

Schubverstärkung von Holz mit Holzschrauben und Gewindestangen

Wood screws and threaded rods for wood reinforcement

Renforcement en cisaillement dans le bois par vis et tiges filetées

Rinforzo della resistenza al taglio del legno con viti per legno e barre filettate

Oliver Krüger
Holzbau und Baukonstruktionen
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Karlsruhe, Deutschland



Schubverstärkung von Holz mit Holzschrauben und Gewindestangen

1. Einleitung

Bei biegebeanspruchten Trägern aus Brettschichtholz und Vollholz kann bei gedungenen 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.



Abbildung 1: Typisches Schubversagen und Querschnittsschwächung durch Risse

2. Grundlagen

Zur Modellierung von schubverstärkten Trägern sind Kenntnisse über die Festigkeitseigenschaften des Holzes bei Schubbeanspruchung, auch in Verbindung mit gleichzeitig wirkenden Querspannungen, und über das Verbundverhalten der Verstärkungselemente im Holz notwendig.

2.1. Schub-Querspannungsinteraktion

Die Schubfestigkeit von Fichtenholz bei kombinierter Beanspruchung aus Schub und Querspannungen wurde von Spengler [2] 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 Abbildung 2 dargestellt, an den Seitenflächen mit den Lasteinleitungsplatten flächig verklebt. Die Kraft wird so kontinuierlich in den Prüfkörper eingeleitet. 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. Insgesamt wurden etwa 740 Versuche zur Schub-Querspannungsinteraktion mit Holzfeuchten von 8%, 12% und 18% durchgeführt.

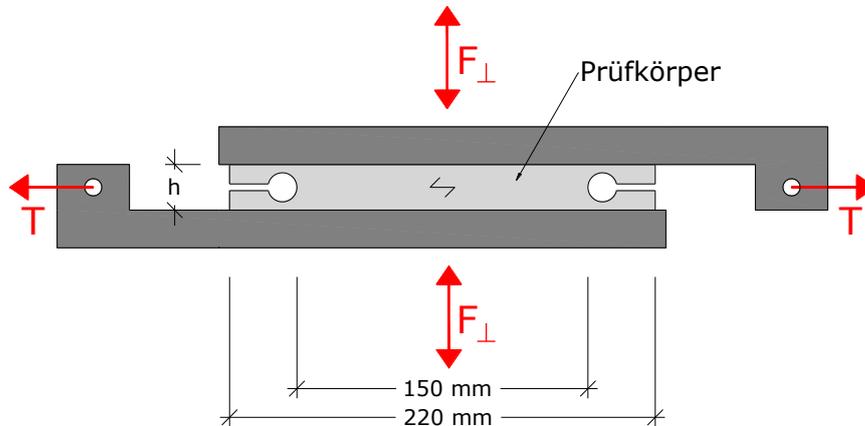


Abbildung 2: Versuchsanordnung nach Spengler [2]

Die Ergebnisse der Versuche mit einer Holzfeuchte von 12% sind in einem Interaktionsdiagramm in Abbildung 3 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 $4,75 \text{ N/mm}^2$.

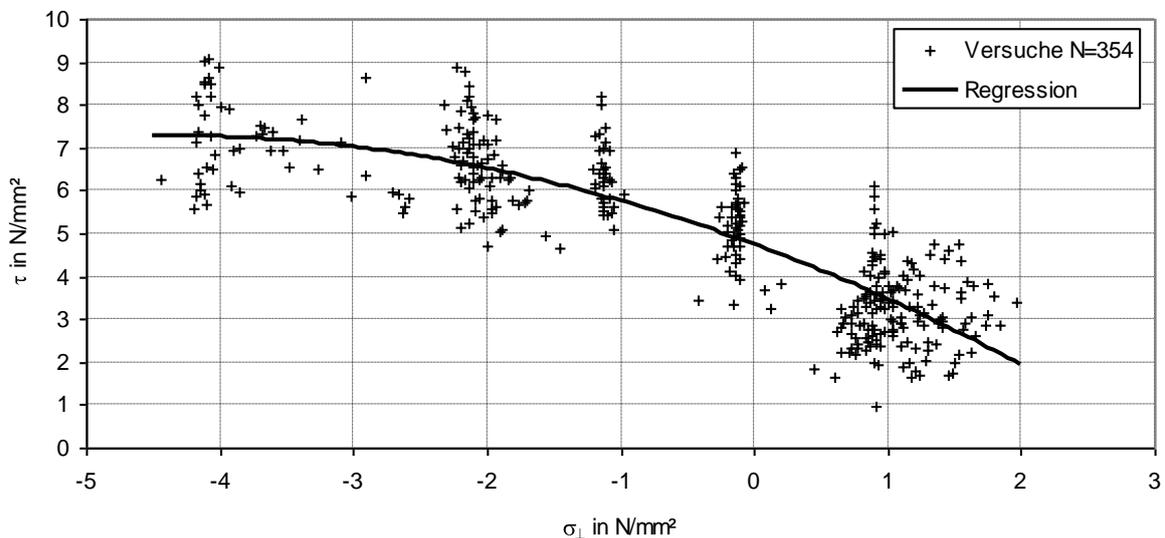


Abbildung 3: Schubbruchspannung in Abhängigkeit der Querbeanspruchung, $u \approx 12\%$

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 numerischen Berechnungen noch 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.

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

Der Wert τ_0 wird so gewählt, dass die im Modell berechnete Schubtragfähigkeit mit der aus Versuchen ermittelten Tragfähigkeit unverstärkter Träger übereinstimmt. Schubversagen tritt ein, wenn die Schubspannung im Element die ertragbare Schubspannung bei kombinierter Beanspruchung überschreitet. Das Schubversagenskriterium lässt sich damit wie folgt formulieren:

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

2.2. Verstärkungselemente

Für eine wirkungsvolle Schubverstärkung müssen Verstärkungsmittel unabhängig von ihrer Anordnung eine hohe Verbundsteifigkeit 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 leistungsfähige 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 Einschraublängen 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 Querkraftverstärkung von Satteldachbindern und gekrümmten Bauteilen werden Gewindestangen bereits erfolgreich eingesetzt.

