

M. Enders-Comberg

Leistungsfähige Verbindungen des Ingenieurholzbaus

Einsatzmöglichkeiten für Nadel- und Laubholz

Leistungsfähige Verbindungen des Ingenieurholzbaus

Einsatzmöglichkeiten für Nadel- und Laubholz

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Markus Enders-Comberg
aus Neunkirchen (Saar)

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Februar 2015

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Blaß

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jan-Willem G. van de Kuilen

Karlsruhe 2015

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktionen des Karlsruher Instituts für Technologie. Zwei vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderte Forschungsvorhaben ermöglichten die Erarbeitung der hier dargestellten Ergebnisse.

Mein größter Dank gilt meinem Hauptreferenten Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Blaß für die Möglichkeit und die mir von ihm zugestandene Zeit zu promovieren. Die jederzeit hervorragende Betreuung in allen Bereichen und seine Bereitschaft, mir den nötigen wissenschaftlichen Freiraum zu lassen, haben diese Untersuchungen und die daraus resultierende Arbeit erst ermöglicht.

Für die freundliche Übernahme des Korreferats und die damit verbundenen Anregungen danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jan-Willem G. van de Kuilen, TU München, sehr herzlich.

Meinen Kollegen Alexander Klein, Michael Deeg, Sören Hartmann, Martin Huber, Günter Kranz, Michael Pfeifer, Michael Scheid und Werner Waldeck danke ich sehr herzlich für ihr Engagement und ihre kreative Mitarbeit bei der Durchführung der zahlreichen Versuche. Den Diplomanden bzw. studentischen Hilfskräften, die in jeglicher Form zu dieser Arbeit beigetragen haben, danke ich ebenfalls für ihr tatkräftiges Mitwirken.

Allen meinen Kollegen der Abteilung Holzbau und Baukonstruktionen danke ich für die kollegiale Unterstützung und den freundschaftlichen, nicht immer nur wissenschaftlichen, Austausch in zahlreichen Gesprächen. Das angenehme Arbeitsklima lässt mich gerne auf die vergangenen Jahre am Lehrstuhl zurückblicken.

Besonders dankbar bin ich meiner Frau Judith Enders-Comberg für das entgegengebrachte Verständnis und ihre uneingeschränkte Unterstützung während der letzten Jahre, die das Anfertigen meiner Dissertation in Karlsruhe erst möglich gemacht haben.

Markus Enders-Comberg

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mechanische Verbindungen und Kontaktverbindungen entwickelt, die darauf abzielen, die positiven Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der Holzart Buche zu nutzen und somit die Anwendungsmöglichkeiten des im Bausektor neu entdeckten Werkstoffs zu erweitern.

Für die mechanische Verbindung zweier auf Zug beanspruchter Bauteile wurden sowohl eingedrehte als auch eingeklebte Gewindestangen untersucht. Die stabförmigen Zugstäbe sind z. B. für den Einsatz in Fachwerkträgern prädestiniert und weisen eine hohe axiale Tragfähigkeit auf. Durch Auswertung von Versuchen konnte gezeigt werden, dass die hergeleiteten Bemessungsansätze für Verbindungen mit eingedrehter Gewindestange in Brettsperrholz hinreichend genaue und zugleich konservative Ergebnisse liefern. Dabei wurden die am Zugstabende wirkenden Spaltkräfte mit berücksichtigt.

Der Einfluss von Querschnittsschwächungen durch das Einbringen von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brett-schichtholz und Vollholz auf das Tragverhalten bei Zug- und Druckbeanspruchung parallel zur Faser wurde untersucht. Als wichtigstes Ergebnis zeigte sich, dass abweichend von der traditionellen Vorstellung, steife und satt ausfüllende Materialien könnten Querschnittsschwächungen bei Druckbeanspruchungen unschädlich überbrücken, der Querschnitt signifikant geschwächt wird und die Tragfähigkeit in nicht zu vernachlässigendem Maße abnimmt. Ein Simulationsmodell bestätigt diese Beobachtung und verdeutlicht die auftretenden Spannungsspitzen im Bereich der Schwächungen bei Druck parallel zur Faser. Es wird daher empfohlen, auch beim Tragfähigkeitsnachweis von Druck in Faserrichtung des Holzes grundsätzlich den Nettoquerschnitt zugrunde zu legen.

Im zweiten Teil der Arbeit, der sich mit Kontaktverbindungen beschäftigt, wurde ein modifizierter und optimierter Versatzanschluss (Treppenversatz) für eine unter einem Winkel von 35° bis 55° angeschlossene Druckstrebe wissenschaftlich untersucht. Mit Hilfe umfangreicher experimenteller Untersuchungen konnte das hohe Potenzial des Treppenversatzes gegenüber gängigen Versatzanschlüssen, wie Stirn- und Fersenversätzen, deutlich gemacht werden. Die Verwendung von Buchenholz im Verbindungsbereich hat einen positiven Einfluss auf die Steifigkeit und Tragfähigkeit der Bauteilanschlüsse. Darüber hinaus präsentiert die vorliegende Arbeit einen Bemessungsvorschlag für den anwendenden Ingenieur und weist auf ein mögliches Stabilitätsversagen der Druckstrebe bei effizient ausgenutzten Treppenversätzen hin.

Die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen von Mehrfachzapfen- und Schwalbenschwanzverbindungen aus Buchen-Brettschichtholz für den Einsatz in Holz-Glas-Fassaden haben gezeigt, dass sich aus konstruktiver Sicht sehr tragfähige und steife Pfosten-Riegel-Verbindungen realisieren lassen. Hierbei wurden verschiedenste Einflussparameter variiert und vier in Holz-Glas-Fassaden auftretende Lastfälle (Glaslast, Windsog, Winddruck und Kraft in Riegellängsrichtung) überprüft. Auf der Grundlage der durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen wird deutlich, dass CNC-Abbundmaschinen eine Renaissance von Kontaktverbindungen im Ingenieurholzbau ermöglichen und die benötigte Verbindungsmittelanzahl im Bereich des Pfosten-Riegel-Anschlusses gegenüber gängigen Verbindern deutlich zu reduzieren vermögen.

Abstract

This thesis is about the invention of mechanical connections and contact joints to support the utilization of beech wood for structural applications. The higher strength and stiffness values of hardwood products substantiate an efficient use of highly stressed constructions.

For a mechanical connection between two members, loaded by axial tension, specimens with screwed-in and glued-in rods were considered. These connections are predestined for uses in trusses because of their high axial load-carrying capacity and stiffness. By evaluating the pull-out capacity observed in tests it has been shown, that the proposed design-method for connections with screwed-in rods in cross laminated timber (CLT) provide realistic, but conservative results. Thus, an additional splitting force at the member's end was considered.

The influence of fastener holes in the tension and compression area of timber and glulam members on the load-carrying capacity under load parallel to the grain was studied. The most important conclusion from this study is that the cross-section under compression parallel to the grain is significantly weakened and hence the load-carrying capacity of the member in the connection area decreases. The traditional assumption, that reductions in the cross-sectional area may be ignored if holes are filled with a material of higher stiffness than the wood is wrong. A numerical simulation model supports this conclusion and identifies stress peaks in the vicinity of the fasteners. It is suggested to generally take into account reductions in the cross-sectional area in the member strength verification.

The second part of the thesis is dedicated to a study of a modified and optimized contact joint (multiple step joint) for compression diagonals in trusses with angles between 35° and 55° . The results of a range of experiments show the great potential of the multiple step joint compared with the established contact joints. Hardwood (beech) in the vicinity of the connection has a positive influence on the stiffness and the load-carrying capacity. A design proposal for engineers is presented in this thesis and covers possible stability failure of the compression member with efficiently utilized multiple step joints.

Tests to determine the load-carrying capacity of multiple mortise-and-tenon joints and dovetail connections consisting of beech wood revealed a bearing and stiff connection between mullions and transoms. Numerous influencing factors were considered and four loading conditions (dead load, wind suction, wind pressure and load in longitudinal axis) were investigated. State-of-the-art CNC milling machines open up the possibility to link wooden elements of a facade through contact joints. Thus the number of the fasteners in the vicinity of the connection between mullions and transoms could be reduced in comparison with common connectors.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziel der Arbeit	3
1.3	Kenntnisstand	4
1.4	Vorgehensweise	5
2	Mechanische Verbindungsmittel	7
2.1	Allgemeines	7
2.2	Gewindestangen in Brettsperrholz	10
2.2.1	Allgemeines	10
2.2.2	Material und Methode	11
2.2.3	Ergebnisse	15
2.2.4	Diskussion	18
2.2.5	Bemessungsvorschlag	30
2.2.6	Zusammenfassung	38
2.3	Auszieh widerstand von Gewindestangen	41
2.3.1	Eingedrehte Gewindestangen unter 45° und 90° ...	41
2.3.2	Faserparallel eingeklebte Gewindestäbe	52
2.3.3	Vergleich Ausziehtragfähigkeiten	58
2.4	Querschnittsschwächung im Druckbereich	61
2.4.1	Allgemeines	61
2.4.2	Material und Methode	63
2.4.3	Ergebnisse	72
2.4.4	Diskussion	84
2.4.5	FE-Simulation des druckbeanspruchten Bereichs...	88
2.4.6	Zusammenfassung	93
2.5	Querschnittsschwächung im Zugbereich	95
2.5.1	Allgemeines	95
2.5.2	Material und Methode	95

2.5.3	Ergebnisse	98
2.5.4	Diskussion.....	99
2.5.5	Zugtragfähigkeit unter Berücksichtigung des Längeneffekts und simulierter Festigkeitswerte ...	102
3	Kontaktverbindungen.....	115
3.1	Allgemeines	115
3.2	Versätze	115
3.2.1	Allgemeines.....	115
3.2.2	Geometrie Treppenversatz.....	118
3.2.3	Abbund.....	123
3.2.4	Experimentelle Untersuchung.....	124
3.2.5	Bemessungsvorschlag.....	143
3.2.6	Zusammenfassung	158
3.3	Mehrfachzapfen und Schwalbenschwanz.....	161
3.3.1	Allgemeines.....	161
3.3.2	Varianten möglicher Zapfenverbindungen.....	163
3.3.3	Experimentelle Untersuchung der Schwalbenschwanzverbindung.....	171
3.3.4	Zusammenfassung	199
4	Zusammenfassung und Ausblick	201
	Literaturverzeichnis	205
	Zitierte Normen.....	213
	Zitierte Zulassungen	215
	Bezeichnungen	217
	Anhang.....	225

1 Einleitung

1.1 Motivation

Buchenholz mit dem botanischen Namen *Fagus sylvatica* L. gilt als schweres und festes Laubholz mit einer widerstandsfähigen Oberfläche und findet häufig Verwendung in Möbeln, Türen, Treppen, Fußböden, Schäl furnieren etc. (nach Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2012). Die Beweggründe der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit dem Thema der Verwendbarkeit von Buchenholz lassen sich in der Forstwirtschaft und der stofflichen bzw. energetischen Nutzung von deutschen Hölzern finden. Die benötigte Buchenholzmenge für die oben erwähnten Einsatzmöglichkeiten des Möbelbaus ist vernachlässigbar gering. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit soll auf der stofflichen Nutzung im Bereich des Ingenieurholzbaus liegen und das hohe Potenzial des Werkstoffs Buchenholz im Vergleich zum Nadelholz aufzeigen. Mantau (2012) zeigt, dass lediglich ca. 5 % des Schnittholzes in Deutschland aus Laubhölzern besteht, gleichzeitig liegt der Laubholzanteil am Brennholzverbrauch über 50 %. Die hohe Bedeutung und häufige stoffliche Verwendung von Nadelholz führt unweigerlich zur Verknappung und gleichzeitig zur Preissteigerung. Voraussichtlich wird die Nachfrage bei abnehmender Verfügbarkeit weiter steigen (Mrosek 2013). Die bestehenden Prüfnormen, Produktnormen, Sortiervorschriften und die gesamte Holzverarbeitung sind stark auf das Nadelholz ausgerichtet und nahezu alle bestehenden Erfahrungen beruhen auf der Verwendung von Koniferen. Aufgrund dessen hat die Forstwirtschaft über Jahrhunderte den Wald zugunsten der Nadelholzproduktion umgestaltet. Nadelbäume wie Fichte, Tanne, Kiefer und Lärche haben die Vorteile der geringen Abholzigkeit, der geringen Ovalität, der langen und geraden Stämme und der kleinen Äste im

Gegensatz zu den meisten Laubbäumen. Zudem ist eine Laubholz-trocknung durch den strukturellen Aufbau energie- und zeitaufwendig. Die Verarbeitung erfordert spezielle Werkzeuge, viel Erfahrung und einen hohen Kenntnisstand. In den letzten Jahren ist durch die Förderpolitik der Bundesregierung der Anteil der Laub- und Mischwälder an der Gesamtfläche der Wälder in der Bundesrepublik Deutschland auf 68 % gestiegen. Nach Bleser (2012) führt die Bestrebung zur Anpassung der Wälder an die vorhandenen Umwelteinflüsse und an den fortschreitenden Klimawandel, der Stabilisierung gegen Naturkatastrophen und aus ökologischen Gründen zu einem höheren (ständig steigenden) Laub- und Mischwaldanteil. Im Gegensatz zum geringen Nadelholzzuwachs wird momentan nur ungefähr die Hälfte des Laubholzzuwachses genutzt, da Verarbeitungs- und Verwendungsmöglichkeiten fehlen. Damit einhergehend ist die Problematik, dass notwendige Produktnormen, bauaufsichtliche Zulassungen und Bemessungskenngrößen nicht existieren und ein hoher Forschungsbedarf im Bereich Laubhölzer besteht. Die Verwendungsstrukturen stehen im Gegensatz zur Holzartenverteilung im deutschen Wald. Das im letzten Jahrzehnt enorm gestiegene Interesse der privaten Haushalte an der energetischen Nutzung von Holzprodukten muss kritisch betrachtet werden. Der thermischen Verwertung sollte eine stoffliche Verwendung vorangestellt werden. Die aktuellen Forschungsbemühungen mehrerer Einrichtungen, Veranstaltungen wie die Gölzower Fachgespräche (2012) und z. B. Veröffentlichungen von Frese (2012) sowie von Krackler und Niemz (2011) zeigen große Nutzungspotenziale beim Laubholz und insbesondere beim Buchenholz auf. Der Einsatz von Buchenholz in Bauteilen des Ingenieurholzbaus wird in dieser Arbeit wissenschaftlich untersucht und somit zu einem erhöhten Einsatz von Buchenholz in der stofflichen Nutzung beitragen. Hierfür sind innovative Verbindungen notwendig, die auf die positiven Eigenschaften des Buchenholzes abgestimmt sind und dadurch effiziente Verbindungen entstehen lassen. Die Erforschung solcher neuer Verbindungen

dungsmöglichkeiten und der Vergleich mit konkurrierenden Nadelholzprodukten wurden angestrebt.

1.2 Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit präsentiert innovative Verbindungen für den Ingenieurholzbau und zeigt konkrete Einsatzmöglichkeiten von Holzwerkstoffen aus Buche auf. Die Vorteile der Buche gegenüber Nadelholz werden in vergleichenden Betrachtungen verdeutlicht. Die Berücksichtigung von Brettschichtholz (BSH), Brettsperrholz (BSP), Furnierschichtholz (FSH), Hybrid-Brettschichtholz (Hybrid-BSH) und Vollholz (VH) aus Buche machen die breite Palette der Anwendungsmöglichkeiten deutlich. Gerade im konstruktiven Bereich bieten diese Baustoffe tragfähige und auch architektonisch anspruchsvolle Lösungen. Die Bestrebungen, Buchenholz für praktische Anwendungen des Ingenieurholzbaus attraktiver zu machen, haben z. B. zur bauaufsichtlichen Zulassung Z-9.1-679 von Buchen-BSH bzw. Hybrid-BSH und somit zu verwendbaren mechanischen Kenngrößen für die Bemessung von Bauteilen geführt. Um diesen Trend weiterzuführen, werden im Rahmen dieser Arbeit zwei Einsatzgebiete näher betrachtet: Mechanische Verbindungen und Kontaktverbindungen des Ingenieurholzbaus. Für Architekten und Tragwerksplaner spielen zunehmend ästhetische Aspekte und damit meist eine filigranere Bauweise eine wichtige Rolle. Gleichzeitig nehmen die auf die Struktur wirkenden Lasten (Photovoltaikanlage, Haustechnik, Dreischichtverglasung etc.) zu und erfordern tragfähige und verformungsarme Verbindungen und Bauteile. Innovative Entwicklungen wie der Treppenversatz, eingedrehte Gewindestangen in BSP, Verwendung von FSH aus Buche, Mehrfachzapfenverbindungen und ein Schwalbenschwanzanschluss in Holz-Glas-Fassaden werden vorgestellt, wissenschaftlich untersucht und Bemessungsvorschläge präsentiert.

1.3 Kenntnisstand

Obwohl das hohe Potenzial von Buchenholz schon seit langer Zeit bekannt ist, hat sich dieser Werkstoff gegen das Nadelholz im Bausektor nicht durchsetzen können. Im Folgenden soll die Entwicklung des Buchenholzes in den wichtigsten Etappen kurz dargestellt werden. Egner und Kolb (1966) stellten durch Versuche anhand von drei Buchen-Biegeträgern fest, dass die rechnerische Bruchspannung 40 % bis 120 % über den vergleichbaren Werten von Fichtenholz lag. Die damalige Herstellerfirma hat zudem mitgeteilt, dass Buchenholz grundsätzlich in fertigungstechnischer Hinsicht zur Erzeugung von BSH geeignet ist. Gleichzeitig wurden Bedenken der Wirtschaftlichkeit aufgrund eines hohen Verschnitts, langer Bearbeitungszeiten, hoher Beanspruchung der Werkzeuge und der Presseinrichtung geäußert. Gehri (1985 und 1998) zeigte, dass nicht nur die Biege- und Zugtragfähigkeit des Buchenholzes über den Werten des Nadelholzes liegen, sondern auch eine doppelte Anschlusskraft in einer Stabdübelverbindung durch den Einsatz von Buchenholz übertragen werden kann. Zudem gibt er an, dass durch eine geeignete Festigkeitssortierung der Lamellen die charakteristische Biegefestigkeit von Buchen-BSH von 60 N/mm^2 erreicht werden kann. Des Weiteren sei die Steigerung der Lochleibungsfestigkeit durch die Verwendung von Holz mit einer hohen Rohdichte deutlich höher als von der damals gültigen Bemessungsnorm angenommen. Obwohl die guten Eigenschaften von Buchen-BSH seit den 60er Jahren bekannt sind, wurde Buchenholz nur selten konstruktiv verwendet. In den letzten 15 Jahren folgten systematische Untersuchungen zur Festigkeitssortierung von Buchenbrettern, Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindungen, Delaminierungseffekte und zur Bestimmung der Zug- und Biegefestigkeit (Glos und Lederer 2000, Aicher et al. 2001, Frühwald et al. 2003 und Frühwald und Schickhofer 2004, Becker und Ressel 2004, Blaß et al. 2005a, Frese und Riedler 2010, Aicher und Ohnesorge 2011 etc.). Die Ableitung von Festigkeitswerten, welche im Jahr 2009 zur Erstellung der bauaufsichtlichen Zulas-

sung Z-9.1-679 führten, lieferte Frese (2006). Glos und Näher (2005) haben dazu beigetragen, dass 2007 die Holzart Buche erstmals als „Bauholz für tragende Zwecke“ in DIN EN 1912 aufgenommen wurde. Zudem enthält DIN EN 338 charakteristische Festigkeits- und Steifigkeitswerte von Bauhölzern aus den Festigkeitsklassen für Nadelholz (C14 bis C50) und Laubholz (D18 bis D70). Die Werte für Laubhölzer wurden allerdings zum Teil mithilfe von Umrechnungsfaktoren hergeleitet, sodass die tatsächlichen Festigkeiten unterschätzt werden. Die Bestrebungen mehrerer Forschungs- und Entwicklungsvorhaben der letzten Jahre, realitätsnahe Festigkeitswerte für baupraktische Anwendungen zu ermitteln, haben das hohe Potenzial der Buche bestätigt und die Aufnahme hoher mechanischer Kenngrößen in Produktnormen ermöglicht (vgl. Schmidt et al. 2012). Umfangreiche Untersuchungen von Hübner (2013) geben Aufschluss über charakteristische Werte mechanischer Kenngrößen von Buchenholz für lastabtragende Bauteile. Hierbei werden Auszieh widerstände, Lochleibungsfestigkeiten, Querdruck- und Quertzugseigenschaften bestimmt. Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen (u. a. Knorz und van de Kuilen 2012 und Knorz et al. 2013) von industriell gefertigtem Buchen-FSH führten 2013 zu den bauaufsichtlichen Zulassungen Z-9.1-837 und Z-9.1-838. Das Potenzial, aber auch die Schwierigkeiten von Buchenholz zeigen beispielsweise Frese (2012), Sandhaas und Frese (2014) und Enders-Comberg et al. (2015). Hierbei wird deutlich, dass das Potenzial der Buche nur genutzt werden kann, wenn tragfähige Verbindungen realisiert werden können und die Werkstoffe aus Buche intensiv untersucht wurden. Der Stand der Technik in Bezug auf die zu untersuchende Verbindungsmöglichkeit wird hier nicht näher betrachtet und erst in dem jeweiligen, dafür vorgesehenen Kapitel erläutert.

1.4 Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit präsentiert die Entwicklung innovativer Verbindungsmöglichkeiten im Ingenieurholzbau und zeigt praktische An-

wendungsbeispiele für Buchenholzprodukte (vgl. Bild 1-1) auf. Die Arbeit ist in zwei große Abschnitte gegliedert. Der erste Teil beschäftigt sich mit mechanischen Verbindungen, die sich primär auf Verbindungen mit Gewindestangen beschränken. Die Tragfähigkeit der Verbindungen wird bestimmt und Bemessungsvorschläge vorgestellt. Zusätzlich wird der tragfähigkeitsmindernde Versagensfall „Spalten“ näher betrachtet und ein mechanisches Modell hergeleitet, um die auftretende Spaltkraft bei eingedrehten Gewindestangen in Zugstäben rechnerisch zu bestimmen. Im Rahmen dieser Betrachtung wird auch die Querschnittsschwächung im druck- bzw. zugbeanspruchten Holzquerschnitt mit eingebrachten mechanischen Verbindungsmitteln untersucht. Der zweite Teil der Arbeit befasst sich mit Kontaktverbindungen für die Anwendungsfälle „Druckstrebe“ und „Holz-Glas-Fassade“. Hierbei geht es weniger um die präzise Erforschung mechanischer Kenngrößen, vielmehr wird ein Hauptaugenmerk auf einen praktischen Einsatz gelegt und die Einsatzmöglichkeiten von Buchenholz und den damit verbundenen Vorteilen verdeutlicht.



Bild 1-1 Hybrid-BSH, Buchen-BSH, Bu-FSH und Bu-FSH mit Querlagen

2 Mechanische Verbindungsmittel

2.1 Allgemeines

Ein Fachwerk ist ein Tragsystem aus mehreren Stäben, die durch Gelenke an den Stabenden miteinander verbunden sind. Ein Fach besteht aus drei Stäben, welche im Wesentlichen durch Längskräfte beansprucht werden, vorausgesetzt die Einleitung der Lasten erfolgt in den Knotenpunkten. Schon im 19. Jahrhundert schreibt Culmann (1866) in seiner Arbeit, zit. nach Pasternak et al. (2010): „In jeder Beziehung erscheint ... das Fachwerk als die vollkommenste Construction; und in neuerer Zeit ist es gar fein ausgebildet worden und hat an Verbreitung außerordentlich gewonnen“. Diese Feststellung von Culmann trifft auch heute noch zu und macht die Attraktivität von Fachwerkträgern im Hochbau deutlich. Sichtbare Fachwerkträger aus Holz sind im industriellen Holzbau vergleichsweise selten, obwohl der aufgelöste Fachwerkträger im Vergleich zum Vollwandträger einige Vorteile aufweist. Neben der aufgelösten Form und den damit verbundenen optischen Vorzügen, ist auch der Materialverbrauch bei Fachwerkträgern deutlich geringer als bei massiven Tragsystemen. Die Betrachtung von gängigen Fachwerkträgertypen zeigt, dass lediglich im nicht sichtbaren Bereich für Spannweiten zwischen 15 m und 30 m Nagelplattenbinder aufgrund einer schnellen und wirtschaftlichen Bemessung durch Softwareunterstützung sehr erfolgreich sind. Zusätzlich ist die Verbindung mit Nagelplatten sehr effizient, da die Stabquerschnitte kaum geschwächt werden und nahezu der volle Stabquerschnitt zur Kraftübertragung zur Verfügung steht. Gerade bei großer Stückzahl erweist sich die Herstellung von Nagelplattenbindern als sehr wirtschaftlich. Allerdings sind diese Konstruktionen bei Brandbeanspruchung als äußerst kritisch anzusehen. Im Gegensatz dazu sind Stabdübelverbindungen in Fachwerkträgern sehr arbeitsintensiv

und schwächen den Bruttoquerschnitt signifikant. Trotz einiger Vorteile von Verbindungen mit beispielsweise Nagelplatten oder Stabdübeln wird ein Optimierungsbedarf im Ingenieurholzbau deutlich. Die Wirtschaftlichkeit von Fachwerkträgern wird hauptsächlich von der Ausbildung der Stabanschlüsse bestimmt. Die effiziente Verbindung zweier Bauteile ist sowohl herausfordernd als auch zwingend erforderlich, um den Holzbau und die Verwendung des tragfähigen Buchenholzes zu fördern. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens (Blaß und Enders-Comberg 2012) wurde ein Fachwerkträger für den industriellen Holzbau entwickelt, welcher zu anderen Fachwerkformen konkurrenzfähig ist und sowohl effiziente als auch ästhetische Knotenverbindungen bietet, die darüber hinaus auch eine hohe Feuerwiderstandsdauer aufweisen. Ziel sollte es auch sein, die Verbindungen schnell und ohne großen Aufwand auf der Baustelle herstellen zu können.

Im Folgenden werden Versuchsergebnisse von in Brettsperrholz (BSP) eingedrehten Gewindestangen (GS) und eingeklebten Gewindestangen, welche in axialer Richtung des Verbindungsmittels auf Zug beansprucht werden, vorgestellt. Die Verbindung des Füllstabes mit dem Gurt und der damit einhergehenden Ausziehtragfähigkeit in Hybrid-BSH bzw. Furnierschichtholz wurde ebenfalls mittels experimenteller Versuchsreihen untersucht. Außerdem wird der Einfluss einer Querschnittsschwächung auf die Druck- und Zugfestigkeit parallel zur Faser in Vollholz und Brettschichtholz (z. B. eines Fachwerkgurtes, vgl. Bild 2-1) in der vorliegenden Arbeit betrachtet. Neben der Verwendung gängiger Bauprodukte aus Nadelholz wird auch Buchenholz berücksichtigt und den Nadelholzverbindungen vergleichend gegenübergestellt.

