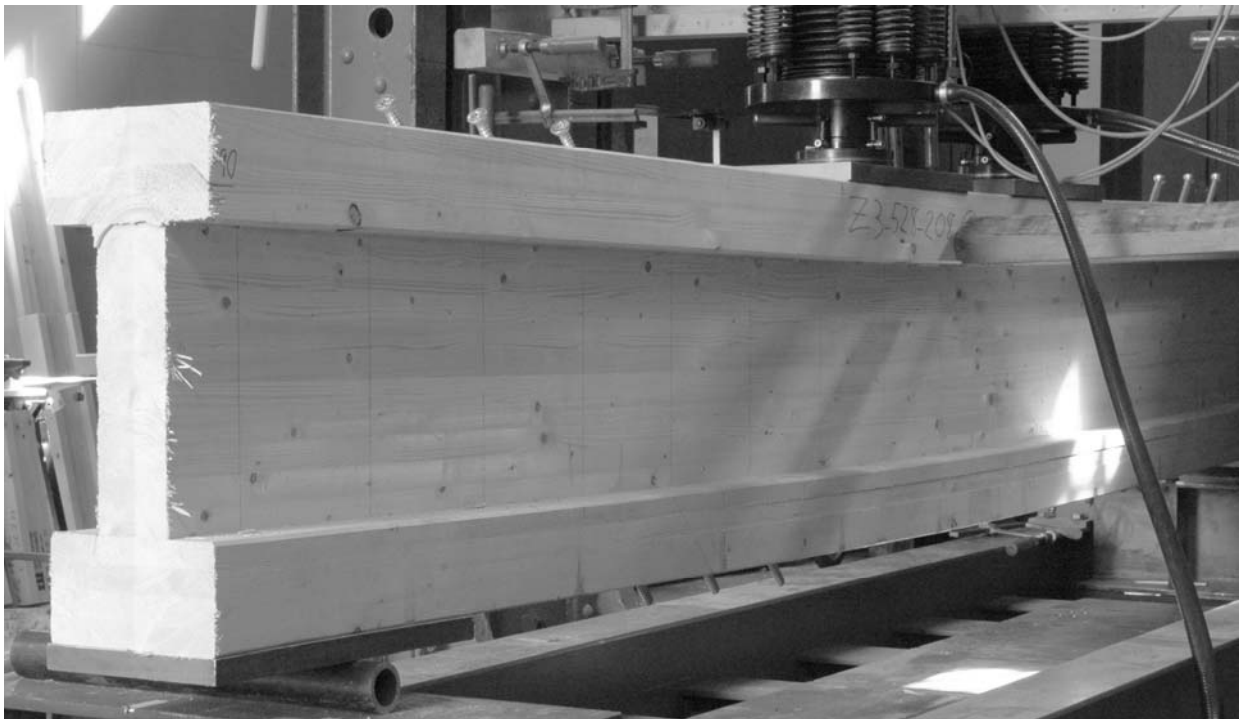


Abb. 7 Versuch mit 3 Verstärkungsmitteln je Seite nach Schubversagen

Zur Verstärkung der Träger wurden Gewindestangen $\varnothing 16 \text{ mm}$ eingesetzt. Die Gewindestangen wurden unter 45° zur Faserrichtung in vorgebohrte Löcher eingedreht. Der Vorbohrdurchmesser betrug $12,5 \text{ mm}$. Die Gewindestangen waren länger als das Bohrloch und ragten an beiden Enden aus dem Träger hinaus. In Tabelle 5-1 sind die weiteren Versuchsergebnisse der mit Gewindestangen verstärkten Träger unterschiedlicher Konfigurationen aufgeführt. Für jede Versuchsreihe sind die Mittelwerte der Schubtragfähigkeit sowie die Laststeigerung im Vergleich zum Mittelwert der Versuche mit den unverstärkten Trägern angegeben. Zum Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Berechnungen sind in der letzten Spalte die rechnerisch ermittelten Tragfähigkeitssteigerungen aufgeführt. Versuchs- und Berechnungsergebnisse stimmen recht gut überein.