In Blaß et al. [1] 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.

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

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

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

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 auf Druck beanspruchter Schrauben dem Verhalten von auf Zug beanspruchter Schrauben.

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 normalklimatisiert. Der Versuchsaufbau mit den Stellen der Verformungsmessungen ist in Abbildung 4 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 direkt eine Beschreibung des Verbundverhaltens.

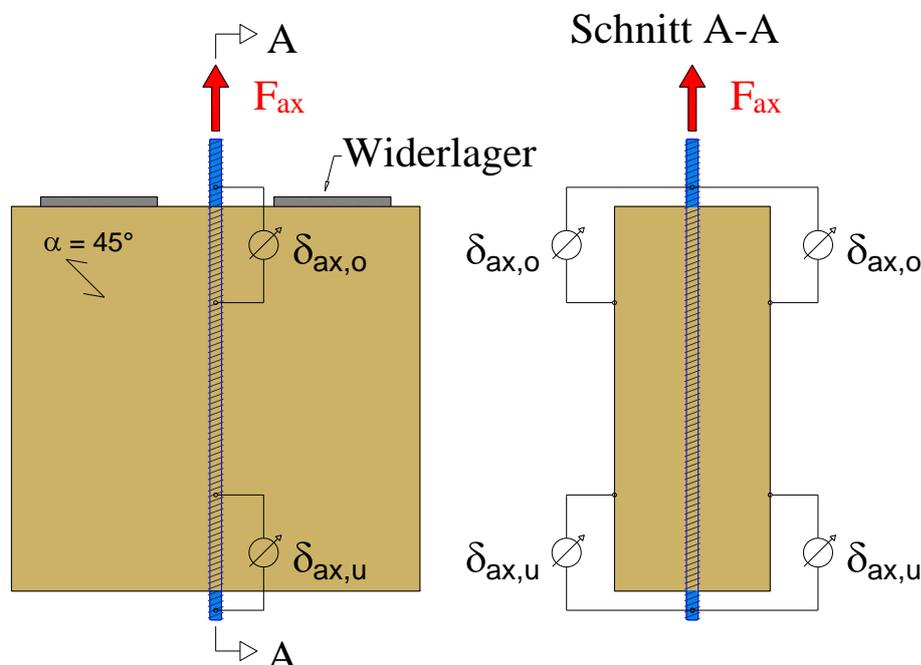


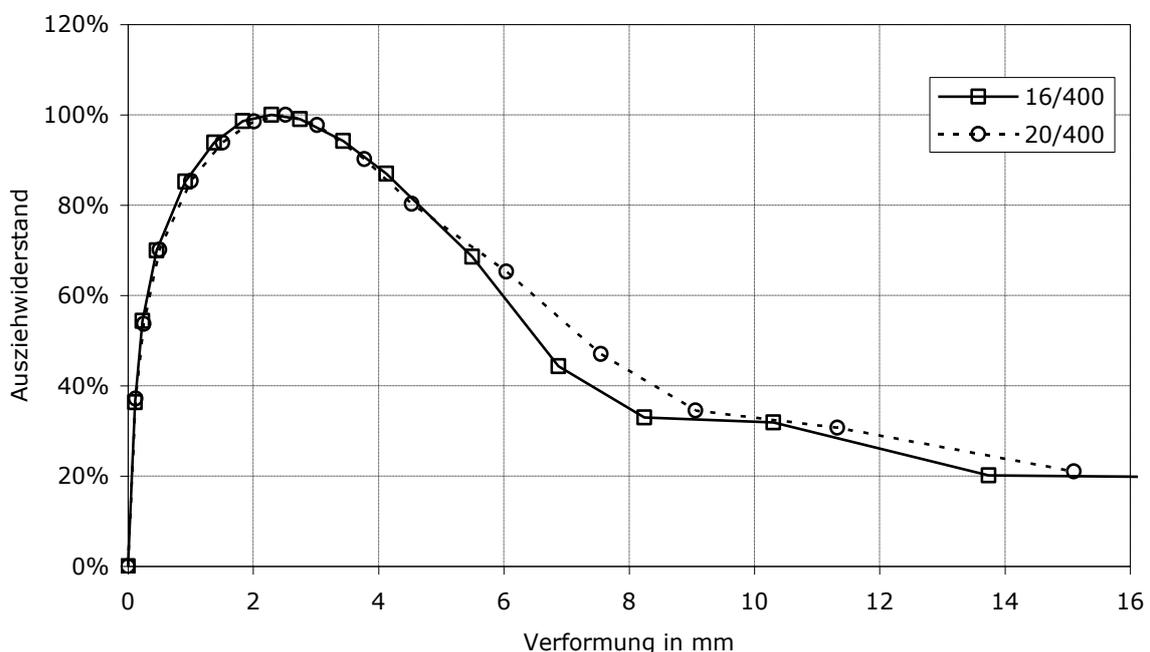
Abbildung 4: Versuchsanordnung, Herausziehen von Gewindestangen

Die Ergebnisse der 40 Ausziehversuche sind in Tabelle 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 verwendet werden. Ein Einfluss der Verankerungslänge auf die Grenzverformung δ_{ax} ist nicht zu erkennen.

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

\varnothing 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%)

Aus den Last-Verformungskurven der einzelnen Versuche wurden mittlere Last-Verformungskurven bestimmt. Für eine Verankerungslänge von 400 mm sind diese in Abbildung 5 dargestellt. Der Ausziehwiderstand wird in Relation zum Maximalwert angegeben.