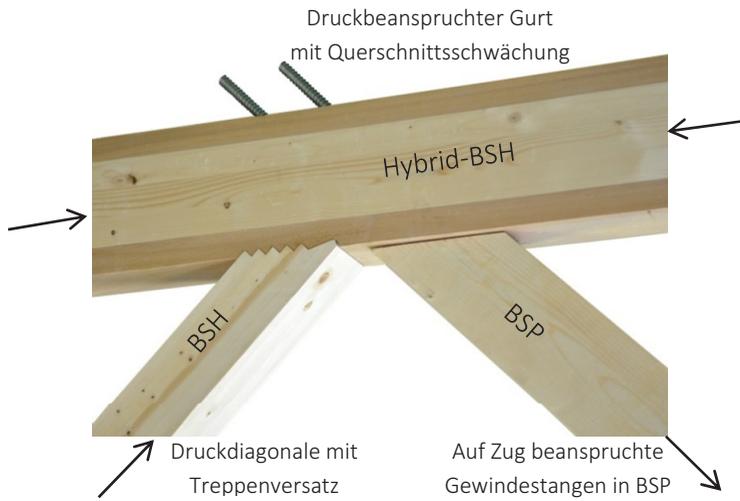


Bild 2-1 Fachwerkknoten eines Obergurtes

2.2 Gewindestangen in Brettsperrholz

2.2.1 Allgemeines

Im Hinblick auf Klimaschutz, Erbebensicherheit, Formstabilität, Vorfertigung und Massenproduktion ist in den letzten Jahren ein steigender Bedarf an Brettsperrholz (BSP) zu verzeichnen. Durch das Verkleben einzelner kreuzweise angeordneter Bretter entsteht ein flächiger Werkstoff, dessen Scheiben- und Plattenwirkung einen Einsatz als Dach-, Decken- oder Wandbauteil ermöglicht. BSP zeichnet sich durch eine hohe Tragfähigkeit und sein flächiges Tragverhalten aus. Die Bemessung erfolgt nach DIN EN 1995 unter Berücksichtigung der Angaben der Zulassungen. Neben der flächigen Nutzung des Brettsperrholzes soll ein Einsatz als stabförmiges Bauteil ebenfalls ermöglicht werden. Blaß und Flaig (2012) zeigen Anwendungsmöglichkeiten von auf Biegung beanspruchten, stabförmigen Bauteilen aus Brettsperrholz auf. Blaß (2008) präsentierte bereits mehrere Jahre zuvor einen möglichen Zuganschluss in Brettsperrholz für die Ausbildung der Füllstäbe in Fachwerkträgern. Da sowohl die Zug- als auch die Druckstäbe in einem Fachwerk fast ausschließlich durch Normalkräfte beansprucht werden, wird angestrebt, einen Holzwerkstoff zu verwenden, der eine hohe Zug- bzw. Drucktragfähigkeit in Stablängsachse besitzt. Im Verbindungsbereich der Füllstäbe mit den Gurten soll darauf geachtet werden, dass die Schwächung des Holzquerschnittes möglichst gering gehalten und eine steife Verbindung zwischen den Bauteilen realisiert wird. Frühere Untersuchungen (Blaß et al. 2006) haben gezeigt, dass in Achsrichtung beanspruchte Holzschrauben und Gewindestangen hohe Kräfte übertragen können und damit sehr steife Verbindungen entstehen. Da das Langzeitverhalten von faserparallel eingedrehten Verbindungsmitteln nicht ausreichend bekannt ist, sind in Hirnholz eingebrachte Verbindungsmittel nur in Ausnahmefällen zugelassen. Uibel (2013) stellt die wichtigsten Erkenntnisse der 5-jährigen Forschungsarbeit am Lehrstuhl für Holzbau des Karlsruher

Instituts für Technologie dar, welche sich mit dem Tragverhalten von Verbindungen für die Brettsperrholzbauweise beschäftigt hat. „Die Langzeitversuche in einem Klima der Nutzungsklasse 2 bestätigen die vermutete geringe Herausziehtragfähigkeit bei faserparallel angeordneten Schrauben bei längerer Lasteinwirkungsdauer“ (Uibel 2013). Um eine Verbindung mit Gewindestangen parallel zur Stabachse zu realisieren, wird Brettsperrholz in den Zugdiagonalen verwendet, die Verbindungsmittel werden parallel zur Stablängsachse, aber rechtwinklig zur Faser in die Querlagen eingebracht. Aus einem Forschungsvorhaben über die Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsperrholz (Blaß und Uibel 2007) ist bekannt, dass planmäßig in die Querlage eingedrehte Schrauben eine Ausziehtragfähigkeit aufweisen, die der Tragfähigkeit von rechtwinklig zur Faserrichtung eingebrachten Schrauben in Vollholz bzw. Brettschichtholz entspricht. Der Einsatz von eingedrehten Gewindestangen in Brettsperrholz als stabförmiges Bauteil zur Aufnahme von hohen Zugkräften scheint eine vielversprechende Anwendungsmöglichkeit zu sein, welche in diesem Kapitel näher betrachtet wird. Neben Ergebnissen aus experimentellen Untersuchungen sollen Produktions- und Anwendungshinweise gegeben werden. Für die Baupraxis relevante Bemessungsvorschläge werden ebenfalls erläutert. Für die Versuche wurden sowohl Brettsperrholz-Produkte aus Nadelholz als auch ein aus kreuzweise verklebten Buchenfurnierschichtholzplatten hergestellter Werkstoff verwendet.

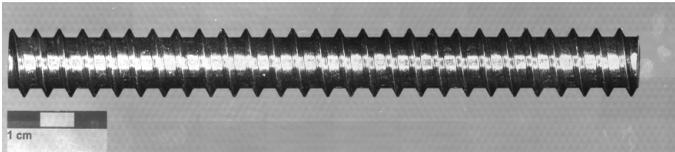
2.2.2 Material und Methode

Die Betrachtung des Tragverhaltens einer in BSP eingedrehten Gewindestange umfasste umfangreiche experimentelle Untersuchungen. Die Ausziehkräfte wurden für unter 90° zur Holzfaserrichtung der Querlage eingeschraubten Gewindestangen (s. Bild 2-2) experimentell ermittelt. Die verwendeten Gewindestangen sind nach allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung Nr. Z-9.1-777 zugelassen. Die

Einschraubblängen der Gewindestangen im vorgebohrten Holz reichten von 200 mm bis 800 mm. Die Vorbohrdurchmesser betragen 13 mm für Gewindestangen mit Nenndurchmesser 16 mm sowie 16 mm für Gewindestangen mit einem Nenndurchmesser von 20 mm.

Tabelle 2-1 Informationen zu den verwendeten Gewindestangen

SFS WB nach Z-9.1-777	Ø 16 mm	Ø 20 mm
Gewindeaußendurchmesser	≈ 16 mm	≈ 20 mm
Gewindeinnendurchmesser	≈ 12 mm	≈ 15 mm
Mittelwert der Stahlzugtragfähigkeit $R_{t,u,mean}$	100 kN	175 kN
$F_{ax,mean}$ in BSH mit Einschraubwinkel 90° und Einschraublänge 400 mm	94,1 kN	115 kN



Die Holzwerkstoffe der Reihen 1 bis 12 (vgl. Tabelle 2-2) wurden von der Firma Finnforest Merk GmbH hergestellt und anschließend in der Versuchshalle der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine am KIT bei einem Umgebungsklima nach Nutzungsklasse 1 nach DIN EN 1995 gelagert und geprüft. Die Längslagen der Versuchskörper bestehen aus Furnierschichtholz aus Nadelholz (KERTO®-S) und die Querlagen aus Nadelvollholz (Sortierklasse S10). Auf die Ermittlung der Materialkennwerte der Nadelholzprüfkörper wurde im Rahmen dieses Versuchsprogramms verzichtet, da das erwartete Versagen (Rollschub) kaum von der Rohdichte, sondern von der Verklebung und der Jahringlage der Bretter in der Querlage maßgebend beeinflusst wird. Die Versuchskörper, bestehend aus Buchenfurnierschichtholz (Bu-FSH), der Reihen 13 bis 15 wurden von der Firma Pollmeier Massivholz

GmbH & Co. KG geliefert und hatten eine mittlere Holzfeuchte von 7,5 % zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung. Durch Variation von Verbindungsmitteldurchmesser d , Einschraublänge L_{ef} , Randabstand $a_{1,c}$ und Verbindungsmittelabstand a_1 untereinander sollten die Versagensformen der Verbindung untersucht werden. Die Eigenschaften der Gewindestangen wurden in früheren Versuchen bestimmt (s. Tabelle 2-1). Auf der Grundlage dieser Untersuchungen wurden die Versuchskörper mit einem Verbindungsmittel bzw. drei Verbindungsmitteln pro Anschluss geplant. Der Querschnitt der Verbindung ist in Bild 2-3 (rechts) dargestellt. Pro Versuchskonfiguration wurden 5 Ausziehversuche durchgeführt. Die Ausziehversuche wurden in Anlehnung an DIN EN 1382 mithilfe einer Universalprüfmaschine durchgeführt. Dazu wurden die symmetrisch aufgebauten Prüfkörper an den Enden eingespannt und in axialer Richtung der Gewindestange belastet (s. Bild 2-3). Die Prüfkörper mit einer Gewindestange des Durchmessers $d = 16$ mm wurden mit einer gleichförmigen Belastungsgeschwindigkeit von 70 kN/min und die Prüfkörper mit einer Gewindestange des Durchmessers $d = 20$ mm mit 100 kN/min belastet. Somit wurde die Maximallast nach 90 ± 30 Sekunden erreicht. Die Verformungen zwischen Gewindestange und Holzstab wurden mit zwei induktiven Wegaufnehmern pro Verbindung gemessen. Um ein frühzeitiges Aufspalten an den Stirnflächen der Prüfkörper zu unterbinden, ist es notwendig, je Verbindung mindestens vier Vollgewindeschrauben $\varnothing 6$ mm zur Querzugverstärkung einzubringen (s. Bild 2-2). Weitere Informationen zur Einbringung der Querzugverstärkung sind im Anhang (Bild A-1 und Tabelle A-1) dargestellt.

Die Zugkräfte müssen bei Beanspruchung der Gewindestangen in Längsrichtung über die Verbindungsmittel und deren Gewinde in die Querlage eingeleitet und von dort über Rollschubbeanspruchungen in die Längslage der Füllstäbe übertragen werden. Daher ist ein Versagen dieser Verbindung entweder durch Stahlversagen, Rollschubversagen der Querlage oder Scherversagen des Holzes in der Mantelfläche des

Schraubengewindes gekennzeichnet. Um ein Holzversagen der Längslage zu verhindern, wurde FSH verwendet, welches so dimensioniert wurde, dass die Verbindung, nicht das Bauteil, maßgebend ist.

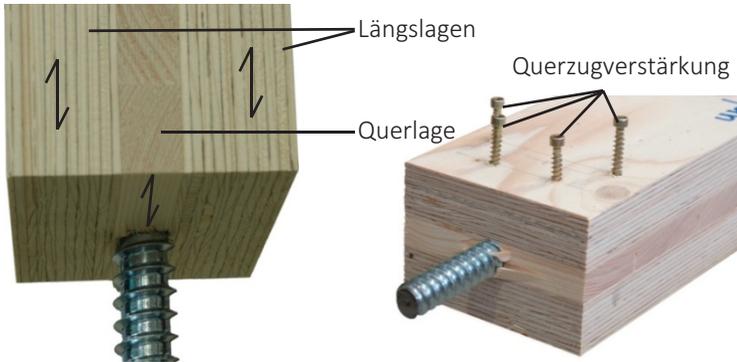


Bild 2-2 Eingeschraubte Gewindestange in Brettsperrholz mit Längslagen aus FSH; Prüfkörper mit Querbewehrung (rechts)

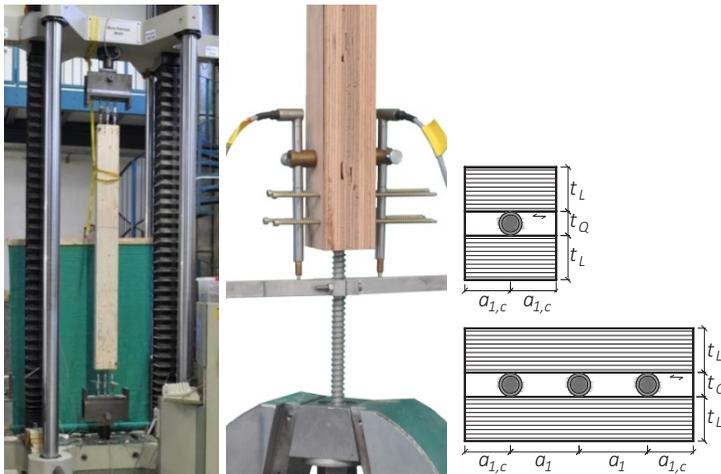


Bild 2-3 Prüfmaschine (links), Anordnung der Wegaufnehmer (Mitte) und Prüfkörperquerschnitte (rechts)

Tabelle 2-2 Versuchsprogramm

Material	Reihe	n_{VM}	d in mm	L in mm	L_{ef} in mm	a_1 in mm	$a_{1,c}$ in mm	t_L in mm	t_Q in mm
Nadelholz	1					-	48		
	2	1	16	2100	500	-	40	31	17
	3					-	32		
	4				600	-	60	31	
	5				700	-	60	31	
	6	1	20	2510	600	-	50	55	20
	7				700	-	50	55	
	8				800	-	40	55	
	9					64			
	10	3	16	2510	500	48	32	31	17
	11					80	50	55	20
	12	3	20	2510	400	60			
Buchenholz	13			1240	200	-			20*
	14	1	16	1240	300	-	32	20	20*
	15			1400	200	-			4,3,7*

n_{VM} .. Verbindungsmittelanzahl
 d .. Durchmesser Gewindestange
 L .. Länge des Zugstabes
 L_{ef} .. Einschraublänge
 a_1 .. VM-Abstand (vgl. Bild 2-3)
 $a_{1,c}$.. Randabstand (vgl. Bild 2-3)
 t_L .. Dicke der Längslage
 t_Q .. Dicke der Querlage
 * vgl. Bild A-2

2.2.3 Ergebnisse

In den meisten Fällen trat ein Rollschubversagen auf und die Querlage wurde über die gesamte Einschraubtiefe blockartig aus dem Prüfkörper herausgezogen (s. Bild 2-4). Des Weiteren war ein Stahlversagen aller einzeln geprüften Gewindestangen mit dem Durchmesser $\varnothing 16$ mm der Reihen 1, 2, 3 und 14 zu beobachten (vgl. Bild 2-5). Ein Herausziehen der Gewindestangen ohne Rollschubversagen wurde nur in Reihe 15 beobachtet. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Versuche, Versagensarten und Steifigkeitswerte enthalten Tabelle A-2 bis Tabelle A-16. Die gemittelte Höchstlast $F_{max,mean}$, die mittleren und charakteristischen Ausziehparameter

$$f_{ax} = \frac{F_{max}}{d \cdot L_{ef}} \quad (1)$$

und die gemittelten Steifigkeiten (inklusive Nachgiebigkeit der Verankerung)

$$K_{mean} = \frac{K_{oben} + K_{unten}}{2} \quad (2)$$

je Versuchsreihe sind in Tabelle 2-3 enthalten. Unter der Annahme einer gleichmäßig verteilten Rollschubbeanspruchung zwischen Längslagen und Querlage ergeben sich die angegebenen mittleren Rollschubfestigkeitswerte zu:

$$f_{R,mean} = \frac{F_{max}}{4 \cdot (a_{1,c} + a_1) \cdot L_{ef}} \quad (3)$$



Bild 2-4 Rollschubversagen der Querlage eines Prüfkörpers der Reihe 9



Bild 2-5 Reihe 13: Rollschubversagen (oben); Reihe 14: Stahlversagen (unten links); Reihe 15: Herausziehen (unten rechts)

Durch den symmetrischen Aufbau der Versuchskörper wurden pro Versuch zwei Verbindungen geprüft. Dies wurde bei der Auswertung der charakteristischen Werte nach DIN EN 14358 berücksichtigt. Durch das Versagen der schwächeren Verbindung sind die gemessenen Werte insgesamt als konservativ anzusehen, da der tragfähigere Anschluss eines Versuchskörpers nicht bis zum Versagen geprüft werden konnte. Das Erreichen der Rollschubtragfähigkeit hatte einen plötzlichen Lastabfall zur Folge. Im Gegensatz dazu ist ein Stahlversagen erst bei großen Verformungen und durch Fließen des Stahls ohne Holzversagen gekennzeichnet. Bei einzeln geprüften Gewindestangen mit $d = 16$ mm wurde ab 500 mm Einschraubtiefe bei Nadelholz und 300 mm bei Buchen-FSH ausschließlich ein Stahlversagen beobachtet.

Tabelle 2-3 Versuchsergebnisse – Gewindestange in Brettsperrholz

Reihe	Mittelwerte				Char. Werte
	$F_{max,mean}$ in kN	K_{mean} in kN/mm	$f_{R,mean}$ in N/mm ²	$f_{ax,mean}$ in N/mm ²	$f_{ax,k}$ in N/mm ²
1	101	63,4	1,05 ²⁾	12,6 ²⁾	11,3 ²⁾
2	99,1	61,7	1,24 ²⁾	12,4 ²⁾	11,1 ²⁾
3	98,2	66,1	1,53 ²⁾	12,3 ²⁾	11,0 ²⁾
4	165	102	1,14	13,7	12,4
5	166	106	0,99	11,9	10,7
6	136	90,3	1,13	11,3	8,7
7	166	94,1	1,18	11,8	10,6
8	163	92,1	1,27	10,2	8,9
9	275	196	1,43	11,5	10,3
10	261	166	1,63	10,9	9,8
11	275	222	1,32	11,4	9,9
12	254	227	1,44	10,6	9,5
13	95	107 ¹⁾	3,71	29,6	26,5
14	99	122 ¹⁾	2,58 ²⁾	20,6 ²⁾	18,5 ²⁾
15	92	116 ¹⁾	-	28,8	25,9

¹⁾ Lediglich bei jeweils 2 Versuchen (4 Verbindungen) gemessen

²⁾ Stahlversagen, somit wurden die Ausziehtragfähigkeit bzw. die Rollschubtragfähigkeit nicht voll ausgeschöpft

2.2.4 Diskussion

2.2.4.1 Allgemeines

Die Versuche mit drei Gewindestangen je Anschluss haben gezeigt, dass selbst bei geringen Verbindungsmittelabständen von $a_1 = 3 \cdot d$ und Randabständen von $a_{1,c} = 2,0 \cdot d$ bzw. $2,5 \cdot d$ hohe Kräfte aufgenommen werden können und der charakteristische Ausziehparameter gegenüber einer einzelnen Gewindestange um lediglich 10 % geringer ausfällt. Eine lineare Abhängigkeit (vgl. Gl. (1)) der Ausziehtragfähigkeit von der Einschraublänge, vom Gewindeaußendurchmesser und vom Ausziehparameter wurde der Auswertung zugrunde gelegt.

Die umfangreichen experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass in die Querlage eingedrehte Schrauben hohe axiale Zugkräfte aufnehmen können und steife Verbindungen zwischen dem Verbindungsmittel und der Holzmatrix darstellen (vgl. mittlere axiale Verbundsteifigkeit K_{mean} in Tabelle 2-3). Durch die Verwendung von Buchenfurnierschichtholz anstelle von Nadelholz kann ein zwei- bis dreimal größerer Ausziehparameter erzielt werden. Sowohl für Verbindungen mit Nadelholz als auch mit Buchen-FSH sollten drei wichtige Aspekte berücksichtigt werden:

- Spaltverhalten
- Querlagendicke
- Klebefugenqualität

Die genannten Punkte werden im Folgenden näher betrachtet.

2.2.4.2 Spaltverhalten

Die axialen Zugkräfte in der Gewindestange bewirken rechtwinklig zur Beanspruchungsrichtung wirkende Kräfte, welche ein Querzugversagen begünstigen. Durch dieses Aufspalten der Querlage wird der Verbund zwischen Gewinde und Holzmatrix gestört und eine deutliche Ausziehtragfähigkeitsabnahme ist die Folge. Diese Beobachtungen wurden schon bei Vorversuchen (Blaß 2008) gemacht. Eine Querzugverstärkung ist somit bei allen Verbindungen einzubringen. Detaillierte Angaben der in den Versuchen verwendeten Rand- und Verbindungsmittelabstände der Verstärkungsschrauben sind dem Anhang (Bild A-1 und Tabelle A-1) zu entnehmen. Eine mögliche Verbesserungsmaßnahme durch eine Verstärkung über die gesamte Einschraublänge der Gewindestange mit Vollgewindeschrauben konnte durch diese Versuche nicht bestätigt werden. Eine vergleichende Versuchsreihe hat nahezu identische Versuchswerte wie die nur am Zugstabende bewehrten Prüfkörper geliefert (vgl. Bild 2-6). Somit wird deutlich, dass nur Bewehrungen am Zugstabende für eine effiziente Verstärkung erforderlich sind.

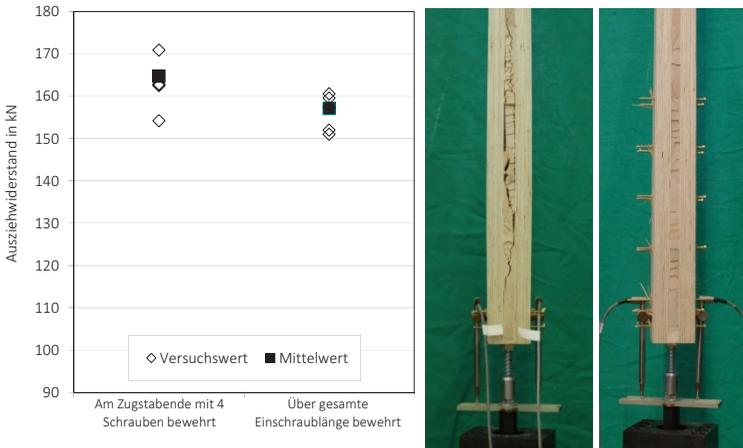


Bild 2-6 Auszieh-widerstand einer eingedrehten GS $\varnothing 20$ mm, Verankerungslänge $L_{ef} = 600$ mm (links); Versagen eines Prüfkörpers mit 4 Verstärkungsschrauben (Mitte) und mit 14 Verstärkungsschrauben über die gesamte Einschraublänge der GS (rechts)

Es kann davon ausgegangen werden, dass das Abstützen des Gewindes auf der Holzmatrix der Querlage sowie der Kraftübergang von Gewindestange ins Holz eine Spaltkraft verursacht, die rechtwinklig zur Faserrichtung der Querlage ein Aufspalten hervorrufen kann. Eine quantitative Abschätzung dieser Spaltkraft im Verhältnis zur axialen Kraft der Gewindestange erfolgt mithilfe eines mechanischen Modells, welches nachfolgend dargestellt ist. Mit Messschrauben soll zusätzlich die zu erwartende Kraft experimentell abgesichert werden.

Die durch Quellverformungen der Längslagen hervorgerufenen Spaltkräfte werden in dieser Betrachtung nicht näher berücksichtigt (siehe hierzu 2.2.4.4). Es wird angenommen, dass die in der Querlage verbleibenden durchgängigen Holzfasern mögliche Spannungen, die aus Holzfeuchteänderungen resultieren, aufnehmen und diese durch Relaxation reduziert werden. Die nachfolgenden Betrachtungen berücksichtigen ausschließlich die durch die axiale Beanspruchung einer

eingedrehten Gewindestange resultierenden Querdzugspannungen im Bereich der Querlage.

2.2.4.2.1 Mechanisches Modell zur Bestimmung der Spaltkraft

Um quantitativ abschätzen zu können, wie groß die resultierende Spaltkraft im Vergleich zur aufgebrauchten axialen Kraft F der Gewindestange ist, wird zuerst ein zweidimensionales Modell gewählt. Hierbei wird nur eine Gewindeflanke betrachtet und die horizontale Kraft bestimmt, welche benötigt wird, um ein „Herausrutschen des Keils“ zu verhindern. Diese Kraft entspricht dem Spaltanteil der axialen Beanspruchung einer eingedrehten Gewindestange. Für das 2D-Modell sind bestimmte Annahmen zu treffen, vgl. Bild 2-7:

- Es wird von einer idealisierten Gewindeflanke ausgegangen, die in das angrenzende Holz hineinragt.
- Das Holz „drückt“ sich rechtwinklig zur Ausrichtung der Kontaktfläche mit der Kraft N ab.
- Die Reibungskraft H wirkt einem Abrutschen der Gewindeflanke in der Kontaktfuge entgegen.
- Die Spaltkraft X wird horizontal wirkend angenommen.

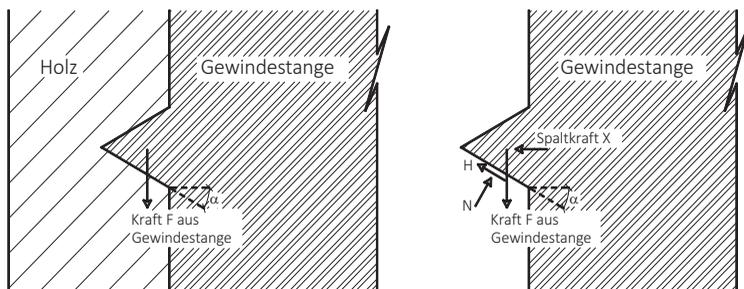


Bild 2-7 Zweidimensionale Modellannahme mit den auf die Gewindeflanke wirkenden Kräften

Aus den Gleichgewichtsbedingungen in Richtung der Kontaktfuge

$$\cos\alpha \cdot X - \sin\alpha \cdot F + H = 0 \quad \rightarrow \quad H = \sin\alpha \cdot F - \cos\alpha \cdot X \quad (4)$$

und rechtwinklig zur Kontaktfuge

$$N - \cos\alpha \cdot F - \sin\alpha \cdot X = 0 \quad \rightarrow \quad N = \cos\alpha \cdot F + \sin\alpha \cdot X \quad (5)$$

und der Haftbedingung $H = \mu_0 \cdot N$ folgt

$$\sin\alpha \cdot F - \cos\alpha \cdot X = \mu_0 \cdot (\cos\alpha \cdot F + \sin\alpha \cdot X) \quad (6)$$

$$\rightarrow X = F \cdot \frac{(\sin\alpha - \mu_0 \cdot \cos\alpha)}{(\cos\alpha + \mu_0 \cdot \sin\alpha)}$$

Für die hier gewählte Gewindestange SFS WB \emptyset 16 mm (Z-9.1-777) mit einem Flankenwinkel von $\alpha = 30^\circ$ und einem frei gewählten Reibbeiwert von $\mu_0 = 0,3$, der im Vergleich zu den von Möhler und Heröder (1979) bestimmten Werten eher konservativ ist, gilt:

$$\rightarrow \text{Spaltkraft } X = F \cdot 0,24 \quad (7)$$

Unter den hier getroffenen Annahmen für ein zweidimensionales Modell (Bild 2-7), welches eine Gewindeflanke mit einem Flankenwinkel $\alpha = 30^\circ$ darstellt, beträgt der Spaltkraftanteil etwa 24 % der axialen Gewindestangenkraft.

Auf den dreidimensionalen Fall übertragen bedeutet dies, dass die Summe aller in radialer Richtung verlaufender Spaltkräfte 0,24-mal der axialen Gewindestangenkraft ist. Durch die Verwendung eines Brettsperrholzprodukts verursacht nicht die gesamte Summe der Querspannkraften ein Spalten, sondern lediglich der Teil, der rechtwinklig zur Faserrichtung der Querlage wirkt. Somit kann unter der folgenden Annahme das Modell auf den 3D-Fall erweitert werden.

- Die Hälfte aller rechtwinklig zur Längsachse wirkenden Spannungskomponenten ist für das Spalten in der Querlage verantwortlich. Die andere Hälfte wird von den vorhandenen Fasern in II-Richtung (vgl. Bild 2-8) aufgenommen.

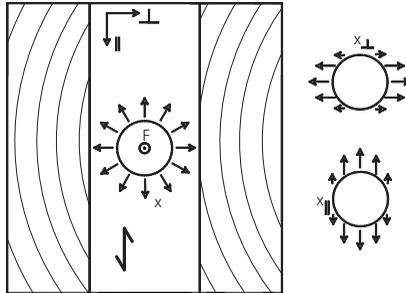


Bild 2-8 Modellannahme 3D; Spaltkraftkomponenten parallel und rechtwinklig zur Faser der Querlage

Unter der Annahme, dass

$$\sum x_{\perp} = \sum x_{\parallel} = 0,5 \cdot \sum x \quad (8)$$

und

$$\sum x = X \quad (9)$$

gilt

$$\sum x_{\perp} = 0,5 \cdot F \cdot \frac{(\sin \alpha - \mu_0 \cdot \cos \alpha)}{(\cos \alpha + \mu_0 \cdot \sin \alpha)} \quad (10)$$

Für die hier gewählte Gewindestange SFS WB \varnothing 16 mm (Z-9.1-777) und einem Reibbeiwert von $\mu_0 = 0,3$ gilt für die Spaltkraft $F_{\text{Spalten},\perp,V}$ rechtwinklig zur Faserrichtung der Querlage:

$$\rightarrow \sum x_{\perp} = F_{\text{Spalten},\perp,V} = 0,12 \cdot F \quad (11)$$

Ein zusätzlicher Spaltkraftanteil, der bisher noch nicht berücksichtigt wurde, lässt sich mit dem Moment in Folge der Anschlussexzentrizität erklären. Nach aktueller Bemessungsnorm darf diese Exzentrizität beim Nachweis der Tragfähigkeit der einseitig beanspruchten Bauteile in symmetrisch ausgeführten Zugverbindungen vereinfacht durch die Verminderung des Bemessungswertes der Zugtragfähigkeit um ein Drittel berücksichtigt werden (vgl. DIN EN 1995/NA). Weiterführende Untersuchungen dieser Zusatzbeanspruchung hat Steck (2002) für gängige Zuganschlussmöglichkeiten veröffentlicht, diese dienen hier als Grundlage für eine Erweiterung des mechanischen Modells.

Bild 2-9 verdeutlicht die im Folgenden getroffenen Annahmen. Dem Moment M_{actio} in Folge der Anschlussexzentrizität e wirkt ein Moment $M_{reactio}$ entgegen, welches sich aus den rechtwinklig zur Stabachse wirkenden Kräften ergibt. Hierfür wird vereinfacht angenommen, dass nur im äußeren Bereich die Zugkraft (\equiv Spaltkraft $F_{Spalten,\perp,M}$) aufgenommen wird und die Verteilung der Kontaktdruckkraft dreiecksförmig über die Länge $L_{ef}/2$ wirkt.

$$M_{actio} = \frac{F}{4} \cdot e \quad \text{und} \quad M_{reactio} = F_{Spalten,\perp,M} \cdot b \quad (12)$$

gilt sowohl für die obere als auch für die untere Längslage. Unter der Voraussetzung, dass $M_{actio} = M_{reactio}$ ist, folgt:

$$\begin{aligned} \rightarrow F_{Spalten,\perp,M} &= 2 \cdot \frac{F}{4} \cdot \frac{e}{b} \\ \text{mit } e &= 0,5 \cdot (t_L + t_Q - d) \quad \text{und} \quad b = \frac{5}{6} \cdot L_{ef} - a_{Spalt} \end{aligned} \quad (13)$$

Hierbei ist die Variable a_{Spalt} der Abstand der Spaltbewehrung zum Zugstabende, vgl. Bild 2-19. Die aus den obigen Überlegungen resultierenden idealisierten Spannungsverläufe sind in Bild 2-10 dargestellt.