Die Verstärkungsmittelanordnung der Versuche mit 6 und 9 Verstärkungselementen je Trägerhälfte entspricht den Berechnungsergebnissen mit einem alternativen Rechenmodell ohne Berücksichtigung einer Interaktion zwischen Schub- und Querspannungen. Das äußerste Verstärkungsmittel ist bei diesen beiden Verstärkungsvarianten möglichst nah am Hirnholzende platziert. Die in Tabelle 5-1 angegebenen Traglaststeigerungen aus den Berechnungen wurden mit dem oben beschriebenen

Rechenmodell ermittelt. Bei den Versuchen mit 9 Verstärkungselementen konnte nur bei einem Versuch Schubversagen festgestellt werden. Ansonsten war Biegeversagen bestimmend für die Tragfähigkeit. Die Schubtragfähigkeit wurde hier für die maximal aufnehmbare Last ermittelt.

Tabelle 5-1 Versuchsergebnisse

| VM Stück/Seite | a_r mm | a_1 mm | Versuche | f_v N/mm ² | VarK | Laststeigerung | |
|-------------------|-------------|-------------|----------|----------------------------|-------|----------------|------------|
| | | | | | | Versuch | Berechnung |
| - | - | - | 10 | 4,35 | 12,7% | - | - |
| 3 | 528 | 208 | 3 | 5,39 | 8,7% | 23% | 28% |
| 4 | 496 | 176 | 3 | 5,71 | 7,5% | 31% | 34% |
| 6 | 16 | 240 | 3 | 5,77 | 3,1% | 32% | 31% |
| 9 | 16 | 160 | 4 | 5,57* | 3,3% | 28%* | 42% |

* 3 von 4 Versuchen mit Biegeversagen

Aufgrund der geringen Anzahl der Versuche wurde mit den einzelnen Prüfreihe eine Varianzanalyse durchgeführt, vgl. Hartung [4]. Durch dieses statistische Verfahren kann beurteilt werden, ob die Varianz zwischen verschiedenen Gruppen größer ist als die Varianz innerhalb der Gruppen. Dies war bei den vorliegenden Versuchsreihen der Fall, daher darf davon ausgegangen werden, dass sich die Versuchsreihen signifikant unterscheiden und die Unterschiede in den Tragfähigkeiten nicht zufällig bedingt sind.

An den unverstärkt geprüften Versuchsträgern wurden, bei geeignetem Schädigungszustand nach dem Versuch, Sanierungsmaßnahmen mit Gewindestangen, Vollgewindeschrauben und eingeklebten Stahlstäben durchgeführt. Die Verstärkungselemente waren ebenfalls unter 45° zur Faserrichtung angeordnet. Die Anzahl der Verstärkungselemente wurde so bestimmt, dass immer eine ausreichende Schubkraftdeckung in der Bruchfläche, unter Berücksichtigung der Reibung, vorhanden war. Die Ausgangstragfähigkeiten der unverstärkten Träger konnten erreicht und sogar übertroffen werden, falls die Schädigung der Träger nach dem ersten Versuch nicht zu groß war und der Spalt zwischen den Schubbruchflächen bei der Sanierung passgenau geschlossen werden konnte. Dies war bei fünf der unverstärkt geprüften Träger der Fall. Im Mittel lagen die Tragfähigkeiten dieser sanierten Träger 26% über den jeweiligen Tragfähigkeiten der unverstärkten Träger. Wegen zu großer Verformung der Trägerteile entlang der Schubbruchfläche nach der ersten Prüfung konnte der Spalt bei vier Trägern nicht mehr geschlossen werden. Die Tragfähigkeiten lagen dann im Mittel 7% unter dem Mittelwert der Ausgangstragfähigkeiten der unverstärkt geprüften Träger. Bei drei der vier Versuche war jedoch Biegeversagen bestimmend für die Tragfähigkeit.

6 Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Schubverstärkung von biegebeanspruchten Trägern möglich ist. Mit wenigen Verstärkungselementen lassen sich bereits Schubtragfähigkeitssteigerungen von 30% erreichen. Auch Sanierungen geschädigter Träger sind möglich. Weitere Untersuchungen der Tragfähigkeit schubverstärkter Träger werden mit Hilfe numerischer Berechnungen und Versuchen durchgeführt.

7 Literatur

- [1] Spengler T: *Festigkeitsverhalten von Brettschichtholz unter zweiachsiger Beanspruchung*, Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, Heft 62/1982, Technische Universität München, 1982
- [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.), Karlsruhe, 2006
- [3] Schickhofer G, Pischl R.: *Ermittlung beanspruchungsgerechter Schubfestigkeiten für eine wirtschaftliche Bauteilbemessung und Implementierung in nationalen und internationalen Normen*, Bericht LR9901, Technische Universität Graz
- [4] Hartung J, Elpelt B, Klösener K-H: *Statistik*, Oldenburg Verlag, München