Abbildung 5: Last-Verformungsbeziehung von Gewindestangen \varnothing 16 mm und \varnothing 20 mm

3. Prüfkörpergeometrie für Schubversagen

Bei den geplanten Versuchen sollte sowohl bei den unverstärkt geprüften Trägern als auch bei den schubverstärkten Trägern möglichst ein Schubversagen eintreten. Daher wurde für die Untersuchungen ein Stegträger mit im Vergleich zum schubbeanspruchten Steg breiteren Flanschen zur Erhöhung der Biegetragfähigkeit gewählt (Abbildung 6). Der Einfeldträger wird durch zwei Einzellasten beansprucht, so dass zwischen den Lasteinleitungsstellen über eine begrenzte Länge eine gleichmäßige Schubbeanspruchung eintreten kann. Der Querschnittsaufbau der Träger wurde in Anlehnung an Untersuchungen von Schickhofer und Pischl [3] festgelegt. Zur Ermittlung beanspruchungsgerechter Schubfestigkeiten wurden an der TU Graz Versuche mit Brettschichtholz-Stegträgern durchgeführt und der Aufbau der Träger hierzu optimiert.

Mit Hilfe numerischer Berechnungen wurden für diese Träger geeignete Verstärkungsmitelanordnungen ermittelt. Mit einigen der ermittelten Verstärkungskonfigurationen wurden Tragfähigkeitsversuche durchgeführt.

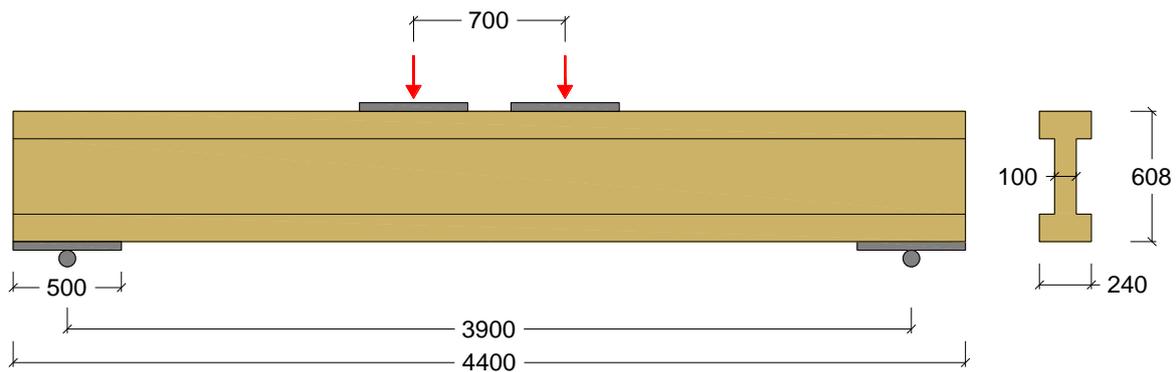


Abbildung 6: Versuchsaufbau und Trägergeometrie, Maße in mm

4. Numerische Berechnungen

Die numerischen Simulationen des Tragverhaltens schubverstärkter Träger wurden an einem Finite-Elemente-Modell mit ebenen Vier-Knoten-Elementen zur Abbildung der Trägerstruktur durchgeführt. Unter Ausnutzung der Symmetrie wurde das halbe Trägersystem modelliert. Die Verstärkungselemente werden durch Balkenelemente modelliert. Deren Verbundverhalten mit dem Holz wird über nichtlineare Federelemente, welche die Elementknoten von Träger und Verstärkungselement verknüpfen, abgebildet. Für die Berechnungen wurden die vorgestellten Verbundeigenschaften von Gewindestangen Durchmesser 16 mm mit einem Gewinde nach DIN 7998 verwendet. Für eine optimale Wirkung müssen die Verstärkungselemente geneigt unter einem Winkel von 45° zur Faserrichtung angeordnet werden.

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.

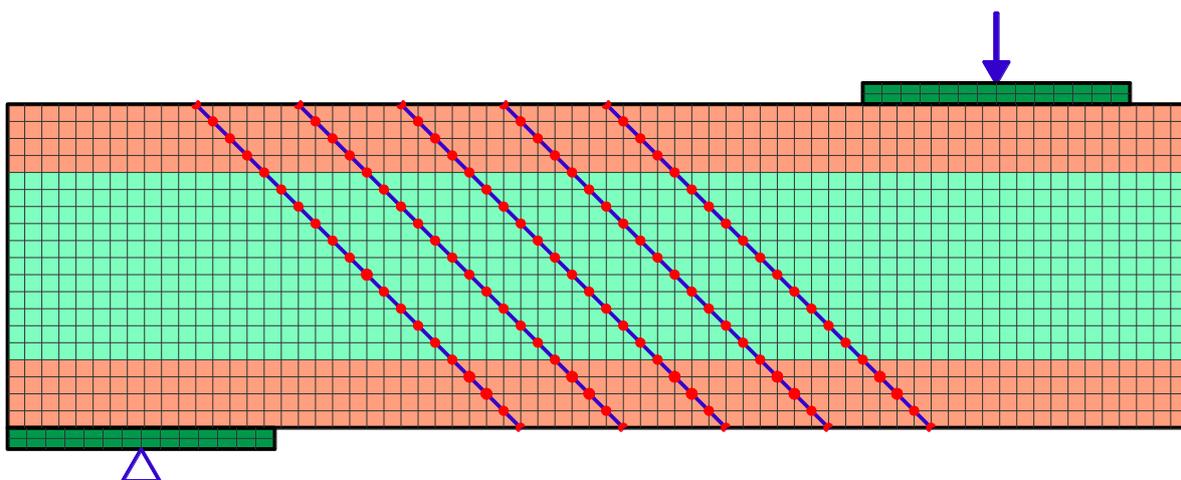


Abbildung 7: Numerisches Modell

Numerische Berechnungen wurden sowohl an dem in Abbildung 6 dargestellten durch Einzellasten beanspruchten Einfeldträger als auch an einem durch eine Gleichstreckenlast beanspruchten Träger durchgeführt. Die Trägerlänge beim Einfeldträger unter Gleichstreckenlast beträgt 7,00 m. Die Querschnittsgeometrie und die Ausbildung der Auflager sind identisch mit dem Träger unter Einzellasten.