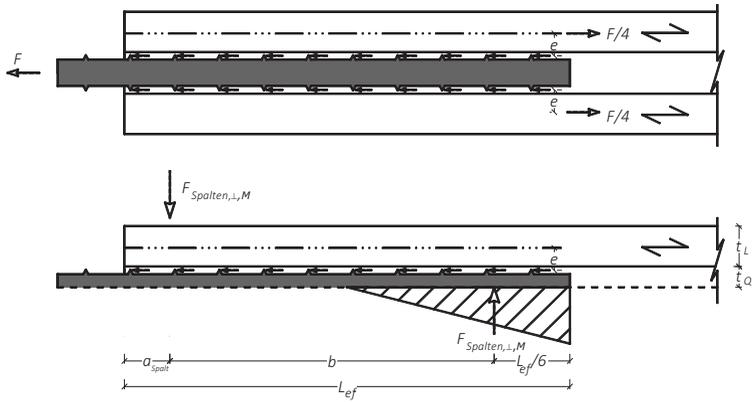


Bild 2-9 Anschluss­ex­zen­tri­zität

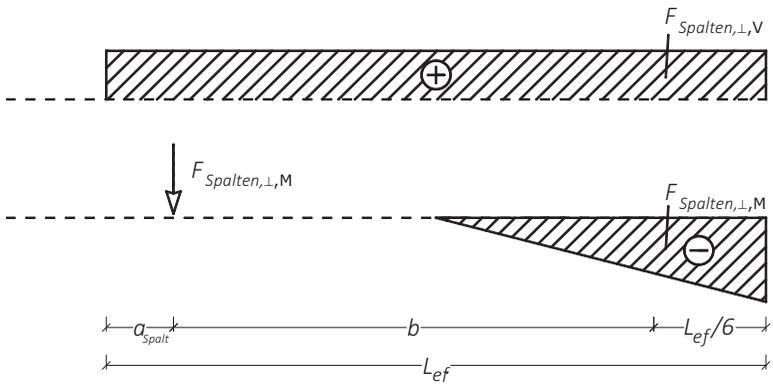


Bild 2-10 Idealisierte Spannungen rechtwinklig zur Faser in der Querlage

2.2.4.2.2 Bestimmung der Spaltkraft mittels Messschrauben

Um qualitativ und quantitativ das Spaltverhalten von auf Zug beanspruchten Gewindestangen zu ermitteln, wurde eine Versuchsvorrichtung entwickelt. Für die Prüfmethode wird die Gewindestange in einen längs aufgetrennten Zugstab eingebracht, der mittels Messschrauben zusammengehalten wird. Die Messschrauben, welche schon von Uibel (2012) für die Ermittlung von Kräften beim Eindrehen von Schrauben verwendet wurden, werden mit jeweils ca. 250 N vorgespannt. Die Messkonfiguration ist in Bild 2-11 und Bild 2-12 dargestellt. Innerhalb einer Längsbohrung der Messschraube wurde im Bereich des reduzierten Querschnitts (vgl. Bild 2-11, rechts) ein Dehnmessstreifen (DMS) appliziert, sodass die auftretende Stahldehnung jeder einzelnen Schraube gemessen werden konnte. Die resultierende Dehnung kann dann mit der durch eine Kalibrierung ermittelten Dehnsteifigkeit jeder einzelnen Messschraube in eine Kraft umgerechnet werden.

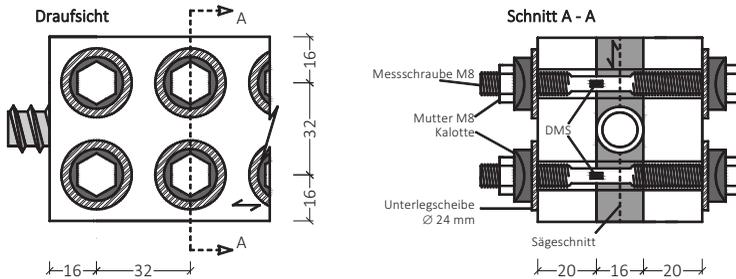


Bild 2-11 Prüfkörpergeometrie mit Draufsicht und Querschnitt A – A im Bereich der Messschrauben; Maße in mm

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche sollen hier anhand eines repräsentativen Versuchs veranschaulicht werden. Der Prüfkörper aus Buchenfurnierschichtholz mit einer Einschraubtiefe von 200 mm (analog zu Reihe 13 in Tabelle 2-2) wurde bis 60 kN in 10 kN-Schritten mit zwischenzeitlichen Halteintervallen belastet. Die Spaltkräfte dieses

Versuchs sind der Gewindestangenkraft in Bild 2-12 gegenübergestellt. Position 1 ist das Messschraubenpaar am Zugstabende, Position 5 ist zur Bauteilmitte hin gerichtet. Die graue Kurve bildet die Summe aller Spaltkräfte ab. Das Diagramm zeigt, dass die größten Spaltkräfte am Zugstabende auftreten und ca. die Hälfte der Gesamtspaltkraft ausmachen. Der Spaltkraftanteil bei einer Belastung von 60 kN beträgt ca. 7 % (4,2 kN), der Anstieg ist jedoch nicht linear. Mit zunehmender Axialkraft ist der Spaltkraftanstieg progressiv, sodass im Traglastbereich (hier ca. 90 kN) der prozentuale Spaltkraftanteil etwas über 7 % liegen würde. Um die Messtechnik vor einem spröden Versagen und der damit einhergehenden Gefahr der Schädigung der Messschrauben zu schützen, wurde der Versuchskörper nur bis 60 kN belastet.

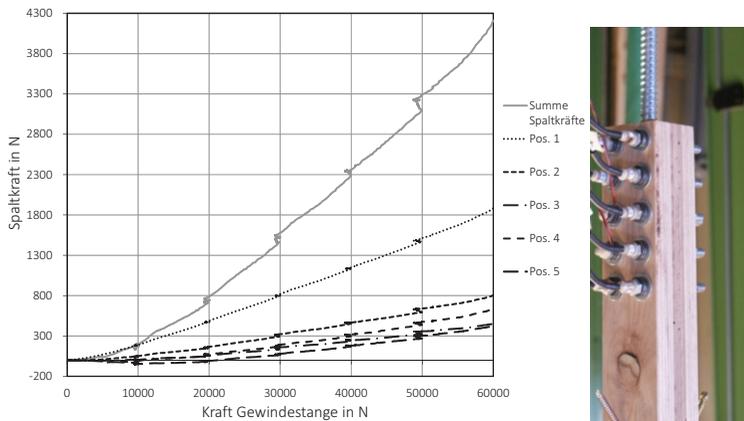


Bild 2-12 Ergebnis eines Spaltkraftversuches mit eingedrehter Gewindestange in Buchenfurnierschichtholz ($\varnothing 16$ mm und $L_{ef} = 200$ mm)

2.2.4.3 Klebefugenqualität

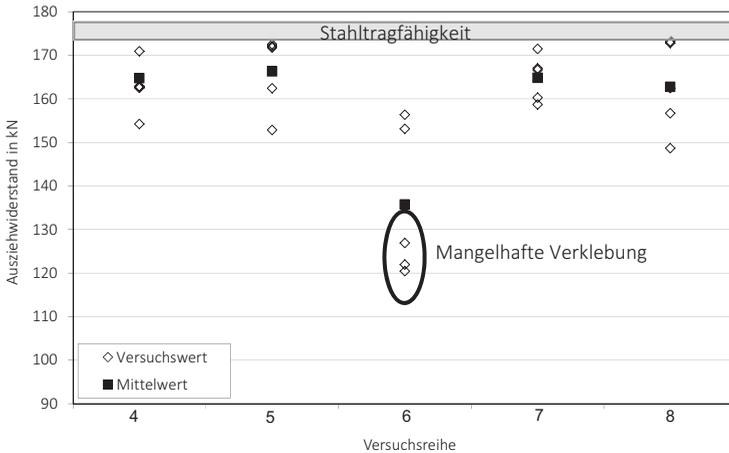


Bild 2-13 Auszieh Widerstand einer GS \varnothing 20 mm (Reihe 4 bis 8)

In Bild 2-13 sind die Auszieh Widerstände der einzelnen Gewindestangen \varnothing 20 mm der Reihen 4 bis 8 dargestellt. Zusätzlich zu den Versuchsergebnissen sind die Mittelwerte angegeben. Lediglich in der Versuchsreihe 6 ist der Mittelwert von 136 kN relativ gering, verglichen mit den restlichen Versuchsreihen, deren Werte nur knapp unterhalb der Stahlzugtragfähigkeit liegen. Die auffällig geringen Werte der Ausziehtragfähigkeit wurden durch eine fehlerhafte Verklebung (vgl. Bild A-6) zwischen Längslagen und Querlage verursacht, da die Kräfte nicht über die volle Kontaktfläche aus der Querlage in die Längslagen geleitet werden konnten. Das Brettsperrholz muss fehlerfrei hergestellt sein, um das gewünschte duktile Versagen der Gewindestange zu erzielen.

2.2.4.4 Querlagendicke

Die Querlage sollte mindestens so dick sein wie der Gewindeaußendurchmesser des Verbindungsmittels, damit genügend viele Fasern

der Querlage zur Verfügung stehen, um auftretende Spannungen (aus klimatischen und äußeren Beanspruchungen) aufnehmen zu können. Ist dies nicht der Fall, so ist der Querlagenbereich in Höhe des vorgebohrten Loches so stark geschwächt, dass die Querzugtragfähigkeit der Längslagen nicht ausreichend groß ist, um die Spaltkräfte bei axialer Beanspruchung der Gewindestange im Ausrundungsbereich aufnehmen zu können. Eine qualitative Spannungsverteilung aufgrund von Quellverformungen der Längslagen ist in Bild 2-14 dargestellt.

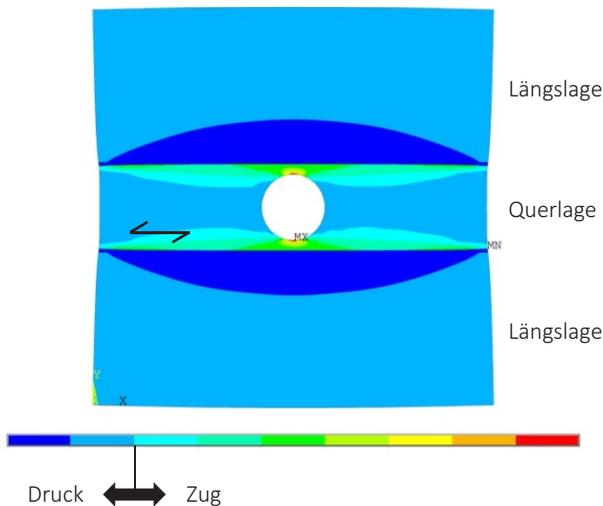


Bild 2-14 FE-Modell – Einfluss der Holzfeuchteänderung bei Nadelholz

Signifikante Spannungsspitzen treten am Bohrlochrand in der Querlage im Übergang zur Längslage auf. Die Löcher für die Gewindestangen werden mit dem Kerndurchmesser zuzüglich einem Millimeter vorgebohrt. Um die auftretenden Spannungen parallel zur Faserrichtung in der Querlage aufnehmen zu können und das Quellen der Längslage zu verhindern, wird empfohlen, dass die Querlagendicke mindestens dem Gewindeaußendurchmesser entsprechen soll. Für Buchenfurnierschichtholz hat Reihe 15 gezeigt, dass durch abwechselnde An-

ordnung von Quer- zu Längslagen im Bereich der Gewindestange der Querlagenanteil minimiert werden kann. Gleichzeitig nimmt der mittlere Ausziehparameter marginal von 29,6 auf 28,8 N/mm² ab.

2.2.5 Bemessungsvorschlag

2.2.5.1 Allgemein

Mit der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-9.1-777 ist die Verwendbarkeit bzw. Anwendbarkeit der hier verwendeten SFS Gewindestangen mit Holzgewinde als Holzverbindungsmittel für Nadelholz nachgewiesen. Die Bemessung erfolgt nach DIN 1052 oder nach der aktuell gültigen Holzbaunorm DIN EN 1995 in Verbindung mit dem nationalen Anhang.

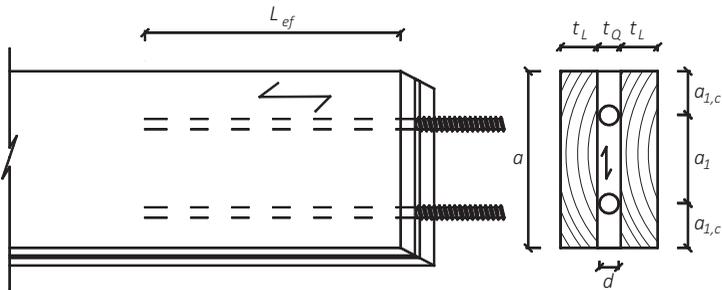


Bild 2-15 Beispiel einer Verbindung mit zwei Gewindestangen in BSP

Um die Beanspruchbarkeit einer auf Zug beanspruchten Gewindestange, die in die Querlage von Brettsperrholz eingedreht ist, zu bestimmen, müssen die folgenden Versagensmechanismen berücksichtigt werden:

- Ausziehversagen im Bereich des eingeschraubten Gewindes;
- Zugversagen der Längslagen;
- Scherversagen (Rollschub) zwischen Querlage und Längslagen;

- Zugversagen der Gewindestange (Stahlversagen);
- Frühzeitiges Aufspalten des Zugstabes.

Ein Beispiel einer Verbindung mit zwei Gewindestangen in BSP ist in Bild 2-15 schematisch dargestellt.

2.2.5.2 Auszieh Widerstand

Der charakteristische Wert des Auszieh Widerstands für eine unter einem Winkel $\alpha = 90^\circ$ (Winkel zwischen Gewindestangenlängsachse und Holzfaserrichtung) eingedrehte Gewindestange soll angenommen werden zu:

$$F_{\alpha, Rk} = n_{ef} \cdot f_{\alpha, k} \cdot d \cdot L_{ef} \quad (14)$$

Dabei ist

$$n_{ef} = n^{0,9} \quad (15)$$

die wirksame Anzahl von Schrauben nach DIN EN 1995;

$$f_{\alpha, k} = 70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 \quad (16)$$

der charakteristische Wert des Ausziehparameters der Verbindung nach Z-9.1-777 in N/mm²;

d der Außendurchmesser des Gewindes in mm;

L_{ef} die Eindringtiefe des Gewindeteils in mm.

Bei einer ausreichend großen Einschraubtiefe kann davon ausgegangen werden, dass die Gewindestange mehrere Brettlagen durchdringt. Somit darf anstelle des Wertes für Vollholz die charakteristische Rohdichte wie für Brett-schichtholz angenommen werden. Der nach Gleichung (16) ermittelte Wert des Ausziehparameters kann mit den in den Versuchen ermittelten charakteristischen Werten nach Tabelle 2-3 verglichen werden. Generell ist der Ausziehparameter $f_{\alpha, k}$ von

der Schraubengeometrie abhängig und ist daher der Zulassung der verwendeten Gewindestange zu entnehmen.

2.2.5.3 Zugwiderstand der Längslagen

Da die gesamte Kraft aus den Gewindestangen über die Querlage in die Längslagen gelangen muss, sollten auch die Zugspannungen in den Längslagen eines Zugstabes überprüft werden. Die Bestimmung des charakteristischen Zugwiderstands kann in Anlehnung an DIN EN 1995, Abschnitt 6.1.2, wie folgt angenommen werden:

$$F_{t,Rk} = \sum t_L \cdot a \cdot f_{t,k} \quad (17)$$

Dabei ist

- t_L die Dicke der einzelnen Längslagen in mm;
- a die Breite des Zugstabes in mm;
- $f_{t,k}$ die char. Zugfestigkeit in Faserrichtung in N/mm².

Die Querlagen des Zugstabes dürfen nicht in Rechnung gestellt werden.

2.2.5.4 Scherwiderstand

Besondere Beachtung sollte der Rollschubtragfähigkeit in den Fugen zwischen Quer- und Längslagen geschenkt werden. Es sind alle Klebeflächen zu berücksichtigen, die über die Einschraubtiefe L_{ef} zwischen den Quer- und Längslagen angeordnet sind. Der charakteristische Scherwiderstand des Zugstabes lässt sich wie folgt ermitteln:

$$F_{R,Rk} = 2 \cdot n_Q \cdot a \cdot L_{ef} \cdot f_{R,k} \quad (18)$$

Dabei ist

- n_Q die Anzahl der Querlagen;
- a die Breite des Zugstabes in mm;
- L_{ef} die Einschraublänge in mm;
- $f_{R,k}$ die charakteristische Rollschubfestigkeit in N/mm².

Im Hinblick auf die gleichmäßig verteilt angenommene Rollschubbeanspruchung zwischen Längs- und Querlagen kann die charakteristische Rollschubfestigkeit $f_{R,k} = 1,0 \text{ N/mm}^2$ angesetzt werden. An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass im deutschen nationalen Anhang (DIN EN 1995-1-1/NA, Ausgabe Dezember 2010) fälschlicherweise angegeben ist, dass „der Bemessungswert der Rollschubfestigkeit für alle Festigkeitsklassen mit $1,0 \text{ N/mm}^2$ in Rechnung gestellt werden darf“. Dies wurde in der aktuellen Version des Nationalen Anhangs (Ausgabe August 2013) korrigiert.

2.2.5.5 Zugwiderstand des Verbindungsmittels

Der charakteristische Wert der Zugtragfähigkeit der Gewindestange mit Holzgewinde nach der bauaufsichtlichen Zulassung darf nicht überschritten werden. Für die in diesem Forschungsvorhaben verwendeten Gewindestangen (Z-9.1-777) sind folgende Werte anzunehmen:

$$F_{t,\mu,k} = 91,5 \text{ kN} \quad \text{für Gewindeaußendurchmesser } d = 16 \text{ mm}$$

$$F_{t,\mu,k} = 145 \text{ kN} \quad \text{für Gewindeaußendurchmesser } d = 20 \text{ mm}$$

Bei Verbindungen mit mehreren zusammenwirkenden Gewindestangen muss n_{ef} nach Gleichung (15) berücksichtigt werden, da nicht von einer gleichmäßigen Lastverteilung ausgegangen werden kann.

2.2.5.6 Maßgebender Widerstand

Unter Berücksichtigung unterschiedlicher γ_m - und k_{mod} -Werte können die Bemessungswerte $F_{ax,Rd}$, $F_{t,Rd}$, $F_{R,Rd}$ und $F_{t,u,Rd}$ bestimmt und der maßgebende Widerstand der Verbindung ermittelt werden. Hierbei ist zu beachten, dass eine Spaltbewehrung nach 2.2.5.7 gegeben sein muss, um die nach Kapitel 2.2.5.2 bis 2.2.5.5 berechneten Widerstände zu garantieren. Da ein sprödes Holzversagen möglichst vermieden werden sollte, ist die Verbindung so zu dimensionieren, dass ein Stahlversagen maßgebend wird.

Obwohl die Versuche gezeigt haben, dass mit den Abständen $a_{1,c} = 2,0 \cdot d$ bzw. $2,5 \cdot d$ und $a_1 = 3 \cdot d$ hohe Tragfähigkeiten erzielt werden können, wird empfohlen, die Verbindung mit den Abständen $a_{1,c} = 3 \cdot d$ und $a_1 = 4 \cdot d$ zu dimensionieren. Dies sollte so lange beibehalten werden, bis die Tiefenbohrungen ohne nennenswerte Abweichungen realisiert werden können.



Bild 2-16 Tiefenbohrungen für eingedrehte Gewindestangen;
Divergierende Randabstände über die gesamte Bohrtiefe

In Bild 2-16 wird deutlich, dass eine geringe Abweichung vom geplanten Einschraubvorgang die Rand- und Verbindungsmittelabstände deutlich beeinträchtigt und dadurch das Tragverhalten negativ beeinflusst werden kann.

Die Diagramme im nachfolgenden Bild 2-17 und Bild 2-18 zeigen Verläufe, die die charakteristische Beanspruchbarkeit eines bestimmten Zugstabes nach Kapitel 2.2.5.2 bis 2.2.5.5 veranschaulichen.

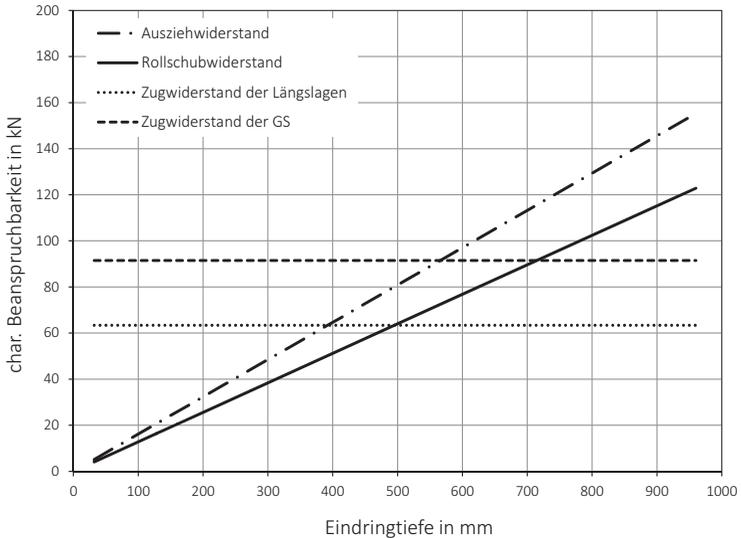


Bild 2-17 Char. Beanspruchbarkeiten für Zugstäbe mit GS in BSP aus NH
(Annahmen: GL 24h; $n = 1$; $d = 16$ mm; $t_L = 30$ mm und
 $a / t = 64 / 76$ mm²)

Beispielhaft wurde in Bild 2-17 eine Verbindung mit einer Gewindestange und Brettsperrholz aus Nadelholz gewählt, deren Eindringtiefe auf der Abszisse von 32 bis 960 mm variiert wird. Neben der Ausziehtragfähigkeit $F_{ax,Rk}$ wird auch die Rollschubtragfähigkeit $F_{R,Rk}$ dargestellt. Des Weiteren zeigen die gestrichelten Linien die charakteristische Zugtragfähigkeit der Längslagen ($F_{t,Rk}$) und der Gewindestange ($F_{t,u,k}$). Es wird deutlich, dass rechnerisch kein Stahlversagen erreicht werden kann, da bei Einschraubtiefen kleiner als 500 mm der Rollschubwiderstand und bei Einschraubtiefen größer als 500 mm die Zugfestigkeit der Längslagen maßgebend ist. Für das vorliegende Beispiel wird empfohlen die Bauteilabmessung a und t_L zu vergrößern, sodass für große Eindringtiefen rechnerisch ein Zugversagen maßgebend wird.

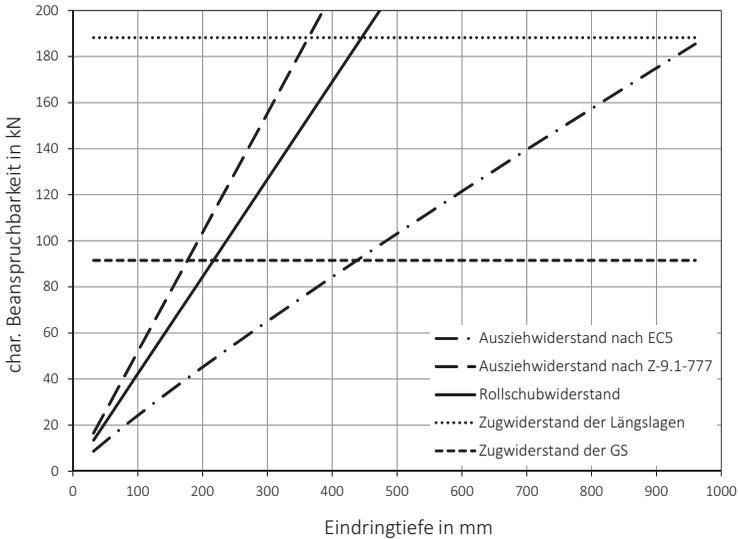


Bild 2-18 Char. Beanspruchbarkeiten für Zugstäbe mit GS in BSP aus Buchen-FSH (Annahmen: Buchen-FSH; $n = 1$; $d = 16 \text{ mm}$; $t_L = 21 \text{ mm}$ und $a/t = 64/58 \text{ mm}^2$)

Bild 2-18 behandelt die charakteristische Beanspruchbarkeit über einer veränderlichen Eindringtiefe einer Gewindestange in BSP, das aus Buchen-FSH hergestellt wurde. Die konservative Annahme, dass der Ausziehparameter nach DIN EN 1995 zu bestimmen ist, würde zur Folge haben, dass erst ab 440 mm Einschraubtiefe die charakteristische Zugtragfähigkeit der Gewindestange maßgebend wird. Unter der Voraussetzung, dass die Zulassung Z-9.1-777 auch für Buchenholz gültig ist und der charakteristische Ausziehparameter nach Gleichung (16) bestimmt werden kann, ist bei der Verwendung von Buchen-FSH eine Eindringtiefe von ca. 200 mm ausreichend. Ausziehversuche mit Vollgewindeschrauben und Gewindestangen in Buchen-FSH, die am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktionen durchgeführt wurden, deuten darauf hin, dass der Ausziehparameter nach DIN EN 1995 für

große Einschraubängen und Gewindestangen zu gering abgeschätzt wird und von der realistischen Tragfähigkeit stark abweicht.

2.2.5.7 Spaltbewehrung

Um ein frühzeitiges Aufspalten des Stabes bei geringen Kräften bzw. Verschiebungen zu verhindern und somit ein Versagen der Verbindungen hinauszuzögern, ist eine Querkzugbewehrung im Bereich des Zugstabendes erforderlich. Die zu verankernde Spaltkraft setzt sich nach Kapitel 2.2.4.2 aus den Kraftkomponenten $F_{Spalten,\perp,V}$ und $F_{Spalten,\perp,M}$ zusammen. Da der Anteil $F_{Spalten,\perp,V}$ im inneren Bereich der Gewindestange durch die dreiecksförmig angenommene Querdruckbeanspruchung $F_{Spalten,\perp,M}$ überdrückt wird (vgl. Bild 2-10), soll für die zu bewehrende charakteristische Spaltkraft einer Gewindestange unter Berücksichtigung der hier getroffenen Annahmen gelten:

$$F_{Spalten,\perp,K} = \frac{1}{2} \cdot F_{Spalten,\perp,V} + F_{Spalten,\perp,M} = \frac{1}{2} \cdot 0,12 \cdot F + \frac{F}{2} \cdot \frac{0,5 \cdot (t_L + t_Q - d)}{5/6 \cdot L_{ef} - a_{Spalt}} \quad (19)$$

Dabei ist

- F Axiale Zugkraft einer Gewindestange;
- t_L die Dicke der einzelnen Längslagen in mm;
- t_Q die Dicke der Querlage in mm;
- d der Außendurchmesser der Gewindestange in mm;
- L_{ef} die Eindringtiefe des Gewindeteils in mm;
- a_{Spalt} Abstand des Zugstabendes zum Schwerpunkt der Spaltbewehrung in mm (vgl. Bild 2-19).

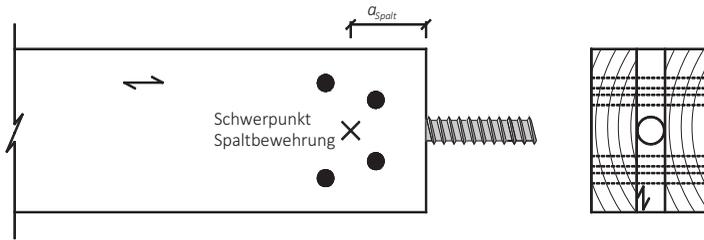


Bild 2-19 Spaltbewehrung am Zugstabende mittels VG-Schrauben

Das Zugstabende kann z. B. mittels Vollgewindeschrauben verstärkt werden. Der Auszieh Widerstand $F_{ax,Rk}$ der Schrauben mit der Einbinde-
länge t_L kann nach DIN EN 1995 bzw. den gültigen Zulassungen be-
stimmt werden. Zusätzlich sollte die charakteristische Zugfestigkeit
 $F_{t,Rk}$ der Spaltbewehrung ebenfalls nach DIN EN 1995 angenommen
werden zu:

$$F_{t,Rk} = n_{ef} \cdot f_{tens,k} \quad (20)$$

Ist der Widerstand der Spaltbewehrung $F_{ax,Rk}$ und die Zugfestigkeit der
Spaltbewehrung $F_{t,Rk}$ größer als die auftretende rechnerische Spalt-
kraft $F_{Spalten,\perp,k}$ nach (19), so ist der Zugstab ausreichend gegenüber
einem Spalten rechtwinklig zur Faserrichtung der Querlage bewehrt.