Das Rechenmodell wurde anhand der durchgeführten Versuche mit unverstärkten Trägern kalibriert. Die angegebenen Traglaststeigerungen der schubverstärkten Träger beziehen sich auf eine Schubtragfähigkeit von $f_v = 4,35 \text{ N/mm}^2$. Dies ist der Mittelwert der Schubtragfähigkeit aus Versuchen mit unverstärkten Trägern. Der Wert der Schubfestigkeit ohne Querspannungen τ_0 aus Gleichung (2) wurde hierfür auf $4,17 \text{ N/mm}^2$ kalibriert.

Zur Ermittlung einer optimalen Verstärkungskonfiguration für einen gegebenen Einfeldträger wurden für unterschiedliche Stückzahlen von Verstärkungselementen je Trägerseite die Schubtragfähigkeitssteigerungen berechnet. Dabei wurden bei unveränderter Verstärkungsmittelanzahl der Abstand des ersten Verstärkungselements zum Hirnholzenende sowie der Abstand der Verstärkungselemente untereinander variiert.

In Abhängigkeit der Anzahl der verwendeten Verstärkungsmittel ergeben sich unterschiedliche Traglaststeigerungen und Anordnungen der Verstärkungsmittel. Abbildung 8 zeigt die berechneten Traglaststeigerungen für Beanspruchungen durch eine Einzellast und durch eine Streckenlast. Bereits mit wenigen Verstärkungselementen lassen sich Schubtragfähigkeitssteigerungen von 20 bis 30% erreichen. Mit steigender Verstärkungsmittelanzahl nimmt die Traglaststeigerung zu, das Verhältnis Traglaststeigerung pro Verstärkungselement verringert sich jedoch zunehmend.

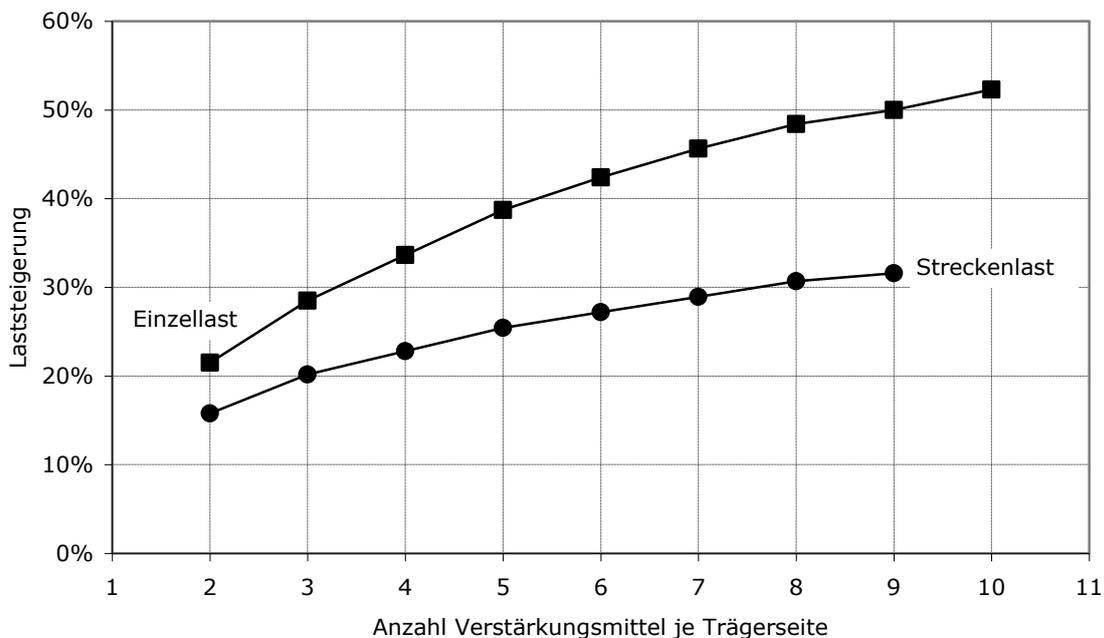
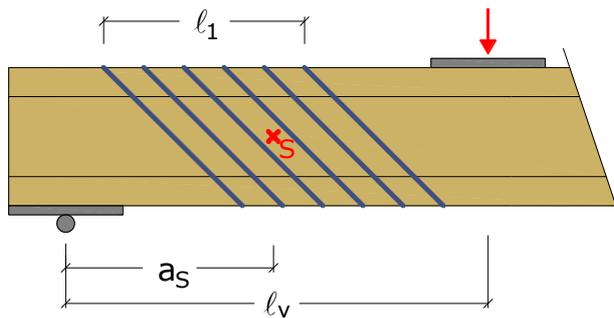


Abbildung 8: Berechnete Traglaststeigerungen in Abhängigkeit der Verstärkungsmittelanzahl

Um die dargestellten Tragfähigkeitssteigerungen zu erreichen, müssen die Verstärkungselemente gezielt angeordnet werden. In Abbildung 9 sind Abstände zur allgemeinen Beschreibung der Lage einer Verstärkungsmittelgruppe definiert. Der Abstand a_s beschreibt die Entfernung des Auflagerschwerpunktes zum Schwerpunkt einer Verstärkungsmittelgruppe. Der Abstand der beiden äußersten Verstärkungsmittel wird mit ℓ_1 bezeichnet. Zur allgemeinen Beschreibung der Verstärkungsmittelanzahl sind im Fall der Beanspruchung durch Einzellasten die beiden Werte auf den Bereich zwischen den Lasteinleitungsstellen mit der Länge ℓ_v bezogen. Bei einer Streckenlast dient die effektive Spannweite zwischen den Auflagerschwerpunkten ℓ_{ef} als Bezug.



Einzellast

$$a_S / l_V \approx 0,51$$

 l_1 / l_V s. Abbildung 10

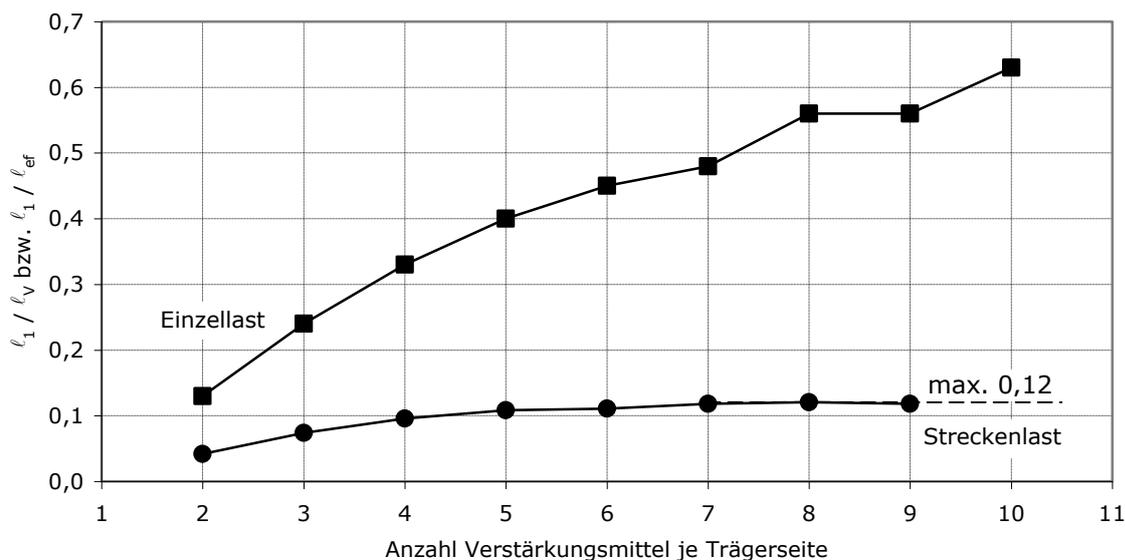
Streckenlast

$$a_S / l_V \approx 0,08$$

 l_1 / l_{ef} s. Abbildung 10

Abbildung 9: Definition der Abstände einer Verbindungsmittelgruppe

Die Anordnung der Verstärkungsmittel unterscheidet sich bei den beiden Beanspruchungsarten Einzellast und Gleichstreckenlast. Sie erfolgt analog zu den entsprechenden Querkraftverläufen. Bei einer Einzellast muss der gesamte Bereich zwischen den Lastenleitungsstellen verstärkt werden. Bei einer Streckenlast ist es hingegen ausreichend, den auflagernahen hochbeanspruchten Bereich zu verstärken. Mit zunehmender Anzahl werden Verstärkungsmittel konzentrierter angeordnet, so dass sich deren Abstand untereinander zunehmend verringert. Einzuhaltende Mindestabstände aber auch wirtschaftliche Aspekte begrenzen die Anzahl der Verstärkungselemente.

Abbildung 10: Abmessung l_1 von Verbindungsmittelgruppen

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 Abbildung 6. Bei den Versuchen sollte möglichst ein Schubversagen vor einem Biegeversagen erreicht werden, um aussagekräftige Ergebnisse im Hinblick auf die Wirksamkeit einer Verstärkungsmaßnahme zu erhalten. Als Referenz zur Tragfähigkeit der schubverstärkten Träger wurden zehn Träger im unverstärkten Zustand geprüft. Bei jedem dieser Versuche wurde ein Schubversagen des Trägers erreicht. Die mittlere Schubtragfähigkeit betrug $f_v = 4,35 \text{ N/mm}^2$. Das Versagensbild bei Schubversagen war zumeist durch einen Schubriss im Bereich des Übergangs zwischen Steg und Gurten gekennzeichnet. In einigen Fällen wurde auch ein Schubriss im Mittelbereich des Steges festgestellt.

Neben der Versuchsreihe mit den unverstärkten Trägern wurden fünf Versuchsreihen mit schubverstärkten Trägern geprüft. Die Versuchsreihen Z3 und Z4 gehen aus den vorgestellten numerischen Untersuchungen hervor. Bei den Versuchsreihen Z6, Z9 wurden die Verstärkungsmittel bis zum Hirnholzende angeordnet um dort das Schubversagen zu behindern. Bei der Verstärkungsvariante D9 wurden die Verstärkungselemente derart angeordnet, dass sie ausschließlich auf Druck beansprucht wurden.