2.2.6 Zusammenfassung

Der anhand der Versuchsergebnisse berechnete Ausziehparameter
der 16 mm Gewindestangen unter Verwendung von Buchenfurnier-
schichtholz bei einer Einschraubtiefe von 300 mm ist deutlich geringer
($f_{ax,mean} = 20,6 \text{ N/mm}^2$) als bei Verbindungen mit einer Einschraubtiefe
von 200 mm ($f_{ax,mean} \approx 29 \text{ N/mm}^2$), da vor dem Erreichen der Tragfä-
higkeit der Verankerung des Gewindes mit der Holzmatrix die Zugtrag-
fähigkeit im Stahlquerschnitt erreicht ist. Für Gewindestangen in

Brettsperrholz aus Nadelholz wird ca. die doppelte bzw. dreifache Einschraublänge benötigt, um die gleichen Kräfte zu übertragen. Um ein gewünschtes duktileres Versagen und somit die Vermeidung eines Sprödbruchs zu erzielen, muss die Verbindung mit Gewindestangen in Brettsperrholz so dimensioniert werden, dass die Zugtragfähigkeit des Verbindungsmittels maßgebend wird.

Zahlreiche Versuche haben gezeigt, dass die tragfähigkeitsmindernde Wirkung des Aufspaltens der Zugstabenden zu behindern ist, damit ein frühzeitiges sprödes Versagen nicht maßgebend wird. Verschiedene Verstärkungsmaßnahmen mithilfe von Vollgewindeschrauben und Querlagen wurden experimentell berücksichtigt und belegen die verstärkende Wirkung am Bauteilende bei einer axialen Zugbeanspruchung der Gewindestange. Neben den experimentellen Betrachtungen wurde auch mithilfe eines mechanischen Modells die Spaltkraft bei eingedrehten Gewindestangen quantitativ bestimmt. Auch die mittels Messschrauben gewonnenen Ergebnisse weisen darauf hin, dass in etwa 10 % der Axialkraft als Spaltkraft rechtwinklig zur Faserichtung der Querlage wirken und über eine Querbewehrung aufgenommen werden muss.

Dementsprechend wurde unter Berücksichtigung der vorher gewonnenen Erkenntnisse ein Bemessungsvorschlag vorgestellt. In den theoretischen Betrachtungen sind ein nicht planmäßiges Einbringen der eingedrehten Gewindestange und eine damit einhergehende zusätzliche Spaltkraftkomponente nicht berücksichtigt. Weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen könnten diesen Sachverhalt berücksichtigen und die hier vorgestellten Ergebnisse absichern und ergänzen.

Zusammenfassend lassen sich folgende Ergebnisse und Empfehlungen festhalten:

- Durch hohe Tragfähigkeiten und Steifigkeiten sind axial beanspruchte Gewindestangen prädestiniert für den Einsatz in Fachwerkträgern.
- Ein sprödes Versagen sollte vermieden werden. Die Verbindung sollte so dimensioniert werden, dass ein Stahlversagen maßgebend wird.
- Die Querlage soll mindestens so dick sein wie der Gewindeaußendurchmesser des Verbindungsmittels, damit mögliche Zwängungen aus Quell- und Schwindverformungen von der Querlage aufgenommen werden können.
- Eine Querszugverstärkung am Ende des Zugstabes ist notwendig, um ein frühzeitiges Aufspalten zu unterbinden.
- Niedrige Tragfähigkeiten waren auf eine mangelnde Verklebung zurückzuführen. Die Qualität der Klebefuge ist für die Tragfähigkeit der Verbindung maßgebend.
- Unter Verwendung von Buchenholz ist die Ausziehtragfähigkeit deutlich erhöht und somit ist die benötigte Verankerungslänge geringer.

2.3 Auszieh Widerstand von Gewindestangen

2.3.1 Eingedrehte Gewindestangen unter 45° und 90°

2.3.1.1 Allgemeines

Im Rahmen der hier vorgestellten Forschungsarbeit wurden für den Zugstabanschluss primär Gewindestangen der Firma SFS intec AG untersucht, da diese in Längen bis 3000 mm erhältlich sind und eine hohe Stahltragfähigkeit aufweisen (siehe Tabelle 2-1). In Kapitel 2.2 ist das Tragverhalten von in die Querlage von Brettsperrholz eingedrehten Gewindestangen erläutert und ausführlich ausgewertet worden. Ein Anschluss dieser Brettsperrholz-Zugdiagonalen an ein weiteres Bauteil (z. B. einen Fachwerkgurt) erfordert eine Verankerung im Holzbauteil, um die Zugkräfte aufnehmen zu können. In früheren Versuchen an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine wurde der Auszieh Widerstand der Gewindestangen mit den Durchmessern 16 mm und 20 mm ermittelt. Dazu wurde Brettschichtholz der Holzart Fichte (*picea abies*) verwendet. Die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle 2-4 und Tabelle 2-5 zusammengefasst.

Tabelle 2-4 Mittlere Ausziehparameter – SFS WB Gewindestange $d = 16$ mm

N	α in °	L_{ef} in mm	\varnothing_{Bohr} in mm	ρ_{mean} in kg/m^3	$f_{ax,mean}$ in N/mm^2	v in %
10	90	200	12	422	13,7	9,0
10	90	200	13	422	11,7	8,5
10	90	400	13	441	14,7	6,1
10	45	200	13	430	14,3	10,9
10	45	400	13	433	14,4	6,4
N .. Anzahl Versuche				ρ_{mean} .. Mittlere Rohdichte		
α .. Einschraubwinkel				$f_{ax,mean}$.. Mittlerer Ausziehparameter		
L_{ef} .. Einschraublänge				mit $f_{ax,mean} = F_{max}/(d \cdot L_{ef})$		
\varnothing_{Bohr} .. Vorbohrdurchmesser				v .. Variationskoeffizient		

Tabelle 2-5 Mittlere Ausziehparameter – SFS WB Gewindestange $d = 20 \text{ mm}$

N	α in $^\circ$	L_{ef} in mm	\varnothing_{Bohr} in mm	ρ_{mean} in kg/m^3	$f_{ax,mean}$ in N/mm^2	v in %
10	90	200	16	425	12,0	7,5
10	90	400	16	441	14,4	3,8
10	45	200	16	431	14,2	10,9
10	45	400	16	433	14,7	7,1

N .. Anzahl Versuche	ρ_{mean} .. Mittlere Rohdichte
α .. Einschraubwinkel	$f_{ax,mean}$.. Mittlerer Ausziehparameter
L_{ef} .. Einschraublänge	mit $f_{ax,mean} = F_{max}/(d \cdot L_{ef})$
\varnothing_{Bohr} .. Vorbohrdurchmesser	v .. Variationskoeffizient

Das Tragverhalten von Holzschrauben auf Herausziehen wurde z. B. von Blaß et al. (2006), Blaß und Uibel (2007), Ringhofer und Brandner (2012) und Hübner (2013) ausführlich untersucht. Der Ausziehwiderstand für Schrauben kann nach den genannten Quellen in Abhängigkeit der Parameter Durchmesser, Einschraublänge, Rohdichte und Einschraubwinkel bestimmt werden. Durch den Einsatz von Hybrid-Brettschichtholz mit Randlamellen aus Buchenholz und Kernlamellen aus Nadelholz oder Buchen-Furnierschichtholz (Bu-FSH) für die Fachwerkträgergurte ist eine genauere Untersuchung des Ausziehwiderstandes erforderlich. Die axiale Tragfähigkeit einer Verbindung ist von der Zugtragfähigkeit der Gewindestange und von der Verankerung des Gewindes im Holz abhängig. Im Rahmen dieses Vorhabens war nur ein begrenzter Versuchsumfang möglich. Auf eine systematische Untersuchung der Einflussparameter wurde verzichtet. Die Ergebnisse sollen lediglich eine Tendenz und das Potenzial der eingedrehten Gewindestangen aufzeigen. Die durch Versuche ermittelten Ausziehparameter können für Vergleiche oder Überschlagsrechnungen herangezogen werden. Für den baupraktischen Einsatz besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf.

2.3.1.2 Versuche mit Hybrid-BSH

Zur Bestimmung der Ausziehtragfähigkeit von rechtwinklig zur Faser in Hybrid-Brettschichtholz eingedrehten Gewindestangen (Durchmesser 16 mm und 20 mm) wurden die Verbindungsmittel in Achsrichtung bis zum Versagen belastet. Dazu wurde der Prüfkörper in eine Universalprüfmaschine, wie aus Bild 2-20 ersichtlich, eingespannt und mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 4 mm/min beansprucht. Dabei wurde mithilfe von induktiven Wegaufnehmern die Verformung der Gewindestange in Bezug auf die Bauteilmitte gemessen. Eine Betrachtung der Verformung am beanspruchten (oben) und unbeanspruchten (unten) Ende ermöglicht eine getrennte Beurteilung der Verbindungssteifigkeit. Zusätzlich zu den Prüfungen der Hybrid-Querschnitte wurden getrennt die Ausziehtragfähigkeit der Randlamelle und der Kernlamelle betrachtet. Durch den sehr begrenzten Umfang der Versuche ist lediglich eine grobe Abschätzung des Tragverhaltens feststellbar. Das Versuchsprogramm ist der Tabelle 2-6 zu entnehmen. Analog zu der Herstellung der Ausziehprüfkörper in Kapitel 2.2 wurde das Holz mit dem Kerndurchmesser der Gewindestange zuzüglich einem Millimeter vorgebohrt.

Tabelle 2-6 Versuchsprogramm – Ausziehtragfähigkeit Hybrid-BSH

Reihe	Material	d in mm	L_{ef} in mm	N
1	Buche	16	40	10
2	Buche	20	40	7
3	Fichte	16	120	5
4	Fichte	20	120	3
5	Hybrid	16	200	5
6	Hybrid	20	200	5

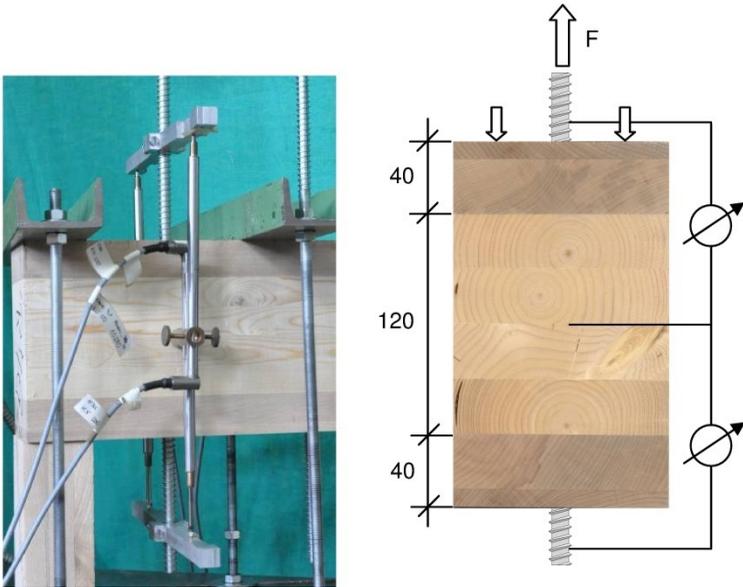


Bild 2-20 Versuchsaufbau – Bestimmung der Ausziehtragfähigkeit

Tabelle 2-7 Ergebnisse – Ausziehtragfähigkeit Hybrid-BSH; Mittelwerte

Reihe	Material	d in mm	L_{ef} in mm	$f_{ax,mean}$ in N/mm ²	v in %	$f_{ax,corr}$ in N/mm ²	N
1	Buche	16	40	35,7	4,8	30,8	10
2	Buche	20	40	26,1	11,5	23,7	7
3	Fichte	16	120	13,4	12,3	11,4	5
4	Fichte	20	120	18,7	7,0	15,1	3
5	Hybrid	16	200	23,6	4,2	–	5
6	Hybrid	20	200	24,3	7,0	–	5

Die Ausziehversuche wurden in Anlehnung an DIN EN 1382 ausgewertet. Die verwendeten Versuchskörper bestehen aus Hybrid-BSH der Festigkeitsklasse GL 28 hyb und sind aus zwei 40 mm dicken Buchen-

randlamellen und einer 120 mm dicken Nadelbrettschichtholzschicht aufgebaut. Um die anteiligen Kraftkomponenten des Gesamtauszieh widerstandes auf die verschiedenen Schichten des Hybrid-Brettschichtholzbauteils überprüfen zu können, wurden zusätzlich Versuche mit 40 mm dicken Buchenlamellen und 120 mm dickem Nadelbrettschichtholz durchgeführt. Mit dieser getrennten Betrachtung ist es möglich, ein erstelltes FE-Modell zu validieren.

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche sind in Tabelle 2-7 angegeben. Der Ausziehparameter $f_{ax} = F_{max}/(d \cdot L_{ef})$ wurde auf eine Bezugsrohddichte von 380 kg/m³ für Nadelholz bzw. 650 kg/m³ für Buchenholz linear korrigiert. Die mittlere Holzfeuchte der Versuchskörper lag zwischen 11,3 und 11,9 %. Der Aufbau des Hybrid-Brettschichtholzes ist dem Bild 2-20 zu entnehmen.

Frühere Untersuchungen (vgl. Tabelle 2-4 und Tabelle 2-5) mit Gewindestangen der Firma SFS intec AG ergaben einen Ausziehparameter $f_{ax,mean}$ von 12 N/mm² ($f_{ax,corr} = 10,7$ N/mm²) für die Gewindestange mit dem Außendurchmesser \varnothing 20 mm und einen mittleren Ausziehparameter $f_{ax,mean} = 11,7$ N/mm² ($f_{ax,corr} = 10,5$ N/mm²) für den Gewindeaußendurchmesser \varnothing 16 mm. Des Weiteren ergibt sich aus Reihe 1 ein höherer Auszieh widerstand als in Reihe 2, obwohl z. B. die aktuelle Bemessungsnorm von einer linearen Zunahme des Auszieh widerstands bei größer werdendem Durchmesser ausgeht.

Der hohe Auszieh widerstand der Buchenlamellen (s. Reihe 1 und 2) erklärt die deutliche Steigerung des Ausziehparameters von herkömmlichem Brettschichtholz (Reihe 3 und 4) gegenüber dem Hybrid-Brettschichtholz (Reihe 5 und 6). Eine Gegenüberstellung der Last-Verschiebungs-Kurven aus früheren Untersuchungen mit Nadelbrettschichtholz mit den ermittelten Kurven der Hybrid-Bauteile ist in Bild 2-21 dargestellt. Um den Auszieh widerstand einer Gewindestange in Hybrid-BSH bestimmen zu können, muss der Ausziehparameter f_{ax} bestimmt werden. Dies kann experimentell, wie in Reihe 5 und 6, oder

analytisch auf der Grundlage von Ausziehparametern der Ausgangsmaterialien (Buchenlamellen und Nadel-BSH) nach der folgenden vorgeschlagenen Gleichung geschehen:

$$f_{ax,hyb} = \frac{h_{NH}}{h} \cdot f_{ax,NH} + \frac{h_{Bu}}{h} \cdot f_{ax,Bu} \quad (21)$$

- h_{NH} Höhe des Nadelholzanteils des Hybrid-BSH-Querschnitts
- h_{Bu} Höhe des Buchenholzanteils des Hybrid-BSH-Querschnitts
- h Höhe des Gesamtquerschnitts
- $f_{ax,NH}$ Ausziehparameter des verwendeten Nadelholzes
- $f_{ax,Bu}$ Ausziehparameter des verwendeten Buchenholzes

Dieser Ansatz unterstellt, dass das Versagen in Fichte und Buche gleichzeitig auftritt bzw. plastisch ist. Der mithilfe der Gleichung (21) zu ermittelnde Ausziehparameter für den in diesem Kapitel gewählten Hybrid-BSH-Querschnitt (vgl. Bild 2-20) ist sowohl für den Durchmesser 16 mm als auch für 20 mm in Tabelle 2-8 angegeben und den experimentell ermittelten Werten aus Reihe 5 und 6 gegenübergestellt. Die angenommene lineare Interaktion des Ausziehparameters in Abhängigkeit der Variablen h_{NH} , h_{Bu} und h scheint für eine grobe Abschätzung der mittleren Ausziehparameter für Hybrid-BSH geeignet zu sein, obwohl der Parameter für die Gewindestange des Durchmessers $d = 20$ mm etwas unterschätzt wird. Aufgrund einer geringen Prüfkörperanzahl ist dieses Ergebnis nicht repräsentativ und bildet lediglich einen kleinen Teil der Grundgesamtheit ab.

Tabelle 2-8 Ausziehtragfähigkeit Hybrid-BSH

d in mm	$L_{ef} = h$ in mm	h_{NH} in mm	h_{Bu} in mm	$f_{ax,mean,Test}$ in N/mm ²	$f_{ax,hyb}$ nach (21) in N/mm ²	$f_{ax,mean,FE}$ = $F/(d \cdot L_{ef})$ in N/mm ²
16	200	120	80	23,6	22,3	22,8
20	200	120	80	24,3	21,7	21,4

Mithilfe des FE-Programms ANSYS® wurde ein Modell entwickelt (s. Bild 2-22), welches das axiale Tragverhalten von Gewindestangen in Hybrid-Brettschichtholz abbilden soll. Das Holzbauteil wurde mithilfe von dreidimensionalen *Solid185*-Elementen modelliert. Die Gewindestange wurde mit *Beam23*-Elementen gebildet, dessen Durchmesser durch den Kerndurchmesser der Gewindestange definiert wurde. Jedes *Beam23*-Element wurde durch zwei Knoten begrenzt. Diese Knoten wurden durch *Combin39*-Federelemente mit den angrenzenden Holzelementen gekoppelt. Diese nichtlinearen Federn besitzen einen Freiheitsgrad in y -Richtung und weisen somit in Längsachse des Verbindungsmittels ein nachgiebiges Verhalten auf. Die nichtlineare Kraft-Verformungs-Beziehung (Materialeigenschaft) der Federelemente wurde durch die in Versuchen (Reihe 1 bis 4) ermittelten Werte als „Real Constants“ definiert. Die Last-Verformungs-Kurven der Reihe 5 und 6 mit den Ergebnissen aus der FE-Berechnung sind in Bild 2-23 und Bild 2-24 dargestellt. Der berechnete Ausziehparameter $f_{ax,mean,FE}$ des FE-Modells ist der letzten Spalte der Tabelle 2-8 zu entnehmen. Die Werte stimmen gut mit den nach Gleichung (21) ermittelten Werten überein, liegen aber geringfügig unterhalb der experimentell ermittelten Werte. Für die Gewindestange mit dem Durchmesser $d = 16$ mm bildet das numerische Modell das Kraft-Verformungs-Verhalten für die fünf Vergleichsversuche gut ab (vgl. Bild 2-23). Aus Bild 2-24 wird ersichtlich, dass das Tragverhalten der 20 mm dicken Gewindestange, insbesondere die Anfangssteifigkeit und die Ausziehtragfähigkeit, unterschätzt wird und unterhalb der Kraft-Verschiebungs-Kurven der Versuche aus Reihe 6 liegen. Durch weitere Versuchsdaten und eine Optimierung des Modells könnten vermutlich gute Aussagen über das Tragverhalten von auf Herausziehen beanspruchten Gewindestangen in Hybrid-BSH getroffen werden. Dies wurde hier im Rahmen der wissenschaftlichen Untersuchungen nicht weiter verfolgt.

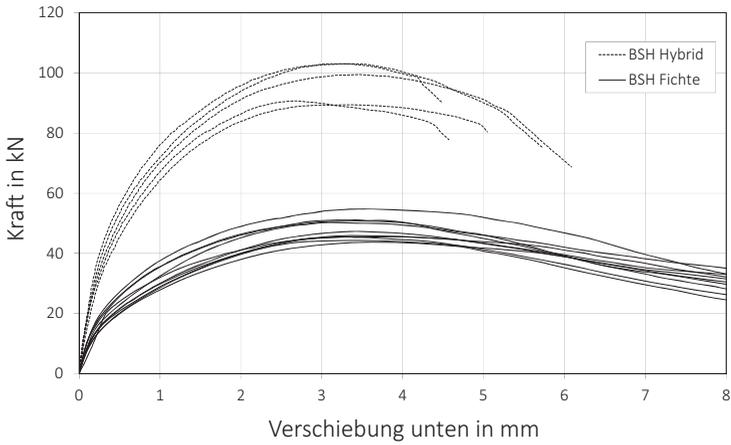


Bild 2-21 Kraft-Verformungs-Diagramm ($L_{ef} = 200$ mm und $d = 20$ mm)

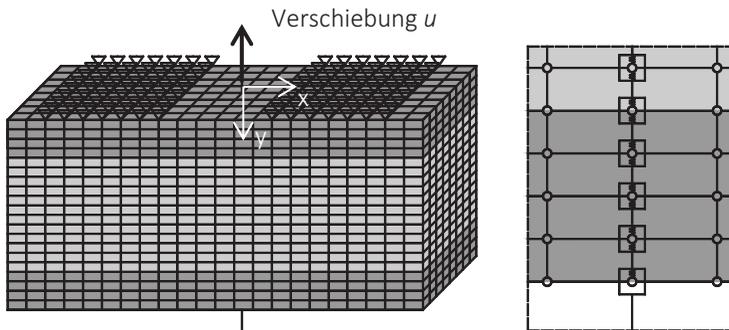


Bild 2-22 Finite-Elemente-Modell zur Ermittlung des Auszieh Widerstands

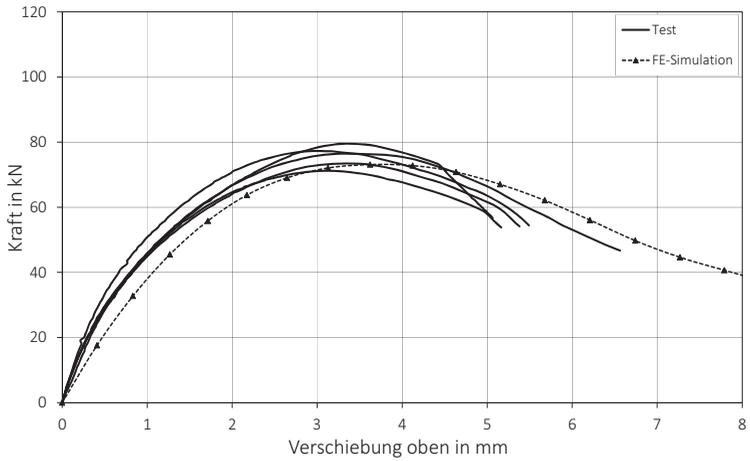


Bild 2-23 Vergleich der Versuchsergebnisse der Reihe 5 mit dem FE-Modell ($L_{ef} = 200 \text{ mm}$ und $d = 16 \text{ mm}$)

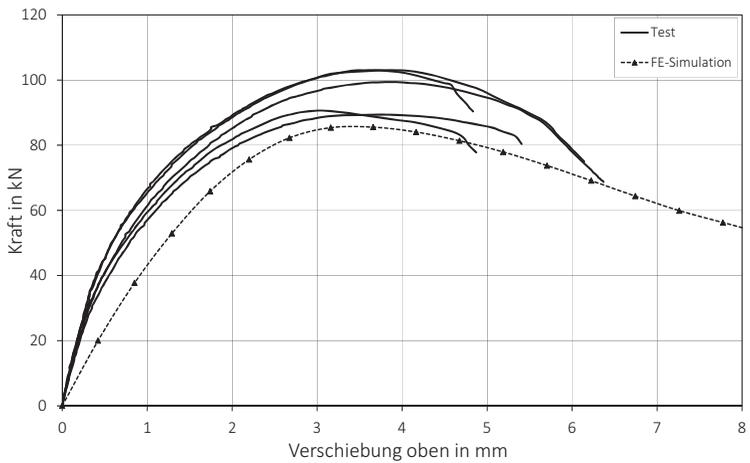


Bild 2-24 Vergleich der Versuchsergebnisse der Reihe 6 mit dem FE-Modell ($L_{ef} = 200 \text{ mm}$ und $d = 20 \text{ mm}$)

Das Ziel dieses Kapitels, Aussagen über den Auszieh Widerstand von Gewindestangen in Hybrid-BSH zu treffen, wurde erreicht. Zusätzlich scheint ein linearer Ansatz zur Bestimmung des Ausziehparameters $f_{ax,hyb}$ geeignet zu sein, um erste Näherungswerte zu erhalten. Das erstellte Simulationsmodell kann für weitere Betrachtungen eine hilfreiche Ergänzung darstellen, um das Kraft-Verformungs-Verhalten einer auf Herausziehen beanspruchten Gewindestange näher zu betrachten. Für weiterführende Überlegungen oder normenrelevante Bemessungsansätze sind weitere Untersuchungen notwendig.

2.3.1.3 Versuche mit Buchen-FSH

Zur Bestimmung der Ausziehtragfähigkeit von um 90° und 45° zur Faser in Buchenfurnierschichtholz eingedrehten Gewindestangen $\varnothing 16$ mm werden die Verbindungsmittel in Achsrichtung bis zum Versagen belastet (s. Bild 2-25). Die Prüfkörper aus Buchenfurnierschichtholz wiesen eine mittlere Rohdichte $\rho = 732 \text{ kg/m}^3$ und eine mittlere Holzfeuchte von $u = 6,1\%$ (direkt nach den Versuchen ermittelt) auf. Der Querschnitt der Prüfkörper betrug $H / B = 150 / 100$ mm. Es wurden sowohl Prüfkörper mit einer zur Holzfaser rechtwinklig ausgerichteten GS als auch eine um 45° gedrehte Variante hergestellt und geprüft. Als Verbindungsmittel wurden Gewindestangen SFS WB $\varnothing 16$ mm nach der allgemein bauaufsichtlichen Zulassung Z-9.1-777 verwendet. Die Furnierlagendicke wird vom Hersteller mit 3,7 mm angegeben. Es wurden lediglich stehende Furniere getestet.

Tabelle 2-9 Mittlere Ausziehparameter – SFS WB Gewindestange $d = 16$ mm in Buchen-FSH

N	α in $^\circ$	L_{ef} in mm	\varnothing_{Bohr} in mm	ρ_{mean} in kg/m^3	$f_{ax,mean}$ in N/mm^2	v in %
5	90	150	13	773	37,3	2,2
3	45	150	13	695	30,0	11,0

Legende s. Tabelle 2-4



Bild 2-25 Typische Versagensbilder; $\alpha = 90^\circ$ (links) und $\alpha = 45^\circ$ (rechts)

Bei Verbindungen mit eingedrehten Gewindestangen in Buchenfurnierschichtholz mit stehenden Furnierlagen wurde die Ausziehtragfähigkeit für unterschiedliche Kraft-Faser-Winkel (45° und 90°) untersucht und die Ergebnisse in Tabelle 2-9 angegeben. Die Herausziehtragfähigkeit unter einem Winkel von 90° ist deutlich größer ($f_{ax,mean} = 37,3 \text{ N/mm}^2$) als bei Verbindungen mit einem Kraft-Faser-Winkel von 45° ($f_{ax,mean} = 30,0 \text{ N/mm}^2$). Aufgrund der deutlich höheren Rohdichte und der geringen Versuchsanzahl bildet dieses Ergebnis nicht die Ausziehparameter der Grundgesamtheit ab, sondern liefert lediglich Anhaltswerte für die hier betrachteten Prüfkörper.

2.3.2 Faserparallel eingeklebte Gewindestäbe

2.3.2.1 BSH aus Nadelholz

Anschlüsse mit faserparallel eingeklebten Gewindestäben sind in Deutschland normativ geregelt. Dabei sind Randbedingungen vorgegeben, die Mindestabstände der Stäbe untereinander sowie zum Bauteilrand einschließen. Die Wirtschaftlichkeit solcher Anschlüsse kann durch eine Verringerung der Abstände der Gewindestäbe optimiert werden. Die Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine wurde von der Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. mit der Prüfung von Verbindungen mit faserparallel eingeklebten Gewindestäben in Brett-schichtholz (GL 24h) beauftragt. Dabei wurde neben einer Verringerung der Verbindungsmittelabstände auch der Einfluss eines vom Hirnholz zurückversetzten Endes der Klebefuge auf die Tragfähigkeit einer Verbindung untersucht. Die wichtigsten Erkenntnisse und Ergebnisse des Prüfberichts (Krüger und Blaß 2011) sind nachfolgend aufgeführt. Stabförmige Prüfkörper aus BSH der Festigkeitsklasse GL 24h wurden verwendet. Als Verbindungsmittel wurden Gewindestäbe M16 der Festigkeit 8.8 eingesetzt. Für die Verklebung wurde der Klebstoff „WEVO Spezialharz EP20/VP1 mit WEVO Härter B20/1“ nach allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung Z-9.1-750 gewählt.

Geprüft wurden zugbeanspruchte Verbindungen mit einem faserparallel eingeklebten Gewindestab. Der Aufbau der Prüfkörper ist in Bild 2-26 dargestellt. Variiert wurden die Einklebelänge der Gewindestäbe L_{ad} ($10 \cdot d$, $15 \cdot d$ und $20 \cdot d$) sowie die Stabbreite a ($5 \cdot d$ und $3,5 \cdot d$). Der Abstand der Stäbe zum Prüfkörperendrand beträgt stets $0,5 \cdot a$. Des Weiteren wurden Verbindungen mit einem zurückversetzten Ende der Klebefuge zum Hirnholz untersucht. Die Länge des zurückversetzten Klebefugenendes betrug $L_v = 4 \cdot d = 64$ mm (vgl. Bild 2-27). Die Holzfeuchte der Prüfkörper lag bei etwa 10 %.