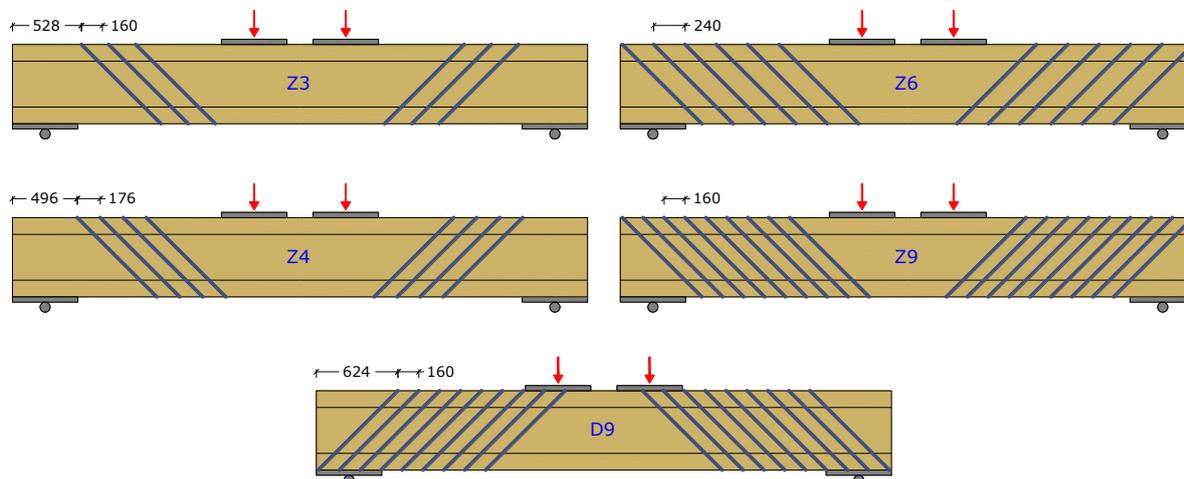


Abbildung 11: Geprüfte Verstärkungsanordnungen

Zur Verstärkung der Träger wurden Gewindestangen mit einem Durchmesser von 16 mm verwendet. Die Gewindestangen wurden unter 45° zur Faserrichtung in vorgebohrte Löcher eingedreht. Der Vorbohrdurchmesser betrug 12,5 mm. Die verwendeten Gewindestangen waren länger als das Bohrloch und ragten an beiden Enden aus dem Träger hinaus.

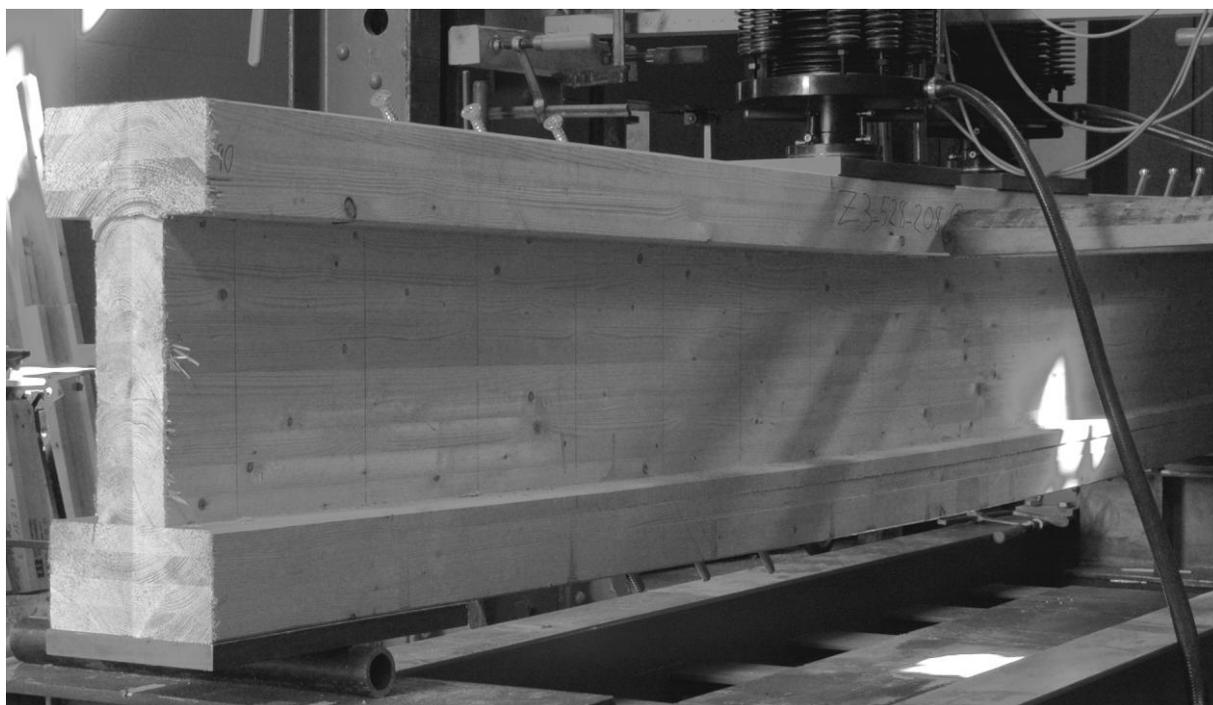


Abbildung 12: Versuch mit drei Verstärkungsmitteln je Seite nach Schubversagen

In Tabelle 2 sind die Versuchsergebnisse der verschiedenen Versuchsreihen zusammengefasst. Für jede Versuchsreihe mit schubverstärkten Trägern sind die Mittelwerte der Schubtragfähigkeit sowie die entsprechende Laststeigerung im Vergleich zum Mittelwert der Versuche mit den unverstärkten Trägern angegeben. Zum Vergleich der Versuchs-

gebnisse mit den Berechnungen sind in der letzten Spalte die mit dem Rechenmodell ermittelten Tragfähigkeitssteigerungen aufgeführt. Die Versuchs- und Berechnungsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung und bestätigen das entwickelte Rechenmodell.

Tabelle 2: Versuchsergebnisse

Versuchsreihe VM/Seite	Versuche	f_v N/mm ²	COV	Laststeigerung	
				Versuch	Berechnung
-	10	4,35	12,7%	-	-
Z3	3	5,39	8,7%	23%	28%
Z4	3	5,71	7,5%	31%	34%
Z6	3	5,77	3,1%	32%	31%
Z9	4	5,57*	3,3%	28%*	42%
D9	2	4,28	4,7%	-2%	-7%

* 3 von 4 Versuchen mit Biegeversagen

Verstärkungsmittel im Bereich des Hirnholzendes haben keine Auswirkungen auf die Erhöhung der Schubtragfähigkeit. So werden bei der Versuchsreihe Z4 mit einer geringeren Zahl von Verstärkungsmitteln bei einer optimierten Verstärkungsmittelanordnung identische Schubtragfähigkeitssteigerungen erreicht wie bei der Verstärkungsvariante Z6. Bei der Versuchsreihe Z9 konnte die berechnete Tragfähigkeitssteigerung nicht erreicht werden da bei drei von vier geprüften Trägern Biegezugversagen eintrat.

Die Versuche mit druckbeanspruchten Verstärkungsmitteln stützen die Annahmen des Rechenmodells. Die druckbeanspruchten Verstärkungselemente verringern zwar die Schubbeanspruchung des Holzes durch eine mechanische Entlastung, es entstehen dadurch jedoch zusätzliche Querspannungen wodurch aufgrund der Schub-Querspannungsinteraktion die ertragbare Schubspannung abnimmt. Beide Effekte heben sich gegenseitig in etwa auf.

6. Sanierung

Soweit der Zustand der unverstärkt geprüften Träger dies nach deren Prüfung erlaubte, wurden diese mit unterschiedlichen Arten von Verstärkungsmitteln saniert. Verwendet wurden neben Gewindestangen Durchmesser 16 mm mit einem Gewinde nach DIN 7998 auch Vollgewindeschrauben Durchmesser 12 mm bzw. 13 mm (U5S) sowie eingeklebte Stahlstäben M12 (U6S, U8S). Die unverstärkten Träger U1 bis U5 wurden im Versuch über das eigentliche Schubversagen hinaus weiter belastet um das Nachbruchverhalten zu beobachten. Bei den Trägern U6 bis U10 wurde die Belastung nach dem Eintritt des Schubversagens beendet. Der Schädigungsgrad der Träger U1 bis U5 war daher höher. Abbildung 13 zeigt die sanierten Träger, die visuell feststellbaren Schubriss sind gekennzeichnet.

Bei der Sanierung wurde versucht die Schubriss durch Zusammenpressen möglichst gut zu schließen. Ein vollständiges Schließen der Rissfugen war besonders bei den stärker beanspruchten Trägern nicht möglich. Anschließend wurden die Verstärkungselemente unter einem Winkel von 45° zur Faserrichtung angebracht. Auch die Trägerenden wurden verstärkt, um der gegenseitigen Verschiebung der Querschnittsteile entgegenzuwirken. Die Verstärkungsmittelanzahl wurde bei den Trägern U6S bis U10S anhand der notwendigen Schubkraftdeckung zur vollständigen Übertragung der Schubkräfte durch die Verstärkungselemente ermittelt. Hierzu waren sechs Verstärkungselemente je Trägerseite notwendig. Bei den Versuchen U1S bis U5S wurden unterschiedliche Varianten geprüft. Bei der Ermittlung der Verstärkungsmittelanzahl wurde hier ein Einfluss von Haftkräften

durch den entstehenden Querdruck in der Bruchfläche berücksichtigt. Die Mitwirkung von Haftkräften am Lastabtrag konnte durch die Versuche jedoch nicht belegt werden.