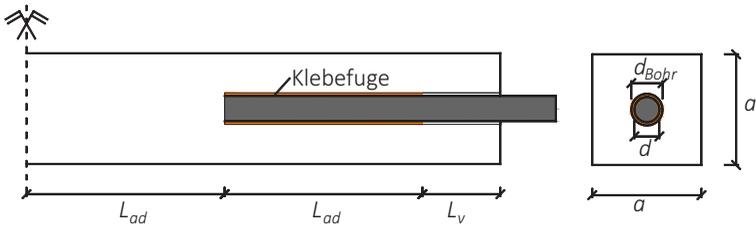


Bild 2-26 Aufbau Prüfkörper



Bild 2-27 Eingeklebter Stab mit zurückversetztem Ende der Klebefuge

Die Ergebnisse der Prüfungen mit einer eingeklebten Gewindestange mit metrischem Gewinde sind in Tabelle 2-10 dargestellt. Es ist lediglich das arithmetische Mittel der jeweiligen Versuchsreihe aus fünf symmetrisch aufgebauten Einzelversuchen angegeben. Neben dem Auszieh Widerstand F_{max} ist auch der Wert der Klebefugenfestigkeit f_{k1} nach Gleichung (22) und, zum besseren Vergleich mit den eingeschraubten Gewindestangen der vorangegangenen Kapitel, der Ausziehparameter $f_{ax} = \pi \cdot f_{k1}$ nach Gleichung (23) angegeben.

$$f_{k1} = \frac{F_{max}}{\pi \cdot d \cdot L_{ad}} \quad (22)$$

$$f_{ax} = \frac{F_{max}}{d \cdot L_{ad}} \quad (23)$$

Tabelle 2-10 Ergebnisse der faserparallel eingeklebten Gewindestäbe (M16; $d = 16 \text{ mm}$ und $d_{\text{Bohr}} = 20 \text{ mm}$) in BSH (GL 24h) – Mittelwerte

N	a in mm	L_{ad} in mm	L_v in mm	F_{max} in kN	f_{k1} in N/mm ²	f_{ax} in N/mm ²	Versagen
5	$5 \cdot d$	$10 \cdot d$	-	52	6,47	20,3	Sp
5	$5 \cdot d$	$15 \cdot d$	-	68	5,63	17,7	Sp
5	$5 \cdot d$	$20 \cdot d$	-	89	5,52	17,3	Sp
5	$3,5 \cdot d$	$10 \cdot d$	-	52	6,44	20,2	Sp
5	$3,5 \cdot d$	$15 \cdot d$	-	61	5,06	15,9	Sp & Zn
5	$3,5 \cdot d$	$20 \cdot d$	-	77	4,78	15,0	Sp & Zn
5	$3,5 \cdot d$	$10 \cdot d$	$4 \cdot d$	65	8,11	25,5	Sp & Zn
5	$3,5 \cdot d$	$15 \cdot d$	$4 \cdot d$	74	6,16	19,4	Sp & Zn
5	$3,5 \cdot d$	$20 \cdot d$	$4 \cdot d$	66	4,11	12,9	Zn & Zb

Sp .. Aufspalten am Zugstabende
Zn .. Zugversagen des Holzes im Nettoquerschnitt
Zb .. Zugversagen des Holzes im Bruttoquerschnitt

Für jede Prüfreihe ist außerdem die Ursache des Versagens angegeben. Es wird deutlich, dass für Zugstäbe mit einer Breite $a = 5 \cdot d$ immer ein Aufspalten der Stabenden maßgebend (vgl. Bild 2-28) ist und das schlagartige Versagen einleitet. Bei den kleineren Holzstabquerschnitten wurde insbesondere bei den Prüfkörpern mit zurückversetzter Klebefuge ein Zugversagen des Holzes im Netto- oder im Bruttoquerschnitt festgestellt. Das Zurücksetzen der Klebefuge reduziert somit die Gefahr des Aufspaltens und erhöht geringfügig die Tragfähigkeit. Die Länge L_v könnte jedoch ebenfalls durch Verklebung zur Kraftübertragung zur Verfügung stehen und einen größeren Vorteil als das Zurücksetzen der Klebefuge bewirken. Insgesamt sollte immer ein duktiles Verbindungsmittelversagen angestrebt werden und hierfür muss eine ausreichend lange Verklebungslänge vorhanden sein.

Weitere Versuche mit Verbindungsmittelgruppen der Einklebelängen $10 \cdot d$ und $15 \cdot d$, bestehend aus 2, 3 und 4 Gewindestäben, wurden durchgeführt und zeigten ein ähnliches Aufspaltversagen (s. Bild 2-29) wie einzelne Gewindestäbe. Der Klebefugenparameter der Zugstäbe mit zwei und drei Gewindestäben lag im Mittel bei $f_{k1} = 6,2 \text{ N/mm}^2$. Die Klebefugenfestigkeit f_{k1} der Versuche mit vier Gewindestäben je Verbindung wurde zu $5,7 \text{ N/mm}^2$ bestimmt.



Bild 2-28 Versagensbild bei einem Gewindestab mit $a = 56 \text{ mm}$ und $L_{0d} = 160 \text{ mm}$



Bild 2-29 Versagensbild bei vier Gewindestäben

2.3.2.2 Furnierschichtholz aus Buche

Versuche von Verbindungen mit faserparallel eingeklebten Gewindestäben in Buchenfurnierschichtholz wurden in einer früheren Versuchsreihe (Enders-Comberg und Blaß 2013) durchgeführt und ausgewertet. Neben Furnierschichtholz ohne Querlagen wurden auch Versuche mit eingeklebten Gewindestäben in Buchenfurnierschichtholz mit vier Querlagen und zusätzlicher Querbewehrung im Verbindungsbereich mittels Vollgewindeschrauben durchgeführt. Die zwei betrachteten Querschnitte sind in Bild 2-30 dargestellt.

Die 700 mm langen stabförmigen Prüfkörper aus Buchenfurnierschichtholz wiesen eine mittleren Rohdichte $\rho_{mean} = 757 \text{ kg/m}^3$ und eine mittlere Holzfeuchte $u_{mean} = 6,4 \%$ (direkt nach den Versuchen ermittelt) auf. Als Verbindungsmittel wurden Gewindestäbe M16 (Außendurchmesser $d = 16 \text{ mm}$) der Festigkeit 8.8 eingeklebt. Für die Verklebung wurde der Klebstoff „WEVO Spezialharz EP 32 S mit WEVO Härter B 22 TS“ nach allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung Z-9.1-705 verwendet. Um ein frühzeitiges Aufspalten der Versuchskörperenden der Versuchsreihe mit Querlagen zu unterbinden, wurden je Verbindung vier Vollgewindeschrauben $\varnothing 6 \text{ mm}$ zur Querbewehrung in $\varnothing 4 \text{ mm}$ vorgebohrte Löcher eingebracht (s. Bild 2-31, rechts).

Die Mittelwerte der zehn Versuchsergebnisse – durch den symmetrischen Aufbau insgesamt 20 Verbindungen – sind in der nachfolgenden Tabelle 2-11 angegeben. Ausführliche Versuchsergebnisse sind im Anhang in Bild A-7, Bild A-8, Tabelle A-17 und Tabelle A-18 dargestellt. Die mittleren Steifigkeiten in axialer Stabrichtung wurden zu ca. 250 kN/mm ermittelt. Die repräsentativen Versagensbilder der maßgebenden Verbindung der symmetrisch aufgebauten Prüfkörper sind in Bild 2-31 dargestellt. Trotz der geringen Versuchsanzahl wird eine deutliche Tragfähigkeitssteigerung der Querschnitte mit Querlagen und Querbewehrungsschrauben gegenüber der Stabquerschnitte

ohne Bewehrungen deutlich. Eine Erhöhung der Tragfähigkeit von 30 bis 40 % erscheint realistisch und verdeutlicht die tragfähigkeitsmindernde Wirkung des Spaltens.

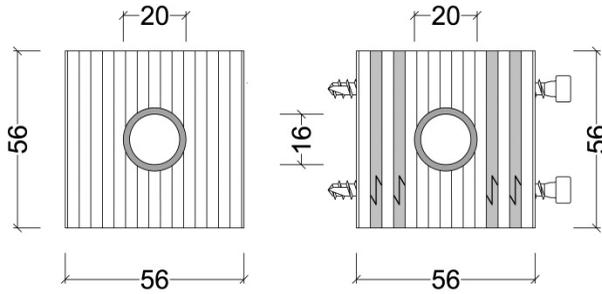


Bild 2-30 Stabquerschnitte ohne (links) und mit (rechts) Bewehrungen; Maße in mm

Tabelle 2-11 Ergebnisse der faserparallel eingeklebten Gewindestäben (M16; $d = 16$ mm und $d_{Bohr} = 20$ mm) in Buchen-FSH – Mittelwerte

N	a in mm	L_{ad} in mm	Verstärkung	F_{max} in kN	f_{k1} in N/mm ²	f_{ax} in N/mm ²	Versagen
5	$3,5 \cdot d$	$10 \cdot d$	Nein	71	8,85	27,8	Sp
5	$3,5 \cdot d$	$10 \cdot d$	Ja	98	12,2	38,4	Sp & S

Sp .. Aufspalten am Zugstabende
 S .. Scherversagen im Bereich der Verklebung entlang des Stabes



Bild 2-31 Aufspalten des Querschnitts ohne Querbewehrung (links) und Klebefugenversagen bei denjenigen mit Querbewehrung (rechts)

2.3.3 Vergleich Ausziehtragfähigkeiten

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel gegenübergestellt und diskutiert werden. Hierfür werden die Werte der Versuche mit Gewindestangen (sowohl metrisches Gewinde als auch Gewinde nach DIN 7998) des Durchmessers $d = 16$ mm berücksichtigt. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass in Tabelle 2-12 geklebte Gewindestäbe mit eingedrehten Gewindestangen verglichen werden. Der Vorbohrdurchmesser unterscheidet sich somit deutlich (20 mm bzw. 13 mm).

Tabelle 2-12 Vergleich der mittleren Ausziehparameter für einen Zugstab

Material	Verklebung	Besonderheit	L_{ad} in mm	a	f_{ax} in N/mm ²	f_{ki} in N/mm ²
Fi-BSH	Ja	–	160	$3,5 \cdot d$	20,2	6,44
Fi-BSH	Ja	Zurückversetzte Klebefuge	160	$3,5 \cdot d$	25,5	8,11
Bu-FSH	Ja	–	160	$3,5 \cdot d$	27,8	8,85
Bu-FSH	Ja	Querlagen und Querzugverstärkung	160	$3,5 \cdot d$	38,4	12,2
Fi-BSP	Nein	Querzugverstärkung	500	$4 \cdot d$	12,3	–
Bu-BSP	Nein	Querzugverstärkung	200	$4 \cdot d$	29,6	–

Der Vergleich der mittleren Ausziehparameter zeigt, dass durch die Verwendung von Buchenfurnierschichtholz eine deutliche Tragfähigkeitssteigerung erzielt werden kann und die berechnete Ausziehfestigkeit f_{ax} von geklebten Gewindestangen um ca. 38 % auf einen Wert von 27,8 N/mm² gesteigert werden kann. Eine zurückversetzte Klebefuge bewirkt eine Verbesserung von 26 %, „verschenkt“ aber gleichzeitig die Länge L_v , welche ebenfalls für eine Verklebung zur Verfügung stehen könnte. Buchenfurnierschichtholz mit Querlagen und Vollgewindeschrauben zur Querbewehrung stellt einen optimierten Zugstab

dar, der gegenüber BSH aus Nadelholz nahezu die doppelte Ausziehtragfähigkeit aufweist.

Der Verzicht auf geklebte Gewindestäbe erfordert eine Zugstabverbindung mit eingedrehten Gewindestangen mit einem Holzgewinde nach DIN 7998. Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass in Brettsperrholz aus Nadelholz eingedrehte Gewindestangen eine gute Alternative zu bisher gängigen Stabanschlüssen darstellen. Der um ca. 40 % kleinere Ausziehparameter gegenüber den eingeklebten Gewindestangen kann durch große Verankerungslängen ausgeglichen werden, da ab ungefähr 500 mm ein duktiles Stahlversagen für die Gewindestangen mit einem Außengewindedurchmesser von 16 mm maßgebend wird. Die Gewindestangen in BSP, bestehend aus Buchenfurnieren, weisen mit einem $f_{ax} = 29,6 \text{ N/mm}^2$ einen sehr hohen Ausziehparameter auf, der nahezu in dem Bereich der verklebten Verbindungen liegt. Insgesamt stellen die in BSP eingedrehten Gewindestangen eine tragfähige Alternative zu den geklebten Gewindestäben dar, wobei die axiale Steifigkeit deutlich geringer ist (120 kN/mm anstatt 250 kN/mm). Angesichts der für den Ingenieurholzbau überdurchschnittlich hohen Steifigkeitswerte beider Verbindungsmöglichkeiten sollte diese Differenz nicht überbewertet werden.

Der Vollständigkeit halber sind in der nachfolgenden Tabelle 2-13 die Ausziehparameter der mit eingedrehten Gewindestangen durchgeführten Versuche aufgeführt. Die Werte deuten auf keinen signifikanten Einfluss des Gewindedurchmessers auf den Ausziehparameter hin. Der Einsatz von Buchenlamellen im Hybrid-BSH bewirkt nahezu eine Verdopplung des gemittelten Ausziehparameters. Außerdem wird der hohe Auszieh Widerstand von Bu-FSH gegenüber einer axialen Herausziehbeanspruchung deutlich. Unter der Annahme, dass für Buchenfurnierschichtholz der Ausziehparameter bei zunehmender Verankerungslänge konstant bleibt, würde bei der Stahltragfähigkeit der Gewindestange $R_{t,u,mean} = 100 \text{ kN}$ nach Tabelle 2-1 ein L_{ef} von ca. 170 mm ausreichen, um ein Stahlversagen zu bewirken.

Tabelle 2-13 Vergleich der mittleren Ausziehparameter für eingedrehte Gewindestangen mit Holzschraubengewinde

Material	Kraft-Faser-Winkel	L_{ef} in mm	f_{ax} (Ø 16 mm) in N/mm ²	f_{ax} (Ø 20 mm) in N/mm ²
Fi-BSH	90°	200	11,7	12,0
Fi-BSH	45°	200	14,3	14,2
Bu-FSH	90°	150	37,3	–
Bu-FSH	45°	150	30,0	–
Hybrid-BSH	90°	200	23,6	24,3

2.4 Querschnittsschwächung im Druckbereich

2.4.1 Allgemeines

Durch den Anschluss der Füllstäbe an den Ober- und Untergurt eines Fachwerkträgers wird in der Regel der Querschnitt des Zug- bzw. Druckgurtes geschwächt. Querschnittsschwächungen sind bei Spannungsnachweisen in bestimmten Fällen rechnerisch zu berücksichtigen, wenn z. B. Widerstandsmomente und Querschnittsflächen in nennenswertem Maße reduziert werden. Ausgenommen hiervon sind in gewissem Umfang Schwächungen durch Baumkanten, Keilzinkenverbindungen oder stiftförmige Verbindungsmittel, die ohne Vorbohren eingetrieben werden. Löcher und Aussparungen in der Druckzone von Bauteilen dürfen jedoch vernachlässigt werden, wenn diese mit einem Baustoff ausgefüllt sind, dessen Steifigkeit mindestens derjenigen des umgebenden Holzes entspricht (vgl. DIN EN 1995-1-1:2010; DIN 1052:1969; DIN 1052:2008). Dieser Regel liegt die Annahme zugrunde, dass Druckspannungen ohne größere Störungen des Kraftflusses durch die Verbindungsmittel hindurch geleitet werden und damit die Durchdringung von Stabdübeln, Passbolzen, Gewindestangen oder Schrauben keine Schwächung des Bauteils darstellt. Im Gegensatz dazu müssen entsprechende Fehlstellen in der Zugzone bei Tragfähigkeitsnachweisen berücksichtigt werden. Dies basiert auf Versuchen von Egner und Kolb (1955), welche gezeigt haben, dass die Bruchlasten von Brettern bei Zugbeanspruchung mit eingebrachten Nägeln gegenüber dem ungeschwächten Querschnitt geringer sind. Den Regelungen für den Druckbereich liegen keine dem Autor bekannten experimentellen Untersuchungen zugrunde. Aus Arbeiten von Kollmann (1951), Glos (1987) und Frese et al. (2011) ist über die Druckfestigkeit parallel zur Faser bekannt, dass sie im Wesentlichen von der Holzfeuchte und der Rohdichte abhängt (vgl. Bild 2-32). Die Ästigkeit hat nur einen geringen Einfluss auf die Festigkeit. Meist wurde ein

linearer Ansatz gewählt, um die Korrelation zwischen Festigkeit und Feuchte bzw. Festigkeit und Rohdichte zu beschreiben.

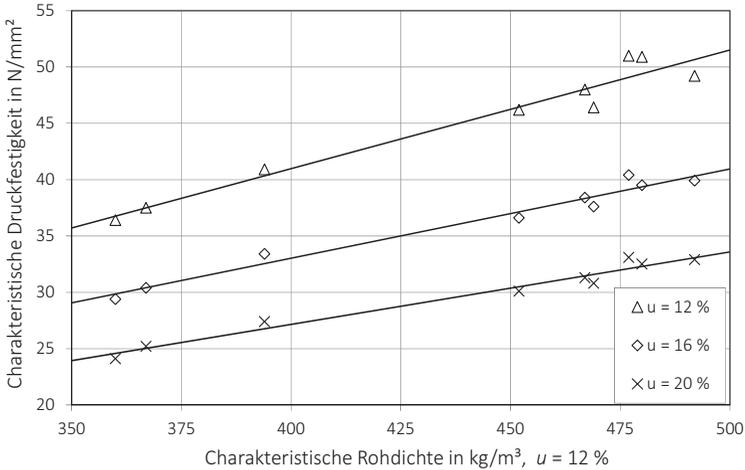


Bild 2-32 *Abhängigkeit simulierter Druckfestigkeiten von der charakteristischen Rohdichte unter Berücksichtigung verschiedener Holzfeuchten (Frese et al. 2011)*

Das Vorhandensein von Bohrungen und Verbindungsmitteln im Holz verändert den Kraftfluss und damit den beanspruchten Querschnitt. Der Einfluss dieser Veränderungen auf die Tragfähigkeit bei Druckbeanspruchung wird in diesem Kapitel genauer untersucht. Dazu werden die Auswirkungen unterschiedlicher Anschlussgeometrien, Vollholzprodukte, Verbindungsmittel, Oberflächenrauigkeiten der Verbindungsmittel und Holzfeuchten auf das Querschnittstragverhalten betrachtet. Um den Einfluss der Querschnittsschwächung auf die Tragfähigkeit eines auf Druck beanspruchten Bauteils genauer beurteilen zu können, wurden insgesamt über 650 Druckversuche an ungeschwächten und geschwächten Prüfkörpern durchgeführt. Unterschiedliche Versuchskonfigurationen werden betrachtet. Zum einen wurden BSH-Prüfkörper aus Fichten- und Buchenholz auf Druck bean-

spricht, um eine Schwächung des gesamten Anschlussbereichs eines Holzbauteils und somit einen globalen Einfluss zu untersuchen und zu quantifizieren. Zum anderen werden kleine fehlerfreie Vollholz-Prüfkörper mit einer einzigen Fehlstelle betrachtet, um eine verbindungsmittelebedingte Schwächung und somit die lokalen Einflüsse auf das Tragverhalten beschreiben zu können. Neben experimentellen Untersuchungen wird das Tragverhalten numerisch analysiert.

2.4.2 Material und Methode

2.4.2.1 Allgemein

Die betrachteten Prüfkörper (PK) bestehen aus Brettschichtholz (globaler Einfluss der Schwächung) und aus nahezu fehlerfreiem Nadel-schnittholz (lokale, verbindungsmittelebedingte Schwächung). Neben den ungeschwächten Referenzprüfkörpern wurden verschiedene Schwächungen durch Verbindungsmittel untersucht. Die Übersicht des Versuchsprogramms ist in Tabelle 2-14 dargestellt.

Tabelle 2-14 Versuchsprogramm und Prüfkörperbezeichnung

	Referenz-PK	PK mit Schwächung und/oder Verbindungsmittel	Material
Globale Schwächung	Typ A	Typen B - E	BSH
Lokale Schwächung	Typ a	Typen b - f	VH

2.4.2.2 Globale Schwächung

Das verwendete Brettschichtholz entsprach der Festigkeitsklasse GL 24h. Neben den ungeschwächten Referenzprüfkörpern (Typ A) waren bei den Prüfkörpertypen mit Querschnittsschwächung vier in

praktischen Anwendungen vorkommende Schwächungen vorgesehen.
Die folgenden Prüfkörpertypen wurden untersucht:

- Typ A: Ungeschwächter Querschnitt
- Typ B: 45° geneigt eingedrehte Gewindestange
(\varnothing 20 mm; 16 mm Vorbohrdurchmesser)
- Typ C: Stahlblech-Holz-Verbindung
(7 mm Schlitz für Stahlblech und 10 mm Bohrungen
für 3 x 4 Stabdübel \varnothing 10 mm)
- Typ D: 2 x 5 Vollgewindeschrauben SPAX T-STAR \varnothing 10 mm
(Prüfkörper nicht vorgebohrt)
- Typ E: Eingeklebte Gewindestange
(\varnothing 16 mm; 20 mm Vorbohrdurchmesser)

Die fünf Prüfkörpertypen sind in Bild 2-33 dargestellt.

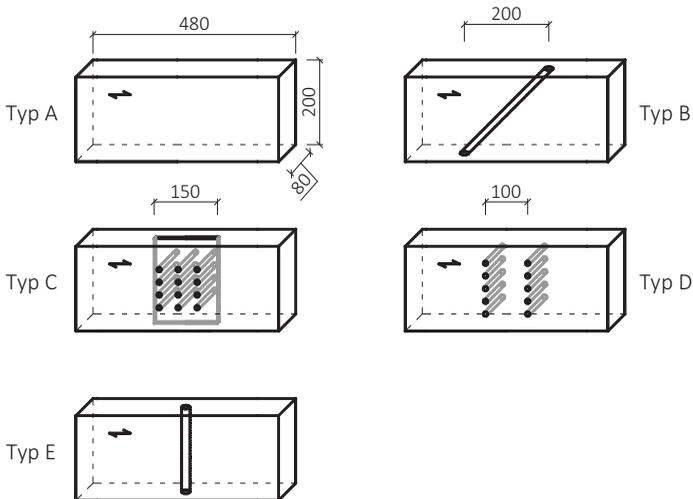


Bild 2-33 Untersuchte Prüfkörpertypen, Maße in mm

Tabelle 2-15 Brettschichtholzeigenschaften (GL 24h) in NKL 1

Typ	Charge	u_{mean} in %	N	$\rho^{(1)}$ in kg/m ³			$\frac{A_{netto}}{A_{brutto}}$
				\bar{x}	s	$x_{0,05}$	A_{brutto}
A1	1	10,2	51	457	21	417	1,0
B			50	458	21	418	0,8
C			49	459	20	419	0,71
A2	2	11,5	51	473	29	423	1,0
D			50	473	29	425	0,85 ²⁾
A3	3	13,0	49	476	23	435	1,0
E			52	477	22	435	0,75 ³⁾

\bar{x} .. Mittelwert s .. Standardabweichung $x_{0,05}$.. 5 %-Quantil
¹⁾ Rohdichte beim Feuchtegehalt u_{mean}
²⁾ Bezogen auf den Kerndurchmesser \varnothing 6,1 mm
³⁾ Bezogen auf den Vorbohrdurchmesser \varnothing 20 mm

Die aus fünf 40 mm dicken Brettlamellen hergestellten Prüfkörper hatten eine Breite B von 80 mm, eine Höhe H von 200 mm und eine Länge L von 480 mm. Im Durchschnitt wurden von jedem Typ 50 BSH-Bauteile mit eingebrachten Verbindungsmitteln und Stahlblech geprüft. Lediglich die Prüfkörper des Typs D wurden vor dem Einbringen der Verbindungsmittel nicht vorgebohrt.

Die Brutorohdichte und der Feuchtegehalt der Druckprüfkörper wurden vor dem Einbringen der Schwächungen und der Verbindungsmittel bestimmt. Anschließend wurden diese Brettschichtholzabschnitte nach der Rohdichte sortiert und abwechselnd den Prüfkörpertypen zugeteilt. Durch diese Zuteilung ist gewährleistet, dass die Rohdichteverteilungen bei den vier Prüfkörpertypen weitgehend identisch sind. Insgesamt wurden drei Chargen Brettschichtholz unterschiedlicher Hersteller untersucht. Charge 1 wurde für die Typen A1, B

und C verwendet, Charge 2 für die Typen A2 und D und Charge 3 für Typ A3 und E. Die Materialeigenschaften der Prüfkörper (Rohdichte und Feuchtegehalt) und die relative Querschnittsschwächung sind der Tabelle 2-15 zu entnehmen.

Der Versuchsaufbau der 350 Druckversuche mit Brettschichtholz ist in Bild 2-34 (links) dargestellt. Die obere Lasteinwirkungsplatte ist gelenkig gelagert und ermöglicht ein freies Verdrehen, wohingegen die untere Stahlplatte starr angeordnet ist. Die Prüfkörper wurden in Anlehnung an DIN EN 408 mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 0,6 mm/min bis zum Versagen beansprucht. Die Zusammendrückung in einem Bereich von 320 mm wurde mit induktiven Wegaufnehmern gemessen.

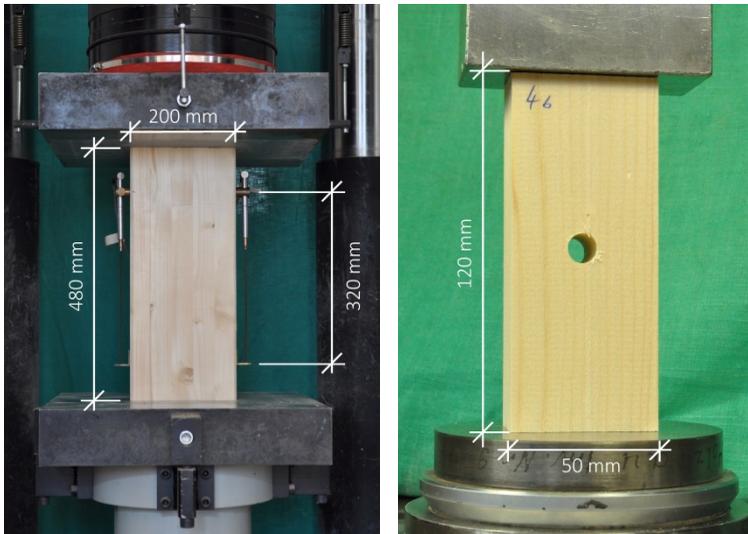


Bild 2-34 Versuchsaufbau globale Schwächung (links) und lokale Schwächung (rechts)

2.4.2.3 Lokale Schwächung

Aus zehn Vollholzlaten (*Picea abies*) wurden jeweils sechs Prüfkörper mit nahezu identischen strukturellen Eigenschaften hergestellt (s. Bild 2-35). Die relativ kurze Länge (ca. 720 mm) der Latten begründet die Annahme, dass die Rohdichte und die Jahrringlage und -breite innerhalb einer Latte ähnlich ausgeprägt sind und somit die Prüfkörpertypen a bis f ähnliche mechanische Eigenschaften aufweisen.

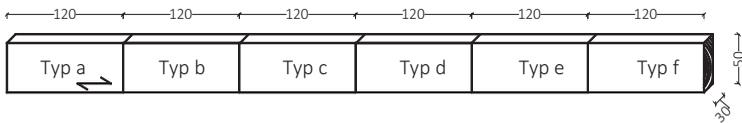


Bild 2-35 *Zuschnitt aus eine Latte und Einteilung in Querschnittstypen; Maße in mm*

Es wurden sechs unterschiedliche Querschnittstypen untersucht:

- Typ a: Ungeschwächter Querschnitt
- Typ b: 10 mm Bohrung ohne Verbindungsmittel
- Typ c: 10 mm Bohrung für glatten Stabdübel \varnothing 10 mm
- Typ d: 10 mm Bohrung für rauen Stabdübel \varnothing 10 mm
- Typ e: Vollgewindeschraube SPAX T-STAR \varnothing 10 mm mit Cut-Spitze im nicht vorgebohrten Prüfkörper
- Typ f: 10 mm Bohrung für eingeklebten glatten Stabdübel \varnothing 10 mm (Zweikomponentenkleber Terokal 221)

Die geprüften Holzstücke waren 120 mm lang, 50 mm breit und 30 mm dick. Somit verursachte eine 10 mm Bohrung über die gesamte Bauteildicke eine rechnerische Schwächung von 20 %. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Rohdichte und Holzfeuchte sind in Tabelle 2-16 angegeben. Der relative Nettoquerschnitt A_{Netto}/A_{Brutto} ist ebenfalls der Tabelle 2-16 zu entnehmen. Die Prüfkörper wurden

mit einer gleichmäßigen Druckkraft parallel zur Faser mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 0,5 mm/min beansprucht (s. Bild 2-34, rechts). Die Verformungen der gesamten Prüfkörperlänge wurden mithilfe des Maschinenwegs bestimmt.

Tabelle 2-16 Eigenschaften des fehlerfreien Holzes (*Picea abies*)

Typ	u_{mean} in %	N	ρ in kg/m ³		$\frac{A_{netto}}{A_{brutto}}$
			\bar{x}	s	
a	8,5	10	412	27	1,0
b		10	413	29	0,8
c		10	416	27	0,8
d		10	415	26	0,8
e		10	423	22	0,88 ^{*)}
f		10	424	21	0,8

\bar{x} .. Mittelwert s .. Standardabweichung
^{*)} Bezogen auf den Kerndurchmesser \varnothing 6,1 mm

2.4.2.4 Nutzungsklasse 2

Analog zur experimentellen Untersuchung in Kapitel 2.4.2.2 wurden 150 Versuche durchgeführt, um Aussagen über den Einfluss von mechanischen Verbindungsmitteln in der Nutzungsklasse 2 bei Druckbeanspruchung parallel zur Faser treffen zu können. Drei unterschiedliche Reihen wurden im Rahmen dieser Betrachtung untersucht:

- Typ A-NKL1: Ungeschwächter Querschnitt, NKL 1
- Typ A-NKL2: Ungeschwächter Querschnitt, NKL 2
- Typ D-NKL2: 2 x 5 Vollgewindeschrauben SPAX T-STAR
Ø 10 mm mit Cut-Spitze im nicht vorgebohrten Prüfkörper, NKL 2

Der Kerndurchmesser (Ø 6,1 mm) der verwendeten selbstbohrenden Holzschrauben verursacht eine theoretische Querschnittsschwächung von 15 % des Gesamtquerschnitts des Brettschichtholzes. Die Materialkennwerte des Holzes sind in Tabelle 2-17 gegeben.

Tabelle 2-17 Brettschichtholzeigenschaften (GL 24h) in NKL 1 und 2

Typ	NKL	u_{mean} in %	N	ρ_{darr} in kg/m ³			$\frac{A_{netto}}{A_{brutto}}$
				\bar{x}	s	$x_{0,05}$	
A-NKL 1	1	9,5	50	441	19	415	1,0
A-NKL 2	2	16,0	50	441	20	414	1,0
D-NKL2	2	16,0	50	442	9	415	0,85
\bar{x} .. Mittelwert		s .. Standardabweichung		$x_{0,05}$.. 5 %-Quantil			

2.4.2.5 Buchen-BSH

Neben der Betrachtung der Holzart Fichte als BSH- und Vollholz-Produkt wurde auch BSH aus Buche experimentell untersucht. Hierfür wurden 96 Druckversuche mit Buchen-BSH durchgeführt. Die Prüfkörperpaare (ein ungeschwächter Querschnitt und ein durch zwei Vollgewindeschrauben geschwächter Querschnitt) wurden nach Bild 2-36 zugeschnitten und die Holzeigenschaften (Rohdichte und Holzfeuchte) in den direkt angrenzenden Bereichen bestimmt. Die Werte der Brett-schichtholzeigenschaften sind in Tabelle 2-18 angegeben. Ergänzend sind die Histogramme und Summenlinien der Materialien in Bild A-15 und Bild A-16 dargestellt. Lediglich zwei Typen wurden im Rahmen der Laubholz-Betrachtung untersucht:

- Ungeschwächter Querschnitt
- Geschwächter Querschnitt: Zwei Vollgewindeschraube SPAX T-STAR Ø 10 mm mit Cut-Spitze im vorgebohrten Prüfkörper ($\varnothing_{\text{Bohr}} = 5,8 \text{ mm}$)

Tabelle 2-18 Buchen-Brettschichtholzeigenschaften

Typ	u_{mean} in %	N	ρ in kg/m^3			$\frac{A_{\text{Netto}}}{A_{\text{Brutto}}}$
			\bar{x}	s	$x_{0,05}$	
Ungeschwächt	8,4	48	714	17,7	652	1,0
Geschwächt	8,4	48	714	17,4	652	0,88 ^{*)}
\bar{x} .. Mittelwert	s .. Standardabweichung			$x_{0,05}$.. 5 %-Quantil		
	*) Bezogen auf den Kerndurchmesser Ø 5,8 mm					

Ein Vorbohren des Buchenholzes ist unerlässlich und schwächt den Querschnitt rechnerisch um ca. 12 %. Die Versuche wurden mit eingebrachten Schrauben durchgeführt. Auf eine lokale Wegmessung mit Hilfe von induktiven Wegaufnehmern wurde verzichtet und lediglich

der Maschinenweg und die Kraft aufgezeichnet. Der Versuchsaufbau ist dem Bild 2-37 zu entnehmen. Ein gleichmäßiger Vorschub von 0,7 mm/min wurde bis zu einem deutlichen Lastabfall in Faserrichtung aufgebracht.

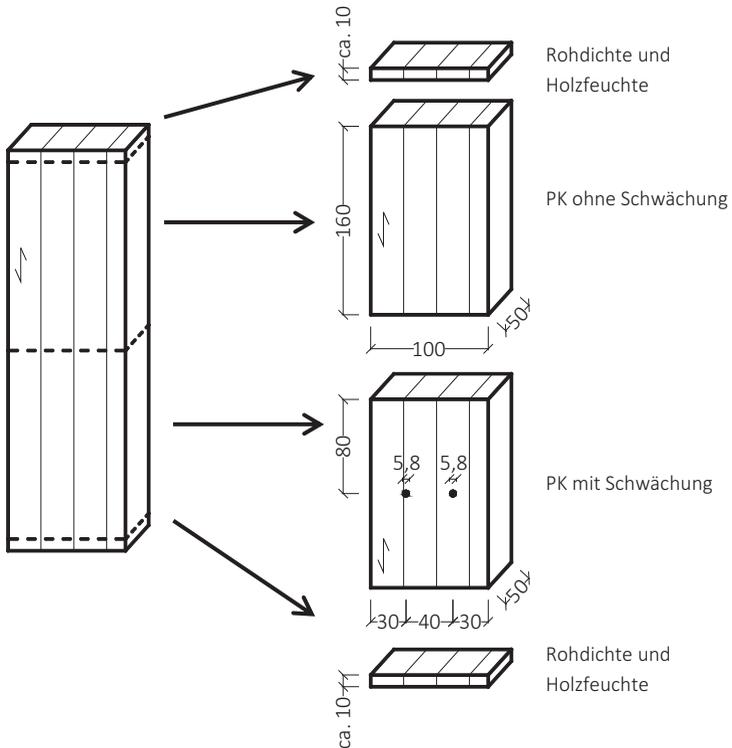


Bild 2-36 Zuschnitt und Abmessungen der Prüfkörper (PK); Maße in mm

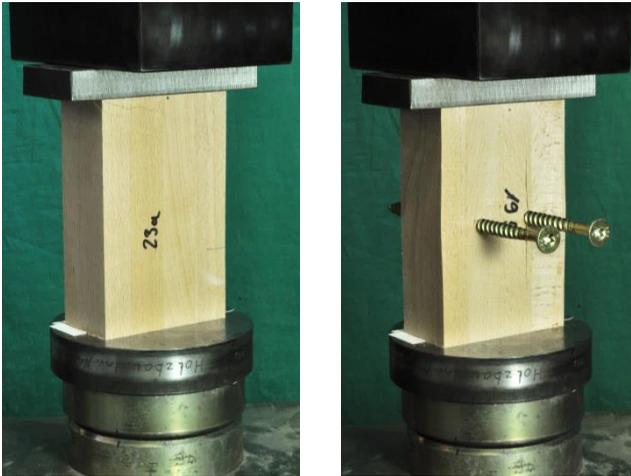


Bild 2-37 Versuchsaufbau ungeschwächter Buchen-BSH-Querschnitt (links) und mit Vollgewindeschraube geschwächter Buchen-BSH-Querschnitt (rechts)

2.4.3 Ergebnisse

2.4.3.1 Globale Schwächung

Das Erreichen der Maximallast ist gekennzeichnet durch das Ausbilden von Druckfalten. Bei den Typen B, C und D lagen diese stets im Bereich der Schwächung. Die typischen Versagensbilder der fünf unterschiedlichen BSH-Querschnitte sind in Bild 2-38 dargestellt. Die Druckfalte verdeutlicht den Bereich der geringsten Tragfähigkeit. Ausgehend von den Verbindungsmitteln wurde in manchen Fällen ein Aufspalten in Faserrichtung beobachtet. In Anlehnung an DIN EN 408 wurden in Faserrichtung der Elastizitätsmodul ($E_{c,0}$), die Druckfestigkeit des Bruttoquerschnitts ($f_{c,Brutto}$) und des Nettoquerschnitts ($f_{c,Netto}$) und die Stauchung (ϵ_0) im Bereich der 320 mm langen Messlänge bestimmt. Die Ergebnisse der sieben Versuchsreihen sind in Tabelle 2-19 zusammengestellt. Die Tabelle gibt sowohl die Mittelwer-

te und Standardabweichungen als auch die charakteristischen Werte in Bezug auf den Brutto- bzw. Nettoquerschnitt an. Ein Vergleich der relativen Druckfestigkeit $f_{c,Brutto,Typ} \times f_{c,Brutto,Typ A}$ mit dem Quotienten der Querschnittsflächen A_{Netto}/A_{Brutto} wird in den letzten beiden Spalten aufgeführt. Das Verfahren nach Grubbs (vgl. DIN 53804-1) zur Ermittlung von Ausreißern darf bei normalverteilten Einzelwerten bei einem Stichprobenumfang $N \geq 30$ herangezogen werden. Die Annahme der Normalverteilung ist für das spröde Material Holz meist nicht zutreffend. Festigkeitswerte nehmen überwiegend eine links schiefe Verteilung ein. Darum wird meist die Verteilung durch ein Weibull-Modell oder eine Log-Normalverteilung beschrieben. Unter Berücksichtigung des duktilen Druckversagens und der vorliegenden Histogramme und Summenlinien der Druckversuche (s. Bild 2-39, Bild A-9 bis Bild A-14) mit BSH soll die Annahme der normalverteilten Einzelwerte für den Ausreißertest ausreichen. Der Kleinstwert des Querschnitts Typ B von $f_{c,Brutto} = 26,8 \text{ N/mm}^2$ wurde auf Grundlage des Ausreißertest nach Grubbs bei dem gewählten Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ eliminiert. Bei genauer Betrachtung des betroffenen Versuchskörpers wird eine mangelhafte Keilzinkenverbindung der mittleren Lamelle (20 % des Gesamtquerschnitts) deutlich, die eine deutlich reduzierte Tragfähigkeit zur Folge hatte. Alle anderen Einzelwerte wurden bei der statistischen Auswertung berücksichtigt. Die Einzelwerte der Druckspannungen im Bruttoquerschnitt und die dazugehörigen linearen Regressionsgeraden sind für die untersuchten Versuchsreihen in Bild 2-40 und Bild 2-41 dargestellt.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass eingeklebte Gewindestangen keine Schwächung darstellen und die identische Bruttodruckfestigkeit aufweisen wie Querschnitte ohne eingebrachte Verbindungsmittel (ungeschwächt). Dies gilt sowohl für die Mittelwerte als auch für die charakteristischen Werte.

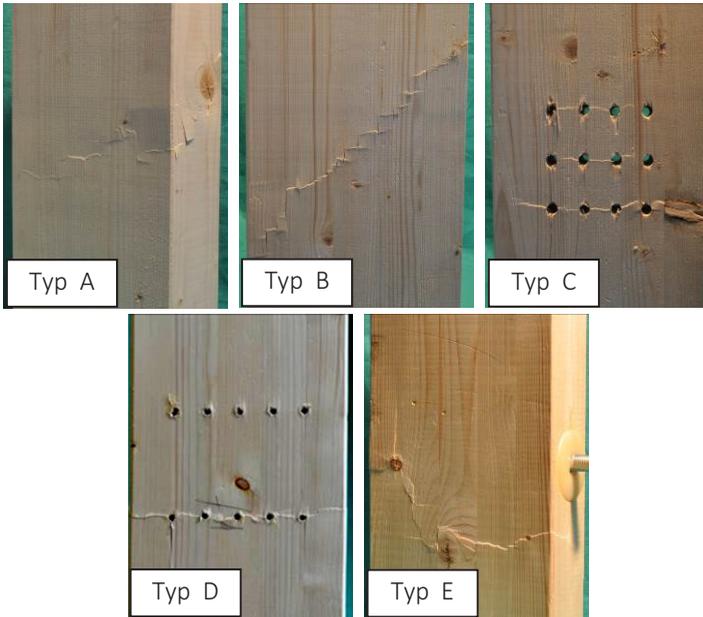


Bild 2-38 Versagensbilder Typ A bis E

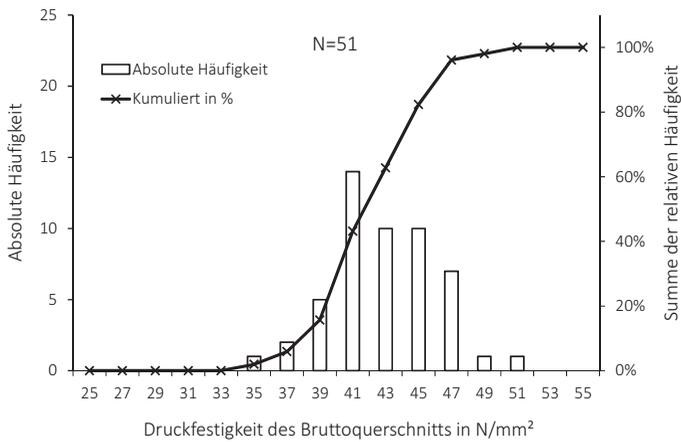


Bild 2-39 Histogramm und Summenlinie für Reihe A1

Tabelle 2-19 Ergebnisse Druckversuche mit Brettschichtholz (GL 24h)

		$E_{c,o}$	$f_{c,Brutto}$	$f_{c,Netto}$	ϵ_0	$\frac{f_{c,Brutto,Typ X}}{f_{c,Brutto,Typ A}}$	$\frac{A_{Netto}}{A_{Brutto}}$
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%		
Typ A1	\bar{x}	13.000		42,1	0,40		
Charge 1	s	1.400		3,3	0,05	1,0	1,0
$N = 51$	$x_{0,05}$	10.700		36,4	0,31		
Typ B	\bar{x}	12.300	33,3	41,8	0,34		
Charge 1	s	1.400	2,0	2,5	0,04	0,79	0,8
$N = 50$	$x_{0,05}$	10.000	30,0	37,4	0,29		
Typ C	\bar{x}	10.800	31,1	43,7	0,41		
Charge 1	s	1.000	1,8	2,6	0,05	0,74	0,71
$N = 49$	$x_{0,05}$	9.200	28,0	39,2	0,35		
Typ A2	\bar{x}	12.900		39,8	0,40		
Charge 2	s	1.200		2,6	0,05	1,0	1,0
$N = 51$	$x_{0,05}$	10.800		35,4	0,32		
Typ D	\bar{x}	12.500	35,8	42,3	0,41		
Charge 2	s	1.200	2,5	3,0	0,05	0,9	0,85
$N = 50$	$x_{0,05}$	10.400	31,5	37,2	0,32		
Typ A3	\bar{x}	12.100		34,7	0,39		
Charge 3	s	1.000		1,9	0,04	1,0	1,0
$N = 49$	$x_{0,05}$	10.400		31,4	-		
Typ E	\bar{x}	11.900	34,7	46,3	0,41		
Charge 3	s	1.200	1,9	2,5	0,06	1,0	0,75
$N = 52$	$x_{0,05}$	9.900	31,4	41,9	-		
N .. Anzahl	\bar{x} .. Mittelwert		s .. Standardabweichung			$x_{0,05}$.. 5%-Quantil	

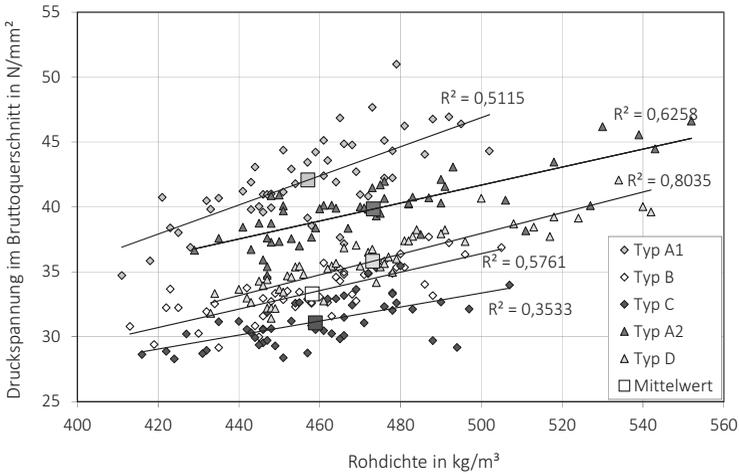


Bild 2-40 Maximale Druckspannung im Bruttoquerschnitt über der mittleren Rohdichte bei ca. 10,2 % (A1, B und C) bzw. 11,5 % Holzfeuchte (A2 und D)

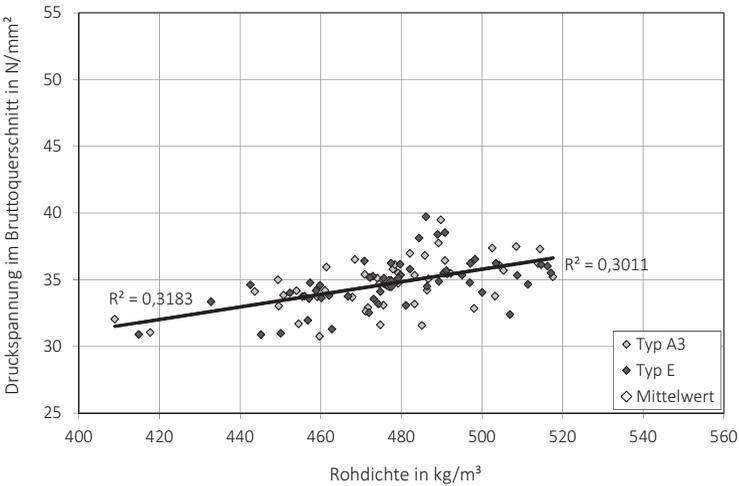


Bild 2-41 Maximale Druckspannung im Bruttoquerschnitt über der mittleren Rohdichte bei ca. 13 % Holzfeuchte (A3 und E)

2.4.3.2 Lokale Schwächung

Der Einfluss der Jahrringlage bzw. Jahrringbreite konnte vernachlässigt werden, da die zu vergleichenden Querschnittstypen im ungeschwächten Bereich den gleichen Querschnitt aufwiesen. Die auf Druck parallel zur Faser geprüften Vollholzprüfkörper bildeten eine Druckfalte in Höhe des Verbindungsmittels aus und spalteten nahezu zeitgleich in Faserrichtung auf (vgl. Bild 2-42). Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Druckfestigkeit $f_{c,Brutto}$ und $f_{c,Netto}$ sowie des Elastizitätsmoduls $E_{c,0}$ sind in Tabelle 2-20 angegeben. Die relative Tragfähigkeit der Querschnittstypen bezogen auf den ungeschwächten Querschnitt und der Quotient der Querschnittsflächen A_{Netto}/A_{Brutto} sind ebenfalls der Tabelle 2-20 zu entnehmen. Die Verformungen der gesamten Prüfkörperlänge zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls wurden



den mithilfe des Maschinenwegs bestimmt.

Die Druckfestigkeit der Prüfkörper mit eingeklebten Stabdübeln (Typ f) mit $f_{c,Netto} = 50,1 \text{ N/mm}^2$ ist höher als der Mittelwert der übrigen Querschnitte ($f_{c,Netto} \approx 45 \text{ N/mm}^2$). Abgesehen davon wurden die Prüfkörpertypen b bis f deutlich geschwächt und die Festigkeit von Vollholz ($f_{c,Brutto,Typ a} = 45,9 \text{ N/mm}^2$) verringert sich aufgrund der eingebrachten Verbindungsmittel, z. B. $f_{c,Brutto,Typ c} = 36,1 \text{ N/mm}^2$.

Bild 2-42 Versagen eines Prüfkörpers mit glattem Stabdübel

Tabelle 2-20 Ergebnisse Druckversuche mit fehlerfreiem Nadelholz

		$E_{c,o}$	$f_{c,Brutto}$	$f_{c,Netto}$	$\frac{f_{c,Brutto,Typ\ x}}{f_{c,Brutto,Typ\ a}}$	$\frac{A_{Netto}}{A_{Brutto}}$
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		
Typ a	\bar{x}	13100	45,9	45,9		
N = 10	s	3200	4,8		1,0	1,0
Typ b	\bar{x}	11900	34,7	43,4		
N = 10	s	3000	3,5		0,76	0,8
Typ c	\bar{x}	12800	36,1	45,1		
N = 10	s	2900	2,9		0,79	0,8
Typ d	\bar{x}	12700	37,2	46,4		
N = 10	s	2700	3,6		0,81	0,8
Typ e	\bar{x}	12800	40,3	45,9		
N = 10	s	2500	3,0		0,88	0,88
Typ f	\bar{x}	12800	40,1	50,1		
N = 10	s	2300	3,7		0,87	0,8

N .. Anzahl \bar{x} .. Mittelwert s .. Standardabweichung

2.4.3.3 Nutzungsklasse 2

Tabelle 2-21 zeigt die wichtigsten Versuchsergebnisse der Druckversuche, um die Tragfähigkeiten eines ungeschwächten Querschnitts in NKL 1 (Typ A-NLK1) mit der Tragfähigkeit in NKL 2 (Typ A-NLK2) zu vergleichen. Zusätzlich werden Druckfestigkeiten von Prüfkörpern mit nicht vorgebohrten Vollgewindeschrauben, die in BSH analog zu Typ D in Kapitel 2.4.2.2 eingebracht wurden, in NKL 2 angegeben.

Tabelle 2-21 Ergebnisse Druckversuche mit BSH (GL 24h) in NKL 1 und 2

		$f_{c,Brutto}$ N/mm ²	u %	$\frac{f_{c,Brutto,Typ\ D-NKL2}}{f_{c,Brutto,Typ\ A-NKL2}}$	$\frac{A_{Netto}}{A_{Brutto}}$
Typ A-NLK1 N = 50	\bar{x}	45,7			
	s	3,1	9,5	–	1,0
	$x_{0,05}$	40,4			
Typ A-NLK2 N = 50	\bar{x}	31,8			
	s	2,1	16,0	–	1,0
	$x_{0,05}$	28,2			
Typ D-NLK2 N = 50	\bar{x}	29,1			
	s	1,8	16,0	0,92	0,85
	$x_{0,05}$	25,9			
N .. Anzahl	\bar{x} .. Mittelwert	s .. Standardabweichung	$x_{0,05}$.. 5%-Quantil		

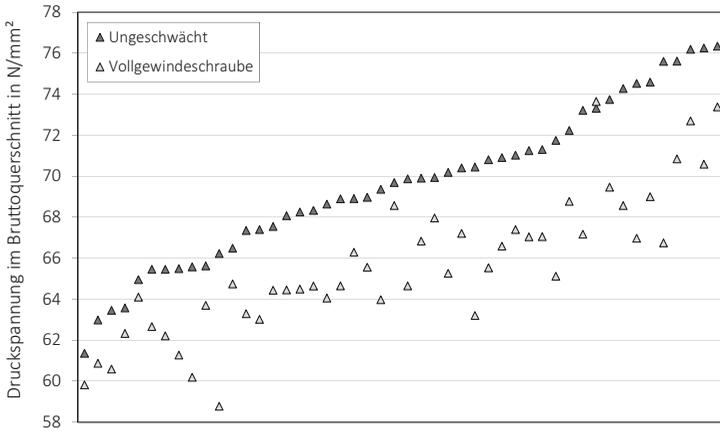
2.4.3.4 Buchen-BSH

Die Tragfähigkeit der ungeschwächten Prüfkörper wurde im Mittel nach 275 Sekunden und die der geschwächten Prüfkörper nach 250 Sekunden erreicht. Typische Versagensbilder (vgl. Bild 2-43) machen deutlich, dass sich analog zu den Versuchen mit Nadelholz die Schädigung der Holzmatrix (Druckfalten) im Bereich der Verbindungsmittel ausbilden und zusätzlich ein Querschnittsgriss entstehen kann. Bei sämtlichen Versuchen der geschwächten Prüfkörper wurde ein Versagen im Bereich der Schrauben lokalisiert. Im Gegensatz dazu war das Versagen der ungeschwächten Prüfkörper zumeist weniger offensichtlich und zufällig über die gesamte Höhe des Prüfkörpers verteilt. Die ermittelten Druckfestigkeiten im Bruttoquerschnitt sind zum einen der Rohdichte und zum anderen dem Elastizitätsmodul gegenübergestellt und in Bild 2-45 und Bild 2-46 veranschaulicht. Die Versuche haben gezeigt, dass nur eine schwache Korrelation ($R^2 = 0,14$ bzw. $R^2 = 0,09$)

zwischen der Druckfestigkeit und der Rohdichte besteht. Im Gegensatz dazu ist die Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom Druckelastizitätsmodul offensichtlich ($R^2 = 0,86$ bzw. $R^2 = 0,84$). Bild 2-44 zeigt, dass lediglich ein Paar der vergleichbaren Prüfkörper die nahezu gleiche Druckfestigkeit aufweist, anderenfalls die Werte des ungeschwächten Querschnitts immer oberhalb derer des geschwächten Prüfkörpers liegen. Die mittlere Tragfähigkeit der mit Vollgewindschrauben versehenen Prüfkörper ist 6 % geringer als die Tragfähigkeit der ungeschwächten Prüfkörper, obwohl vergleichbares Material verwendet wurde.



Bild 2-43 Repräsentative Versagensbilder des ungeschwächten Querschnitts (links) und des geschwächten Querschnitts (rechts) nach dem Entfernen der Schrauben



48 Buchen-BSH-Paare

Bild 2-44 Maximale Druckspannung im Bruttoquerschnitt der Prüfkörperpaare; Sortierung nach Druckfestigkeiten der ungeschwächten Prüfkörper; Buchen-Brettschichtholz

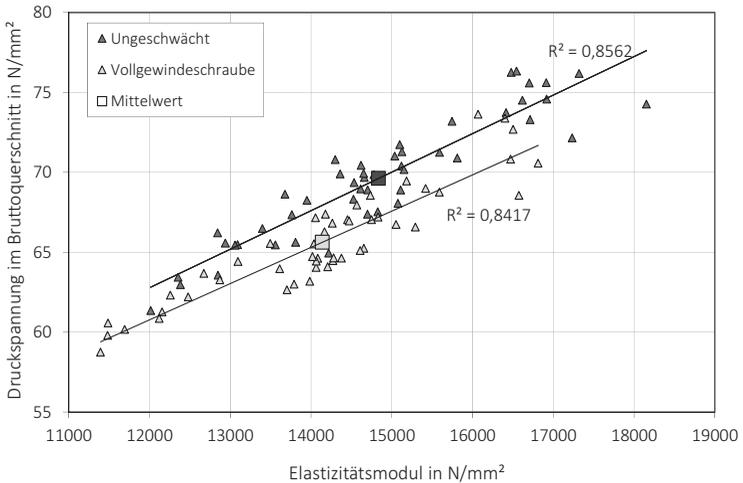


Bild 2-45 Maximale Druckspannung im Bruttoquerschnitt über dem Elastizitätsmodul; Buchen-Brettschichtholz

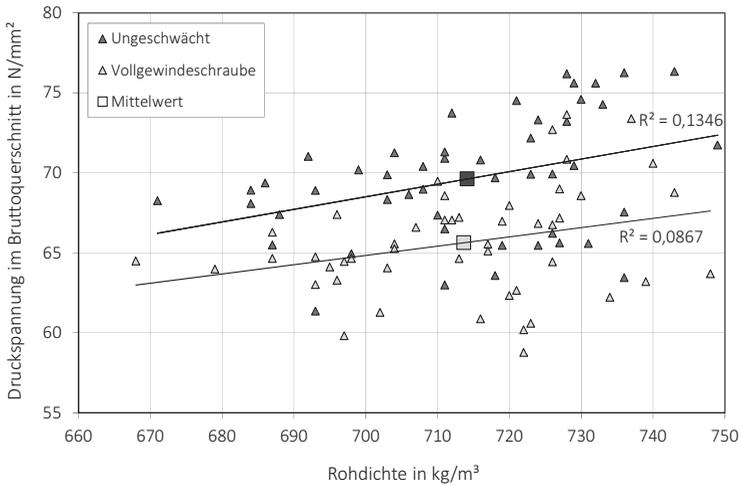


Bild 2-46 Maximale Druckspannung im Bruttoquerschnitt über der Rohdichte bei ca. 8,4 % Holzfeuchte; Buchen-Brettschichtholz

Tabelle 2-22 Ergebnisse Druckversuche mit Buchen-Brettschichtholz

	$E_{c,o}$	$f_{c,Brutto}$	$f_{c,Netto}$	$\frac{f_{c,Brutto,Typ X}}{f_{c,Brutto,Typ A}}$	$\frac{A_{Netto}}{A_{Brutto}}$	
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²			
Ungeschwächt N = 48	\bar{x}	14800	69,6			
	s	1500	3,8	1,0	1,0	
	$x_{0,05}$	12400	63,0			
Geschwächt VG-Schraube N = 48	\bar{x}	14100	65,6	74,2		
	s	1400	3,4	3,9	0,94	0,88
	$x_{0,05}$	11800	59,7	67,5		
N .. Anzahl	\bar{x} .. Mittelwert	s .. Standardabweichung	$x_{0,05}$.. 5%-Quantil			

Die Ergebnisse der Druckversuche in Faserrichtung des Buchen-BSH sind in Tabelle 2-22 angegeben. Neben dem Mittelwert ist der Tabelle auch die Standardabweichung und der nach DIN EN 14358 ermittelte charakteristische Wert zu entnehmen. Die relative Druckfestigkeit von 0,94 der geschwächten Prüfkörper im Bezug zum ungeschwächten Querschnitt ist geringfügig höher als die relative Schwächung ($A_{Netto} / A_{Brutto} = 0,88$). Die rechnerische Schwächung der Festigkeit entspricht in etwa der Hälfte der Querschnittsschwächung.