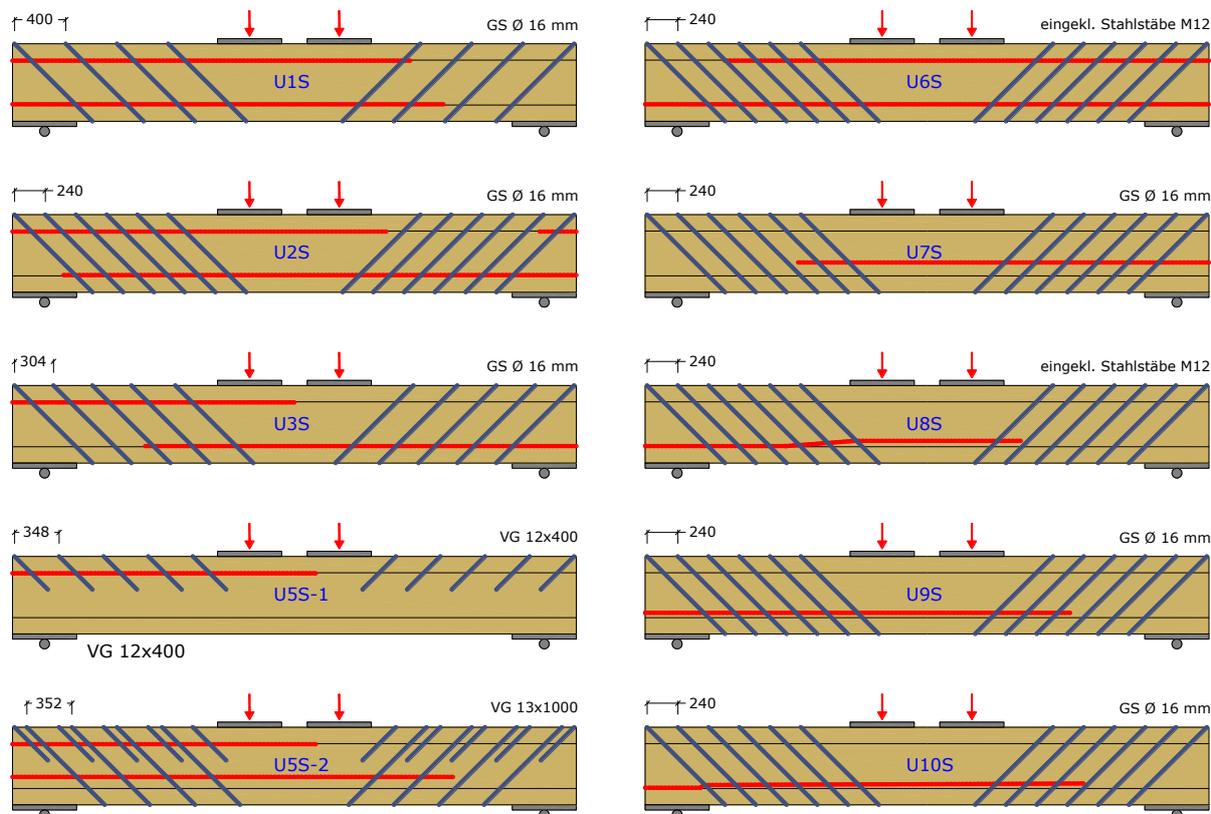


Abbildung 13: Sanierung der geprüften unverstärkten Träger

Tabelle 3: Ergebnisse der Versuche mit sanierten Trägern

Versuch	VM je Seite	$f_{v, \text{unverstärkt}}$ N/mm ²	$f_{v, \text{saniert}}$ N/mm ²	Änderung	Versagen
U1S	4 GS	4,48	3,89	-13%	Biegezug
U2S	6 GS	4,33	4,93	+14%	Biegezug
U3S	5 GS	4,70	3,94	-16%	Schub
U5S-1	5 VG	4,20	3,66	-13%	Schub
U5S-2	4 VG	4,20	3,65	-13%	Verstärkung
U6S	6 ES	4,73	5,20	+10%	Schub
U7S	6 GS	5,48	5,34	-3%	Schub
U8S	6 ES	3,81	5,01	+31%	Schub
U9S	6 GS	3,48	5,91	+70%	Schub
U10S	6 GS	4,10	5,02	+22%	Schub

GS: Gewindestangen VG: Vollgewindeschrauben ES: eingeklebte Stahlstäbe

Der Träger U5 wies nach der Prüfung einen Riss entlang des Überganges zwischen Steg und Obergurt auf. Bei der Sanierung wurden die Verstärkungsmittel nur im Bereich dieses Risses angeordnet. Im Versuch trat dann ein Schubversagen im unverstärkten unteren Trägerbereich ein. Die Traglast des unverstärkten Trägers wurde nicht erreicht. Der Träger wurde daraufhin erneut mit Vollgewindeschrauben saniert, die über die gesamte

Trägerhöhe durchliefen. Die Anzahl der Verstärkungselemente war jedoch zu gering, um die Ausgangstragfähigkeit des Trägers zu erreichen. Es trat ein Zugversagen der Verstärkungselemente ein.

Bei der Sanierung mit eingeklebten Stahlstäben M12 wurde die Schubbruchfuge planmäßig nicht verklebt. Ein Auslaufen von Klebstoff aus den Bohrlöchern in die Bruchfuge konnte jedoch nicht verhindert werden.

Bei der Prüfung der sanierten Träger wurden bei den im unverstärkten Zustand stärker beanspruchten Trägern U1 bis U5 die Ausgangstragfähigkeiten meist nicht erreicht. Bei den übrigen Trägern wurde die Ausgangstragfähigkeit der einzelnen Träger hingegen erreicht oder gar übertroffen. Bei den unverstärkt geprüften Trägern lag der mittlere wirksame Biegeelastizitätsmodul bei 9.460 N/mm^2 . Bei den sanierten Trägern sank der Wert auf 7.000 N/mm^2 .

7. Zusammenfassung

Ein Rechenmodell zur Simulation des Tragverhaltens schubverstärkter Träger wurde entwickelt. Das Modell berücksichtigt die Interaktion zwischen Schub- und Querspannung, die sich bei richtiger Anordnung der Verstärkungselemente günstig auf die Steigerung der Schubtragfähigkeit auswirkt. Die durchgeführten Versuche mit schubverstärkten Brett-schichtholzträgern zeigen, dass wirkungsvolle Schubverstärkungen bereits mit wenigen Verstärkungselementen möglich sind und bestätigen gleichzeitig das entwickelte Rechenmodell.

Für eine bestmögliche Tragfähigkeitssteigerung müssen die Verstärkungselemente gezielt angeordnet werden. Die erzielbare Tragfähigkeitssteigerung ist, neben der geometrischen Anordnung, abhängig von der Anzahl der verwendeten Verstärkungsmittel. Weitere Einflussfaktoren sind die Trägerhöhe und -breite sowie Art und Durchmesser des Verstärkungsmittels. Untersuchungen zu deren Einfluss auf die Schubtragfähigkeit verstärkter Träger stehen noch aus.

Durch Versuche konnte nachgewiesen werden, dass eine Sanierung bereits geschädigter Träger mit innen liegenden Verstärkungsmitteln wirkungsvoll möglich ist. Die Tragfähigkeiten der unverstärkten Träger konnte erreicht werden, falls vorhandene Schubbruchfugen bei der Sanierung durch zusammenpressen gut geschlossen werden konnten. Die Zahl der zur Sanierung notwendigen Verstärkungsmittel richtet sich dabei nach der erforderlichen zu übertragenden Schubkraft in der Bruchfläche.

8. Literatur

- [1] 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
- [2] Spengler T: Festigkeitsverhalten von Brettschichtholz unter zweiachsiger Beanspruchung, Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, Heft 62/1982, Technische Universität München, 1982
- [3] Schickhofer G., Pischl R.: Ermittlung beanspruchungsgerechter Schubfestigkeiten für eine wirtschaftliche Bauteilbemessung und Implementierung in nationalen und internationalen Normen, Bericht LR9901, Technische Universität Graz