Die Bestimmung der Steifigkeit des Holzes K_{Holz} ist durch den Verzicht auf die Wegaufnehmer nicht ohne Weiteres möglich. Für eine rechnerische Bestimmung des Elastizitätsmoduls des Buchen-BSH wurde folgende Beziehung genutzt:

$$\frac{1}{K_{Gesamt}} = \frac{1}{K_{Holz}} + \frac{1}{K_{Kalibrierung}} - \frac{1}{K_{Stahl}} \quad (24)$$

$$\rightarrow K_{Holz} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{Gesamt}} - \frac{1}{K_{Kalibrierung}} + \frac{1}{K_{Stahl}} \right)} \quad (25)$$

Die in den Druckversuchen ermittelte Gesamtsteifigkeit K_{Gesamt} wurde in einem Bereich von 150 bis 200 kN (entspricht einer Druckspannung im Bruttoquerschnitt von 30 bis 40 N/mm²) aus dem Last-Verformungs-Verhalten der Prüfmaschinendaten herausgelesen. Zudem wurde eine Kalibriermessung des Versuchsaufbaus durchgeführt, bei welcher der Holzquerschnitt durch einen Stahlzylinder ausgetauscht und ebenfalls die Steifigkeit $K_{Kalibrierung}$ ermittelt wurde. Die im Vorfeld bekannte Steifigkeit des Stahls K_{Stahl} spielt eine verschwindend geringe Rolle, wird aber in der Auswertung und Bestimmung von K_{Holz} nach Gleichung (25) und der Umrechnung zum Elastizitätsmodul in Faserrichtung $E_{c,o}$ berücksichtigt.

2.4.4 Diskussion

Eine Tragfähigkeitsminderung durch eine Querschnittsschwächung im Druckbereich ist trotz des Ausfüllens der Löcher mit den Verbindungsmitteln deutlich erkennbar. Obwohl für die verschiedenen Querschnittstypen sehr ähnliches Material verwendet wurde und die eingebrachten Verbindungsmittel höhere Steifigkeiten als die umgebende Holzmatrix aufwiesen, sind signifikante Unterschiede der maximal aufnehmbaren Druckspannungen zwischen den Typen A, B, C, D und E festzustellen. Der Vergleich (Bild 2-40) zwischen den mittleren Maximalspannungen zeigt, dass die Werte des für die Gewindestange vorgebohrten Querschnitts (Typ B) nur 79 % der mittleren Maximaldruckspannungen des ungeschwächten Querschnitts (Typ A1) betragen. Die Prüfkörper mit Schlitzblech und Bohrungen (Typ C) zeigen eine noch niedrigere Tragfähigkeit (74 % des ungeschwächten Querschnitts). Dass selbst Verbindungsmittel in nicht vorgebohrten Hölzern (Typ D) eine signifikante Tragfähigkeitsminderung bewirken, veranschaulichen die Versuche des Typs D mit eingebrachten Schrauben. Die Tragfähigkeiten der Prüfkörper des Typs D liegen im Mittel 10 % unterhalb der Traglasten der ungeschwächten Prüfkörper aus Charge 2 (Typ A2), obwohl der durch den Kerndurchmesser um 15 % geschwächte Querschnitt nicht vorgebohrt und ohne Fehlstellen mit einem steiferen Material satt ausgefüllt wurde. Diese Ergebnisse machen deutlich, dass die modellhafte Vorstellung, steife und satt ausfüllende Materialien können Querschnittsschwächungen unschädlich überbrücken, nicht das wirkliche Tragverhalten widerspiegelt. Dementsprechend deutet der Vergleich der relativen Tragfähigkeit (79 %, 74 % und 90 %) mit dem relativen Nettoquerschnitt (80 %, 71 % und 85 %) darauf hin, dass auch im Druckbereich ein Spannungsnachweis mit der Nettoquerschnittsfläche eher zutreffend ist (s. Bild 2-47). Die Verbindung mit eingeklebter Gewindestange stellt eine Ausnahme dar, vgl. Bild 2-41. Trotz einer theoretischen Schwächung des Querschnitts von ca. 25 % ist keine Tragfähigkeitseinbuße zu verzeichnen.

Die Versagensbilder der Versuche mit den Querschnittstypen b bis f zeigen, dass selbst bei einzelnen rauen, eingeklebten oder selbstbohrenden Verbindungsmitteln signifikante Längsspannungsspitzen entstehen, welche Tragfähigkeitsverluste verursachen. Die relativen mittleren Tragfähigkeiten (die Tragfähigkeit des ungeschwächten Prüfkörpers wird zu 1,0 angenommen) der zehn untersuchten Latten sind in Bild 2-48 dargestellt. Hierbei wurde eine lineare Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Rohdichte zugrunde gelegt, sodass Rohdichteschwankungen innerhalb einer Latte rechnerisch berücksichtigt und die Werte der Querschnittstypen b bis f an den ungeschwächten Querschnitt angepasst wurden. Aus Bild 2-48 wird eine deutliche Querschnittsschwächung von fehlerfreiem Vollholz beim Einbringen von einem Verbindungsmittel ersichtlich, da die mittleren Tragfähigkeiten der Versuchsreihen b bis f 14 bis 24 % unterhalb der Tragfähigkeit des ungeschwächten Prüfkörpers liegen. Neben dem Ausbilden einer Druckfalte in Höhe der Verbindungsmittelachse wurde bei zunehmender Verformung ein Aufspalten beobachtet.

Theoretische und experimentelle Arbeiten (Rodd 1973; Sjödin et al. 2008) haben gezeigt, dass die Lochleibungsfestigkeit bei Stabdübeln mit rauerer Oberfläche deutlich ansteigt und somit die Tragfähigkeit von Stabdübel-Verbindungen ebenfalls zunimmt. Dieser Effekt kann bei Druckbeanspruchung parallel zur Faser ebenfalls beobachtet werden. Eine raue Oberfläche wirkt sich, im Gegensatz zur glatten Oberfläche, günstig auf die Tragfähigkeit aus, ist jedoch nicht signifikant. Selbst bei eingeklebten glatten Stabdübeln (Typ f) stellt sich eine Abnahme der Gesamttragfähigkeit ein. Das Einbringen der Vollgewindeschraube schwächt rechnerisch den Querschnitt weniger als ein Stabdübel. Obwohl hier das Holz nicht vorgebohrt wird, liegen die Festigkeitswerte im Bruttoquerschnitt im Mittel 12 % unterhalb der mittleren Festigkeitswerte des ungeschwächten Querschnitts.

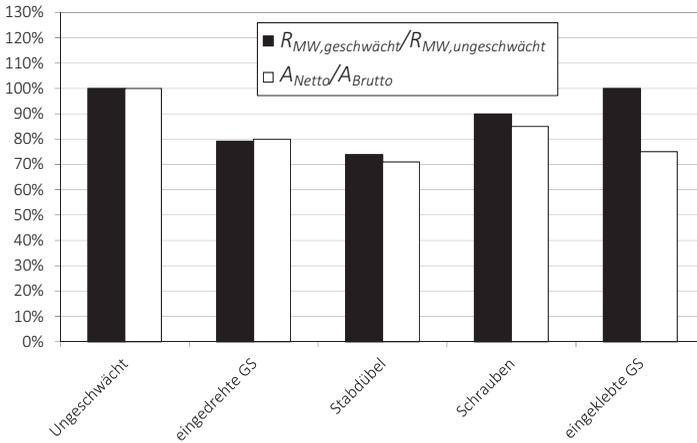


Bild 2-47 Relative Tragfähigkeit der BSH-Querschnitte bezogen auf den ungeschwächten Querschnitt (Typ A bis E)

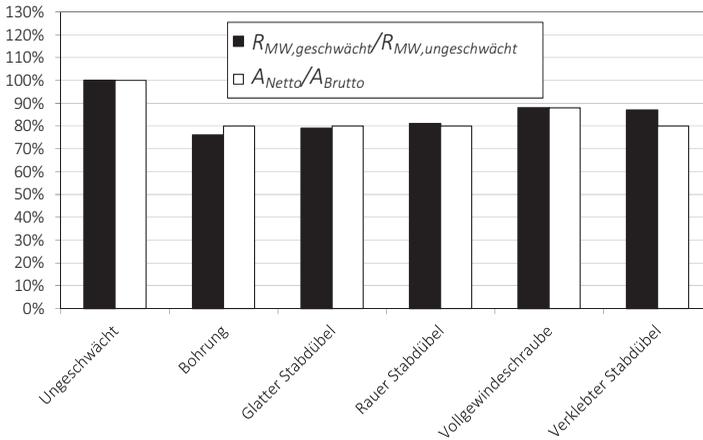


Bild 2-48 Tragfähigkeit der VH-Querschnittstypen bezogen auf den ungeschwächten Querschnitt (Typ a bis f)

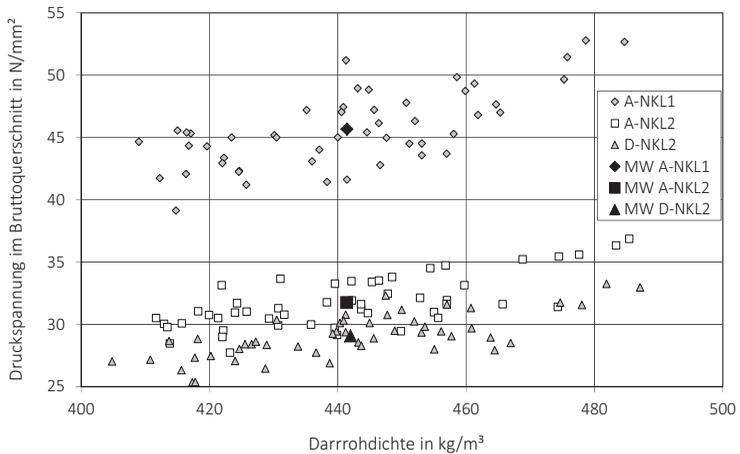


Bild 2-49 *Maximale Druckspannung im Bruttoquerschnitt bezogen auf die mittlere Darrrohdichte; Holzfeuchten von 9,5 % (Typ A-NKL1) und 16 % (Typ A-NKL2 und D-NKL2)*

Die Versuche mit Prüfkörpern einer niedrigen (9,5 %) und einer hohen (16,0 %) Holzfeuchte haben die Annahme einer signifikanten Korrelation zwischen Holzfeuchte und Druckfestigkeit bestätigt (vgl. Bild 2-49). Die Ergebnisse zeigen ebenfalls den Einfluss von selbstbohrenden Holzschrauben im druckbeanspruchten Bereich von BSH in NKL 2. Die mittlere Tragfähigkeit des Typs D-NKL2 ist ungefähr 8 bis 9 % niedriger als die Tragfähigkeit von Prüfkörpern ohne Verbindungsmittel (Typ A-NKL2).

Auch für das untersuchte Buchen-BSH ist ein deutlicher Einfluss der Verbindungsmittel auf die Bruttodruckfestigkeit festzustellen. Die Schwächung der Festigkeit (6 %) ist zwar nicht in dem Maße ausgeprägt, wie die Querschnittsschwächung (12 %), allerdings ist auch hier eine Berücksichtigung der Verbindungsmittel im druckbeanspruchten Bereich erforderlich.

2.4.5 FE-Simulation des druckbeanspruchten Bereichs

Im Folgenden werden Ergebnisse einer numerischen Simulation der druckbeanspruchten Bereiche in der Umgebung eines Verbindungsmittels gezeigt. Drei Sachverhalte werden besonders untersucht:

- I. Spannungen parallel zur Faser im Bereich des modellierten Verbindungsmittels
- II. Spannungen rechtwinklig zur Faser direkt ober- und unterhalb des Verbindungsmittels
- III. Einfluss der Oberflächenrauigkeit der Verbindungsmittel auf die Spannungsverteilung

Ein Finite Elemente Modell (ANSYS[®], Version 13.0) soll die in den experimentellen Untersuchungen auftretenden Versagensmechanismen veranschaulichen und erklären. Die Größe des simulierten Prüfkörpers zur Untersuchung der Bereiche I und II entspricht den Dimensionen der BSH-Bauteile in Kapitel 2.4.2.2. Die Positionen der zehn zylindrisch modellierten Verbindungsmittel (Stabdübel) sind identisch mit den Positionen der Schrauben des Typs D. Der dritte Sachverhalt der obigen Aufzählung soll an den fehlerfreien Vollholzprüfkörpern nach Kapitel 2.4.2.3 veranschaulicht werden. Hierfür wurde der Prüfkörper mit einer Höhe von 120 mm und einer Breite von 50 mm modelliert, vgl. Bild 2-50. Die verwendeten *Plane183*-Elemente (6-Knoten Scheibenelement) bilden einen ebenen Spannungszustand mit einer Dicke $z = 80$ bzw. 30 mm ab. Die untere Kante wurde gegen eine Verschiebung in y -Richtung, die untere linke Ecke auch in x -Richtung gehalten. Dem Material wurde ein ideal linearelastisch-plastisches Materialverhalten zugewiesen. Diese Annahme weicht von den empirisch ermittelten Kraft-Verschiebungs-Kurven geringfügig ab, welche meist eine geringe Abnahme der Last nach Erreichen der Höchstlast aufweisen, allerdings wird diese Vereinfachung bei der FE-Modellierung von Holz bei Druckbeanspruchung häufig verwendet (vgl. Frese et al. 2011). Die Belastung wurde mithilfe einer konstanten

Verschiebung $\Delta \ell$ der oberen Kante in y -Richtung aufgebracht. Zwischen der Holzmatrix und dem Verbindungsmittel wurden Kontaktelemente angeordnet, welchen ein variabler Reibbeiwert μ_0 zugewiesen wurde.

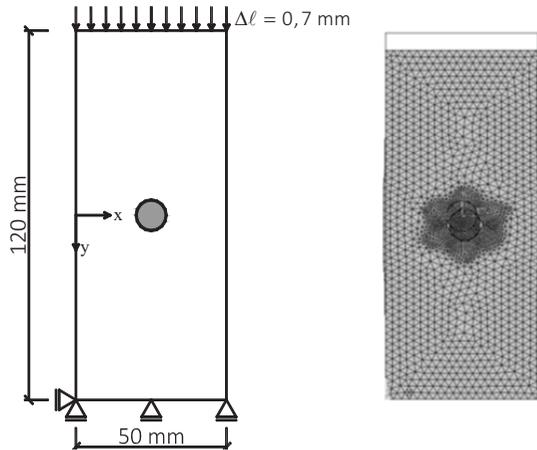


Bild 2-50 Schematische Darstellung des FE-Modells (links) und der Verformungsfigur nach Lastaufbringung (rechts)

Die Reibbeiwerte betragen nach Rodd (1973) $\mu_0 = 0,339$ für glatte Stabdübel und $\mu_0 = 0,585$ für raue Stabdübel. Rodd untersuchte den Einfluss der Rauigkeit bei abscherender Beanspruchung. Abweichend davon wählte Sjödin (2008) in seinem FE-Modell die Reibbeiwerte 0,1 und 0,4. Diese wurden hier ebenfalls verwendet und verdeutlichen das unterschiedliche Verhalten von glatten und rauen Verbindungsmitteln. Bei glatten Stabdübeln ($\mu_0 = 0,1$) treten die größten Querspannungen σ_x mittig direkt ober- und unterhalb des Verbindungsmittels auf und bewirken ein Quersugsversagen (s. Bild 2-51). Im Gegensatz dazu wurden bei den Versuchen mit den rauen Stabdübeln ($\mu_0 = 0,4$) leicht von der Mittelachse versetzte Risse beobachtet (vgl. Sjödin et al. 2006), die offensichtlich von einer Kombination von Schub- und Quersugs Spannungen verursacht werden. Diese Vermutung

wird durch die Simulationsergebnisse bestärkt und macht die Relevanz der Reibung auch bei Druckbeanspruchung im Holz deutlich. Die aus dem Holz zu übertragenden Längsspannungen σ_y werden im mittleren Verbindungsmittelbereich durch Reibung in den Stabdübel weitergeleitet. Die restlichen Längskräfte müssen seitlich über die Holzstruktur übertragen werden, wodurch die Querkzug- und Schubspannungen (Spreizkraft) entstehen. Zusätzlich führt dies zu einer Konzentration der Längsdruckspannung in Höhe der Verbindungsmittelachse bei $y = 0$ direkt neben der Schwächung (vgl. Bild 2-51). Auch wenn Unterschiede der Spannungsverteilungen in Bild 2-51 ausgemacht werden können, zeigt die Betrachtung unterschiedlicher Reibkoeffizienten, dass die Oberflächenrauigkeit von gängigen mechanischen Verbindungsmitteln keinen signifikanten Einfluss auf die Druckfestigkeit parallel zur Faser hat. Die Druckfestigkeit im kritischen Bereich (Stelle der minimalen Längsspannung $\sigma_{y,min}$) wird sowohl bei glatten als auch bei rauen Stabdübeln frühzeitig erreicht. Das FE-Modell einer Verbindung mit mehreren zylindrischen Verbindungsmitteln des Durchmessers $d = 10$ mm (mit Stabdübeln vergleichbar) wurde mit einem Reibkoeffizient von $\mu_0 = 0,4$ generiert. Bild 2-52 (rechts) zeigt die Spannungsverteilung rechtwinklig und Bild 2-53 parallel zur Faser im Bereich des Verbindungsmittels am linken Rand im Hinblick auf mehrere Lastschritte bis zu einer Maximalstauchung von $\epsilon_0 = 0,31$ % in Faserrichtung. Die Definition der Pfade x_1 und x_2 ist dem Bild 2-52 (links) zu entnehmen. Es wird deutlich, dass die Ergebnisse der simulierten Stabdübelverbindung auf das typische Druckversagen eines Prüfkörpers mit Vollgewindeschrauben (Typ D) übertragen und miteinander verglichen werden können (vgl. Bild 2-52, links). Die Spannungscurven in Bild 2-52 (rechts) zeigen die Gefahr des Aufspaltens ober- und unterhalb des Verbindungsmittels aufgrund der hohen Querkzugspannungen. Das Ergebnis dieser Spannungen ist ein Riss parallel zur Faser, wie in Bild 2-52 (links) zu sehen. Das numerische Modell verdeutlicht die Spannungsspitzen parallel zur Faser im Bereich des Verbindungsmittels, sogar bei einer geringen Stauchung des

Holzes. Diese schon bei kleinen Verformungen auftretenden Spannungsspitzen am Rand zum Verbindungsmittel haben plastische Verformungen zur Folge. Das numerische Modell bestätigt die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen und macht eine nicht vernachlässigbare Schwächung des Querschnitts durch das Einbringen von Verbindungsmitteln deutlich.

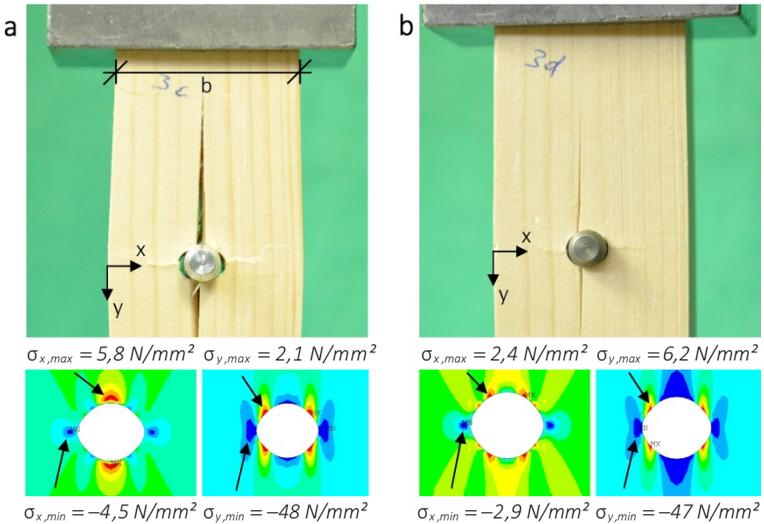


Bild 2-51 Typische Versagensarten und Spannungsverteilungen bei $\Delta\ell = 0,4 \text{ mm}$ im Verbindungsmittelbereich eines glatten (a) und eines rauhen (b) Stabdübels

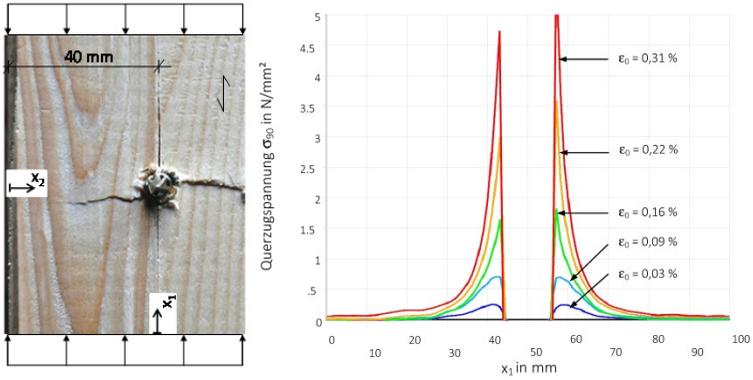


Bild 2-52 Typisches Versagensbild des Typs D und Definition der Pfade x_1 und x_2 (links) und Querspannungsverteilung im Bereich des rauen Stabdübels am linken Rand über den Weg x_1 (rechts)

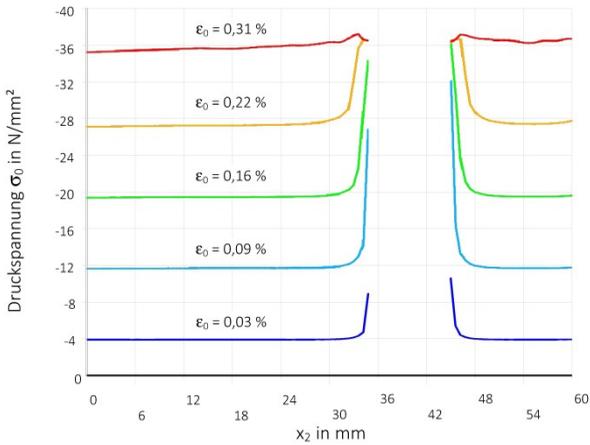


Bild 2-53 Druckspannungsverteilung parallel zur Faser im Bereich des rauen Stabdübels am linken Rand über den Weg x_2

2.4.6 Zusammenfassung

Bei Spannungsnachweisen für tragende Holzbauteile sind nach aktuellen Bemessungsregeln Querschnittsschwächungen in druckbeanspruchten Bauteilen nur dann rechnerisch zu berücksichtigen, wenn die Querschnittsschwächung nicht satt oder nicht dauerhaft mit einem Werkstoff ausgefüllt ist, der eine mindestens so große Steifigkeit aufweist wie das geschwächte Bauteil (u. a. Blaß et al. 2005b). Diese schon seit Jahrzehnten geltende Regel beruht auf der Annahme, dass der Kraftfluss durch eingebrachte Verbindungsmittel nicht signifikant gestört wird. Die dargestellten Ergebnisse stehen im Widerspruch zu dieser Annahme und erfordern die Berücksichtigung einer Querschnittsschwächung auch bei einer Druckbeanspruchung parallel zur Faser. Die Ergebnisse der FE-Simulationen bestätigen diese Annahme und verdeutlichen die Spannungsspitzen im Bereich der Verbindungsmittel, die mit den beobachteten Versagensbildern der experimentellen Untersuchungen übereinstimmen. Somit wird vorgeschlagen, bei Druckspannungsnachweisen für Tragwerke des Ingenieurholzbaus grundsätzlich den Nettoquerschnitt zugrunde zu legen. Diese Regelung gilt sowohl für niedrige Holzfeuchten in NKL 1 als auch für höhere Holzfeuchten in NKL 2. Dass die Vernachlässigung dieses Einflusses der Querschnittsschwächung noch nicht zu Schäden in bestehenden Bauwerken geführt hat, liegt u. a. an den niedrigen Rechenwerten der charakteristischen Druckfestigkeit von Brettschichtholz in Nutzungsklasse 1. Der Wert für das hier verwendete Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL 24h wird in DIN 1052:2008 mit $f_{c,0,k} = 24 \text{ N/mm}^2$ angegeben und scheint im Hinblick auf die in den Versuchen ermittelten charakteristischen Nettodruckfestigkeiten ($f_{c,Netto,k} \approx 36 \text{ N/mm}^2$) in Tabelle 2-19 sehr konservativ zu sein. Dies wird durch die Ergebnisse von Frese et al. (2012) bestätigt, welche zeigen, dass eine 50 % höhere charakteristische Druckfestigkeit zu erwarten ist, wenn die Ausgleichsfeuchte des Bauteils in Nutzungsklasse 1 den Wert $u = 12 \%$ nicht übersteigt. Festzuhalten ist, dass

sowohl globale als auch lokale Schwächungen zu einer Abnahme der Drucktragfähigkeit führen und bei der Bemessung zu berücksichtigen sind. Bei höheren Holzfeuchten ($u \geq 20\%$) stehen dem Tragwerksplaner die Reserven der niedrig angesetzten Festigkeitswerte nicht mehr zur Verfügung und machen eine Berücksichtigung der eingebrachten Verbindungsmittel im Druckbereich erforderlich. Die charakteristische Druckfestigkeit bei 16 % Holzfeuchte wurde im Rahmen der Forschungsarbeit zu $f_{c,Brutto,k} = 28,2 \text{ N/mm}^2$ ermittelt und bestätigt die starke Korrelation der Holzfeuchte mit der Druckfestigkeit beim BSH aus Nadelholz. Somit wird aber auch eine genauere Betrachtung der zu erwartenden Holzfeuchte beim Druckspannungsnachweis wirtschaftlich interessant. Die hier dargestellten Ergebnisse wie auch diejenigen von Frese et al. (2012) erfordern eine Berücksichtigung von Querschnittsschwächungen und der zu erwartenden Ausgleichsfeuchte bei Druckbeanspruchungen in Faserrichtung, um eine zugleich wirtschaftliche und realitätsnahe Bemessung zu ermöglichen. Dadurch könnten in Nutzungsklasse 1 deutlich höhere Werte der charakteristischen Druckfestigkeit angesetzt werden, im Gegenzug muss allerdings der Spannungsnachweis mit dem Nettoquerschnitt geführt werden. Im Gegensatz dazu haben die durchgeführten Untersuchungen mit eingeklebten Gewindestangen gezeigt, dass bei solchen die Tragfähigkeit nicht reduziert wird und mit keiner Schwächung im Druckbereich gerechnet werden muss.

2.5 Querschnittsschwächung im Zugbereich

2.5.1 Allgemeines

Nach den für den Holzbau gültigen Normen sind Querschnittsschwächungen beim Tragfähigkeitsnachweis der Bauteile in den meisten Anwendungsfällen zu berücksichtigen. Gerade in zugbeanspruchten Querschnitten kann diese Berücksichtigung eine deutliche Tragfähigkeitsminderung gegenüber der Betrachtung der Tragfähigkeit im Bruttoquerschnitt zur Folge haben. Wie in Kapitel 2.4.1 beschrieben, haben Versuche von Egner und Kolb (1955) diese Annahme bestätigt. Analog zu den durchgeführten Druckversuchen im vorangegangenen Kapitel, wurden ebenfalls Querschnittsschwächungen im Zugstab durch Zugversuche an Brettschichtholzbauteilen der Festigkeitsklasse GL 24h genauer untersucht.

2.5.2 Material und Methode

Insgesamt wurden 96 Zugversuche mit BSH des Querschnitts $H/B = 200 \text{ mm}/80 \text{ mm}$ durchgeführt. Die verwendeten Prüfkörper hatten die gleichen Querschnitte und Schwächungen wie die Druckprüfkörpertypen A, B und C in Abschnitt 2.4.2.2. Lediglich die Prüfkörperlänge von insgesamt 3,8 m weicht von den Maßen der Druckversuche ab, da ein ausreichend großer Lasteinleitungsbereich zur Verfügung stehen musste. Nach der zu berücksichtigenden Prüfvorschrift nach DIN EN 408 muss „der Prüfkörper [...] genügend lang sein, damit eine ausreichend weit von den Einspannbacken entfernte Prüflänge von mindestens dem 9fachen des größeren Querschnittsmaßes eingehalten werden kann“. Dementsprechend muss die freie Prüflänge zwischen den Einspannbacken $9 \cdot 200 \text{ mm} = 1800 \text{ mm}$ lang sein. Die untersuchten Querschnittstypen sind in Bild 2-54 dargestellt. Da der Einfluss von tatsächlich eingebrachten Verbindungsmitteln bei einer Zugbeanspruchung vernachlässigbar ist, wurde auf diese verzichtet.

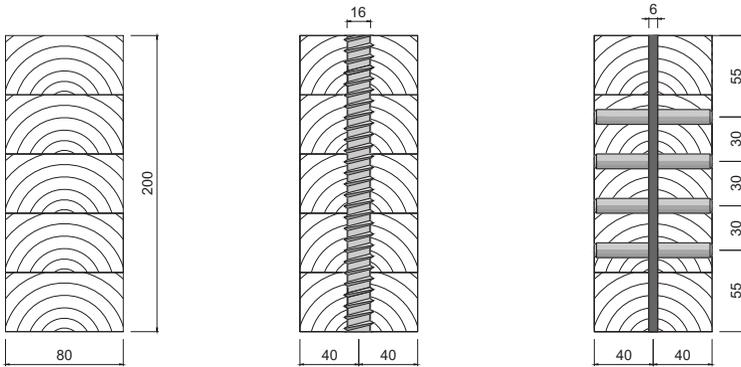


Bild 2-54 Projizierte Querschnitte Typ A, B und C mit Bemaßung in mm

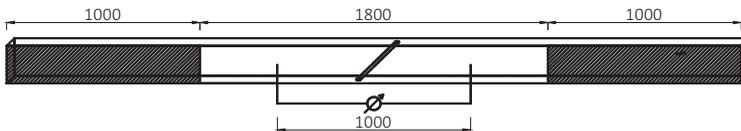


Bild 2-55 Zugprüfkörper (Typ B) mit 2 x 1000 mm Verankerungslänge; Maße in mm

Die Bestimmung der Holzeigenschaften der Zugprüfkörper wurde vor dem Bohren und Schlitzten vorgenommen, sodass anhand der Rohdichte- und Elastizitätsmodulwerte eine Einteilung der Prüfkörper in Gruppen (Typ A, Typ B und Typ C) vorgenommen werden konnte. Da die Zugfestigkeit mit dem Elastizitätsmodul positiv korreliert, wurde dieser durch eine dynamische Längsschwingungsmessung bestimmt und anschließend die Prüfkörper anhand dieser Werte, analog zu den Druckprüfkörpern, in die drei Querschnittsgruppen eingeteilt und abgebunden. Die Verteilung des Elastizitätsmoduls der Zugprüfkörper ist in Bild 2-56 dargestellt. Durch diese Einteilung ist eine große Spanne der vorhandenen Elastizitätsmodulwerte für jede Reihe gewährleis-

tet und die Versuchsreihen sind untereinander vergleichbar. Die mittlere Rohdichte der Prüfkörper bei einer mittleren Holzfeuchte von 10,6 % lag bei 463 kg/m^3 .

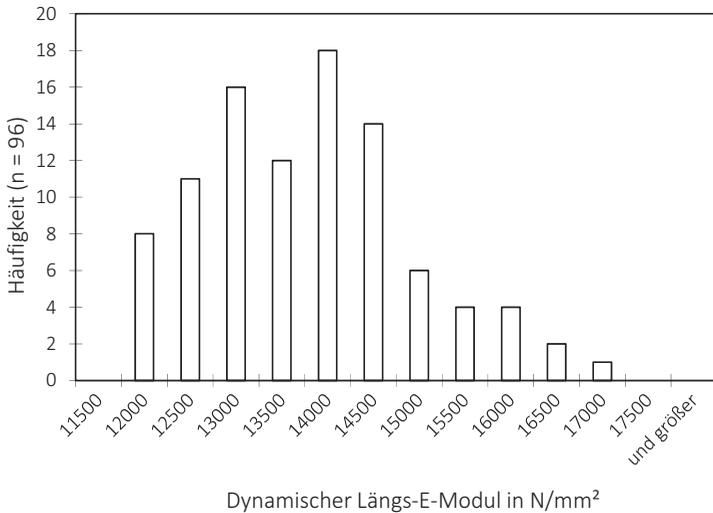


Bild 2-56 Verteilung des Elastizitätsmodul der Zugprüfkörper ($\bar{x} = 13540 \text{ N/mm}^2$ und $s = 1168 \text{ N/mm}^2$)

In Kooperation mit der Holzforschung München wurden je Versuchskonfiguration 32 Zugversuche in Anlehnung an DIN EN 408 durchgeführt. Die Relativverschiebung in einem Bereich von $5 \cdot H = 1000 \text{ mm}$ wurde mit induktiven Wegaufnehmern gemessen und zur Bestimmung des lokalen Elastizitätsmodul und der Dehnung verwendet. Der schematische Versuchsaufbau mit schraffierten Verankerungsflächen ist dem Bild 2-55 zu entnehmen. Die Tragfähigkeit wurde im Mittel nach 330 Sekunden erreicht. Die Brettschichtholzversuchskörper der Festigkeitsklasse GL 24h ohne eingebrachte Verbindungsmittel wurden mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit bis zum Versagen belastet.

2.5.3 Ergebnisse

Das Versagen wurde meistens durch einen Spröbruch der Randlamelle in einem Bereich mit offensichtlicher Faserabweichung (meist durch einen Ast verursacht) ausgelöst. Der Rissanfang variierte über die gesamte freie Prüfkörperlänge und breitete sich über den kompletten Querschnitt aus. Der Risseintritt verhinderte eine weitere Laststeigerung und führte zu einem schlagartigen Lastabfall. Wie in Bild 2-57 gezeigt, tritt das Versagen nicht nur in der geschwächten Zone auf, sondern kann sowohl im durch Bohrung/Schlitzung geschwächten Bereich als auch im ungeschwächten Querschnitt beobachtet werden. Ein Prüfkörper der Reihe Typ B wurde aufgrund eines falschen Abbunds aus der Wertemenge eliminiert und bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

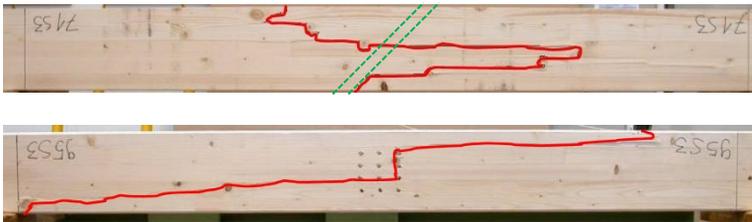


Bild 2-57 Versagensbild des Typs B (oben) und des Typs C (unten)

In Anlehnung an DIN EN 408 wurden die 95 Zugversuche ausgewertet und die Ergebnisse in Tabelle 2-23 dargestellt. Neben dem ermittelten Elastizitätsmodul in Faserrichtung ($E_{t,0}$) ist die Bruttozugfestigkeit sowie die Nettozugfestigkeit in N/mm^2 im geschwächten Querschnitt angegeben. Analog zu den Druckprüfkörpern in Kapitel 2.4 liegt auch hier die Querschnittsschwächung der um 45° geneigten Bohrung in der Projektionsfläche bei ca. 20 % und beim geschlitzten Bauteil mit Stabdübelbohrungen bei 29 %. Eine leichte Tragfähigkeitsminderung durch die Querschnittsschwächung ist zu erkennen. Der Mittelwert der Zugfestigkeit des Typs B liegt mit $25,6 \text{ N/mm}^2$ 11 % und der Wert

des Typs C mit 24,9 N/mm² ca. 14 % unterhalb des Wertes des ungeschwächten Querschnitts (Typ A).

Tabelle 2-23 Ergebnisse Zugversuche mit Brettschichtholz (GL 24h)

		$E_{t,o}$	$f_{t,Brutto}$	$f_{t,Netto}$	$\frac{f_{t,Brutto,Typ X}}{f_{t,Brutto,Typ A}}$	$\frac{A_{Netto}}{A_{Brutto}}$
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		
Typ A N = 32	\bar{x}	13.000		28,9		
	s	1.400		4,4	1,0	1,0
	$x_{0,05}$	10.700		21,7		
Typ B N = 31	\bar{x}	12.300	25,6	32,0		
	s	1.400	4,6	5,7	0,89	0,8
	$x_{0,05}$	10.000	18,1	22,6		
Typ C N = 32	\bar{x}	10.800	24,9	35,0		
	s	1.000	4,5	6,3	0,86	0,71
	$x_{0,05}$	9.200	17,2	24,1		
N .. Anzahl	\bar{x} .. Mittelwert		s .. Standardabweichung		$x_{0,05}$.. 5%-Quantil	

2.5.4 Diskussion

Die Betrachtung der Zugfestigkeit im Bruttoquerschnitt $f_{t,Brutto}$ in Tabelle 2-23 und Bild 2-58 bestätigt die Korrelation der Zugfestigkeit mit dem ermittelten E-Modul nach DIN EN 408. Auffällig sind die relativ großen Streuungen und die entsprechenden Standardabweichungen von ca. 4,5 N/mm². Im Gegensatz zur Druckbeanspruchbarkeit nimmt die Zugfestigkeit bei Fehlern (meist Faserabweichungen durch Äste) überproportional stark ab und bewirkt ein frühzeitiges Versagen der Versuchskörper. Nach Neuhaus (2011) ist die Druckfestigkeit f_c von Hölzern weniger stark vom Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung abhängig als die Zugfestigkeit f_t . Des Weiteren ist die Zugfestigkeit signifikant vom beanspruchten Holzvolumen abhängig.

Die Bemessung von zugbeanspruchten Bauteilen mit einer Querschnittsschwächung wird im Ingenieurholzbau durch einen Spannungsnachweis im Nettoquerschnitt vorgenommen. Somit werden sowohl bei den Nachweisen der Tragfähigkeit als auch der Gebrauchstauglichkeit Schwächungen berücksichtigt, auch wenn die entstandenen Fehlfächen komplett mit einem Verbindungsmittel ausgefüllt sind. Bei der Betrachtung der Nettozugspannungen im Rahmen dieses Versuchsprogramms wird deutlich, dass die Spannungen im geschwächten Querschnitt (Typ B und C) deutlich über den mittleren Spannungen des Typs A liegen, siehe Bild 2-59. Eine „Tragfähigkeitssteigerung“ um 11 % bzw. 21 % des Nettoquerschnitts ist somit möglich. Da die Schwächungen nur auf einer Länge von 150 mm bzw. 200 mm vorhanden sind, aber eine freie Länge von 1800 mm geprüft wurde, liegt die Vermutung nahe, dass ein möglicher Längeneffekt für die Erhöhung des Wertes $f_{t,Netto}$ verantwortlich ist. Eine Schwächung über eine Länge von z. B. 200 mm in einem Bauteil mit einer deutlich größeren Gesamtlänge von z. B. 1800 mm hat somit einen geringen Einfluss als eine Querschnittsschwächung über die gesamte Bauteillänge. Diese Erkenntnis könnte eine wirtschaftlichere Bemessung bei langen Bauteilen, mit einer Schwächung über einen kurzen Abschnitt des gesamten Bauteils, zur Folge haben. Bei dieser Betrachtungsweise spielt der Längeneffekt eine wesentliche Rolle. Diese Thematik wird unter Berücksichtigung statistischer Effekte im nachfolgenden Kapitel untersucht.

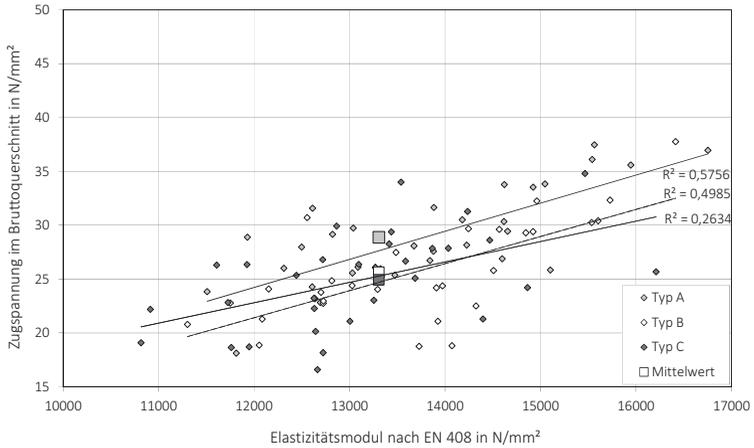


Bild 2-58 Maximale Zugspannung im Bruttoquerschnitt bezogen auf den mittleren E-Modul

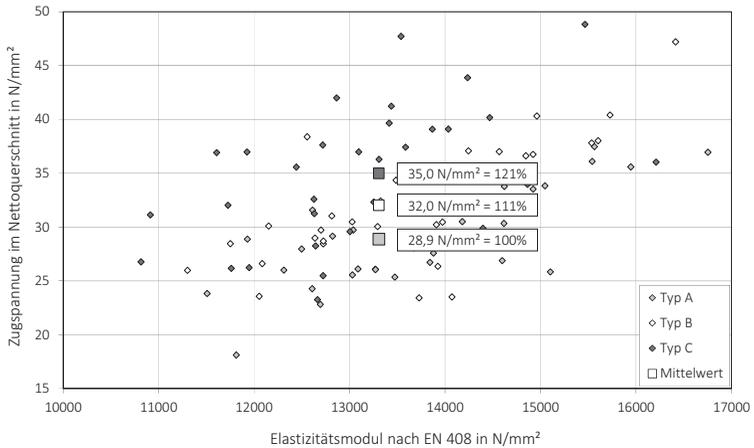


Bild 2-59 Maximale Zugspannung im Nettoquerschnitt bezogen auf den mittleren E-Modul; Mittlere Zugspannung $f_{t,Netto} = 28,9 \text{ N/mm}^2$ des ungeschwächten Querschnitts ist Referenzwert

2.5.5 Zugtragfähigkeit unter Berücksichtigung des Längeneffekts und simulierter Festigkeitswerte

2.5.5.1 Allgemeines

Die Zugversuche haben die Annahme einer verminderten Bruttozugfestigkeit bei Bauteilen mit eingebrachten Verbindungsmitteln bestätigt und geben Anlass, auch weiterhin die Querschnittsschwächung bei der Bemessung von Zugbauteilen rechnerisch zu berücksichtigen. Dass die Tragfähigkeit nicht in dem Maße reduziert wird, wie die rechnerische Querschnittsfläche (vgl. die letzten zwei Spalten der Tabelle 2-23), zeigt, dass zusätzliche Effekte einen Einfluss auf die Zugfestigkeit eines Bauteils haben können. Dies wird für ein langes Bauteil (z. B. ein Fachwerkfurt) mit möglichen Querschnittsschwächungen in diesem Kapitel genauer untersucht. Dazu wird im Folgenden neben einer Hintereinanderschaltung mehrerer Bauteile auch der Längeneffekt berücksichtigt. Die sich daraus ergebenden Zugtragfähigkeiten werden näher erläutert. Zur Untersuchung des Einflusses mehrerer Bauteilabschnitte und Querschnittsschwächungen in einem Zuggurt werden Festigkeitswerte benötigt. Diese Werte lieferte eine Simulation von Brettschichtholzträgern mit dem Programm ANSYS®. Frese et al. (2010) zeigten mithilfe dieser Simulationen in einem früheren Forschungsvorhaben den Einfluss der Bauteillänge auf die Zugfestigkeit von Brettschichtholzbauteilen. In Freses Modell werden Standardträger (s. Bild 2-60) im zweidimensionalen Raum simuliert und den einzelnen rechteckigen Elementen ($30 \times 150 \text{ mm}^2$) stochastische Bretteigenschaften (Monte-Carlo-Simulation) zugewiesen. Mithilfe dieses Modells wurden sowohl für den simulierten Träger 1 der Länge 5,4 m als auch für den Träger 2 der Länge 10,8 m 1000 Festigkeitswerte bestimmt. Ein Auszug dieser Werte, die nach einer visuellen Sortierklasse VIS II nach Frese et al. (2010) bestimmt wurden, ist in Tabelle 2-24 zusammengestellt. Die Verteilung der Festigkeitswerte des Trägers 1 in Form eines Histogramms ist in Bild 2-61 dargestellt.

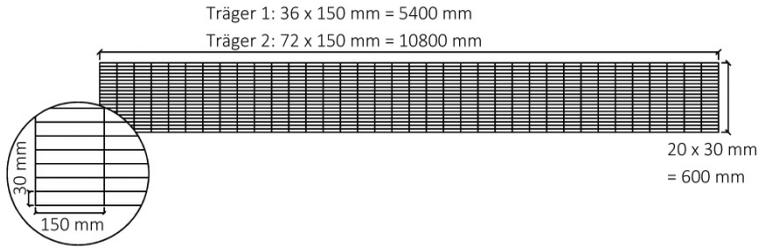


Bild 2-60 Aufbau der simulierten Brettschichtholzträger (hier: Träger 1)

Tabelle 2-24 Simulierte Festigkeitswerte für Träger 1 und 2 nach Sortierklasse VIS II nach Frese et al. (2010)

Träger 1 Länge = 5,4 m	Träger 2 Länge = 10,8 m
f_t in N/mm ²	f_t in N/mm ²
17,0	12,9
17,1	14,7
17,1	15,0
17,5	15,2
17,8	15,5
.	.
.	.
.	.
34,4	32,0
35,3	32,0

$N = 1000$ $f_{t,mean} = 26,7 \text{ N/mm}^2$ $f_{t,0,05} = 21,5 \text{ N/mm}^2$ $s = 3,0 \text{ N/mm}^2$	$N = 1000$ $f_{t,mean} = 24,7 \text{ N/mm}^2$ $f_{t,0,05} = 19,4 \text{ N/mm}^2$ $s = 2,9 \text{ N/mm}^2$
--	--

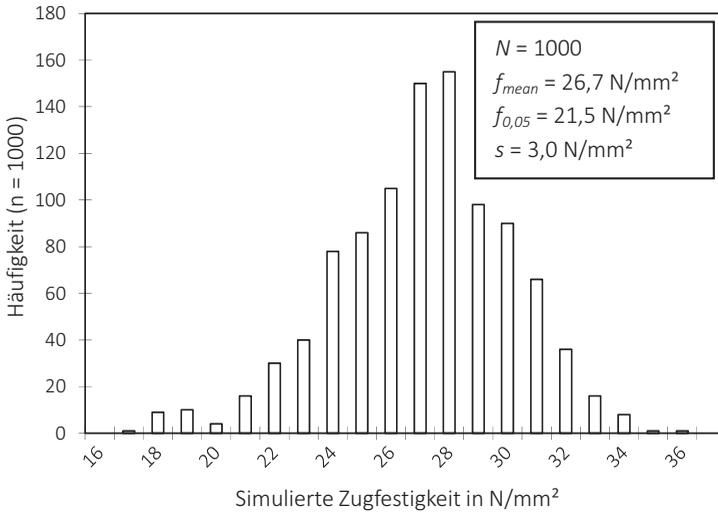


Bild 2-61 Histogramm der simulierten Festigkeitswerte des Trägers 1 ($L/H = 5400 \text{ mm}/600 \text{ mm}$) nach Sortierverfahren VIS II (nach Frese et al. 2010)

2.5.5.2 Einfluss des Längeneffekts auf die Zugfestigkeit

Der Vergleich der Festigkeitswerte der zwei simulierten Träger 1 und 2 zeigt, dass durch die Verdopplung der Trägerlänge die mittlere Zugfestigkeit um ca. 8 % und die charakteristische Zugfestigkeit um 10 % abnimmt, vgl. Tabelle 2-25. Frese et al. (2010) haben durch ihre Untersuchungen des Längeneffekts diese Tragfähigkeitsminderung bei zunehmender Bauteillänge nachgewiesen. Eine Näherung mithilfe eines k_f -Faktors würde folgende mittlere Zugfestigkeit bei Verdopplung der Länge des Trägers 1 ergeben:

$$k_{f,mean} = \left(\frac{5400}{l_t} \right)^{1/8,83} \quad (26)$$

$$\rightarrow k_{l,mean} = \left(\frac{5400}{10800} \right)^{\frac{1}{8,83}} = 0,924 \quad (27)$$

$$\rightarrow f_{t,mean} = 0,924 \cdot 26,7 = 24,7 \text{ N/mm}^2 \quad (28)$$

Dass dieser Wert in etwa dem Wert der Zugfestigkeit des Trägers 2 entspricht, ist nicht überraschend, da der k_l -Faktor ebenfalls mithilfe des Simulationsmodells für mehrere Sortierklassen bestimmt wurde. Der Längeneffekt sollte gerade bei langen Bauteilen nicht unterschätzt und gegebenenfalls eine Abminderung der Zugfestigkeit berücksichtigt werden. Beispielsweise könnten Fachwerkträger mit veränderlicher Trägerhöhe nahezu konstante Zugspannungen im Zuggurt aufweisen, sodass sehr lange Bauteile durchgehend mit einer hohen Zugkraft beansprucht werden und unter Berücksichtigung des $k_{l,mean}$ -Faktors bei einem 54 m langen Zuggurts die Zugfestigkeit um 23 % abgemindert wird.

Tabelle 2-25 Mittlere und charakteristische Zugfestigkeit nach Sortierklasse VIS II nach Frese et al. (2010)

Bauteillänge	5,4 m	10,8 m	54,0 m
f_t bestimmt durch	Simulation von 1000 Trägern	Simulation von 1000 Trägern	k_l -Faktor nach Gl. (26)
$f_{t,mean}$	26,7	24,7	20,6
s	3,0	2,9	-
$f_{t,k}$	21,5	19,4	16,6

2.5.5.3 Einfluss mehrerer hintereinandergeschalteter Bauteile auf die Zugfestigkeit

Beispielsweise soll ein parallelgurtiger Fachwerkträger der Gesamtlänge von 54 m mit einem H/L -Verhältnis von 1/10 betrachtet werden und die theoretische Zugfestigkeit des Untergurtes bestimmt werden.

Es werden an den Knotenpunkten des Obergurtes angreifende Einzellasten angenommen. Da in diesem Fall die Normalkraftverteilung im Untergurt nicht konstant ist, sondern zu den Auflagern hin abnimmt, soll beispielhaft die Verteilung der Zugspannungen im Untergurt genauer betrachtet werden. Dazu wird angenommen, dass in jedem Knotenpunkt des Obergurtes eine Kraft F angreift. Die daraus resultierende Verteilung der Normalkraft ist in Bild 2-62 dargestellt. Durch den symmetrischen Aufbau der Träger wird im Folgenden nur der jeweils linke Teil des parallelgurtigen Fachwerkträgers dargestellt. Die Abbildungen sind so skaliert, dass der am höchsten belastete Mittelteil des Zuggurtes den Wert $\delta = 1$ aufweist. Die Zugkraft parallel zur Faser zwischen zwei Knotenpunkten ist konstant und nimmt zum Auflager hin bis auf den Wert „0“ ab.

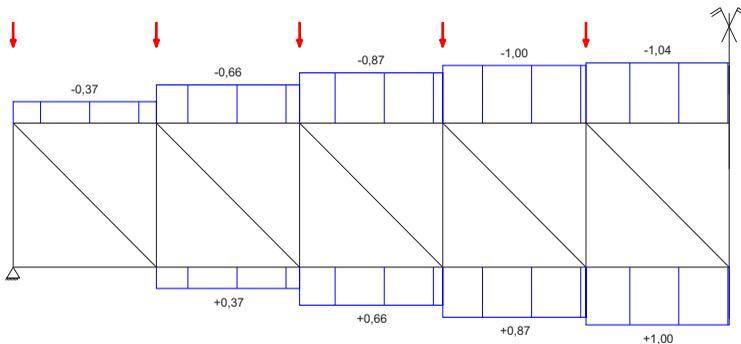


Bild 2-62 Normalkraftverteilung der Gurte (Faktor δ) im parallelgurtigen Fachwerkträger mit 10 Feldern

Bei der Betrachtung der Knotenpunkte wird angenommen, dass diejenigen Knotenabschnitte, die an zwei Gurtbauteile angrenzen, die höhere Normalkraft der beiden Teile aufnehmen müssen. Somit wird z. B. Knoten K4 (s. Bild 2-63) mit der Normalkraft „+0,87“ beansprucht.

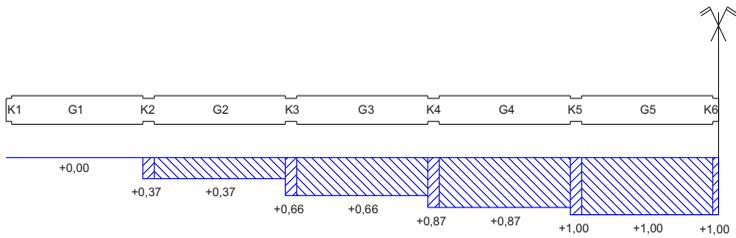


Bild 2-63 Normalkraft im Untergurt unter Berücksichtigung der Knoten- (K_x) und Gurtbereiche (G_x)

Zur Untersuchung der Zugfestigkeit eines 10-feldrigen Fachwerkträgers bei gestufter Belastung im Zuggurt wurden 1000 Trägern zufällig Festigkeitswerte aus den ermittelten 1000 Werten der BSH-Träger der Länge 5,4 m (s. Bild 2-61) zugeteilt. Dazu wurde jedem Gurtteil (G1 bis G10) der Länge 5,4 m ein f_t -Wert zugewiesen. Im folgenden Bild 2-64 sind beispielhaft die Festigkeitswerte des ersten virtuellen Trägers dargestellt.

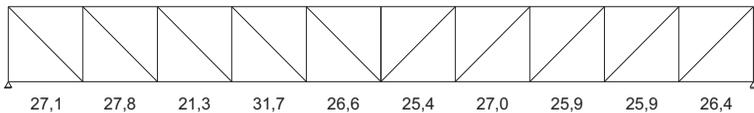


Bild 2-64 Virtueller Fachwerkträger mit zufällig zugeteilten Zugfestigkeitswerten in N/mm^2

Diese Festigkeitswerte werden durch den Faktor δ aus der Normalkraftverteilung (s. Bild 2-62) dividiert und ergeben die umgerechnete Zugspannungsbeanspruchbarkeit im mittleren Feld des Fachwerkträgers (s. Bild 2-65). Der Minimalwert eines Fachwerkträgers ist der maßgebende Festigkeitswert für das betrachtete System. Die Normalspannung im mittleren Feld darf diesen Wert nicht überschreiten. Diese Untersuchung wurde an 1000 Fachwerkträgern durchgeführt und liefert das in Tabelle 2-26 angegebene Ergebnis.

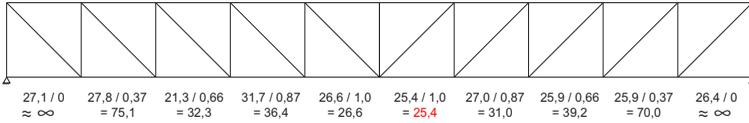


Bild 2-65 Virtueller Fachwerkträger mit maßgebenden Festigkeitswerten

Tabelle 2-26 Maßgebende Zugfestigkeit des parallelgurtigen Fachwerkträgers

1000 Fachwerkträger der Gesamtlänge $L = 54$ m mit zufällig zugeteilten Festigkeitswerten der zehn Gurtabschnitte		
	$f_{t,mean}$	24,6 N/mm ²
Maßgebende Zugfestigkeit	s	2,5 N/mm ²
	$f_{t,k}$	20,5 N/mm ²

Eine weitere Möglichkeit, die maßgebende Zugspannung des Fachwerkträgers zu bestimmen, besteht darin, mithilfe der 1000 simulierten Festigkeitswerte der linken Spalte der Tabelle 2-24 und der Versagenswahrscheinlichkeit nach Gleichung (30) die mittlere Zugfestigkeit und das 5 %-Quantil zu berechnen. Generell kann die Versagenswahrscheinlichkeit $P(\text{Versagen})$ folgendermaßen ermittelt werden:

$$P(\text{Versagen}) = 1 - P(\text{Nicht - Versagen}) \quad (29)$$

Bei mehreren hintereinandergeschalteten Bauteilen, die eine ungleiche Versagenswahrscheinlichkeit aufweisen, wird die Versagenswahrscheinlichkeit der Kette wie folgt bestimmt:

$$P(\text{Versagen}) = 1 - P_1(N-V) \cdot P_2(N-V) \cdot \dots \cdot P_i(N-V) \quad (30)$$

mit $P_i(N-V)$.. Wahrscheinlichkeit, dass das Bauteil i nicht versagt

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bauteil nicht versagt, kann bei einer Menge von 1000 Festigkeitswerten mit

$$P_i(N-V) = 1 - \frac{n}{1000} \quad (31)$$

mit n .. Anzahl der Werte aus der Grundgesamtheit von 1000 Werten, die kleiner sind als ein Festigkeitswert f_t · Faktor δ

bestimmt werden.

Um die mittlere Zugfestigkeit (Versagenswahrscheinlichkeit $P(\text{Versagen}) = 0,5$) zu ermitteln, wird der Festigkeitswert f_t in Gleichung (31) so lange variiert, bis die Versagenswahrscheinlichkeit $P(\text{Versagen})$ nach Gleichung (30) den Wert 0,5 aufweist. Die Versagenswahrscheinlichkeit, unter Berücksichtigung von 10 Gurtbauteilen, wird wie folgt berechnet:

$$P(\text{Versagen}) = 1 - P_{G1}(N-V) \cdot P_{G2}(N-V) \cdot \dots \cdot P_{G10}(N-V) \quad (32)$$

Die charakteristische Zugfestigkeit des Trägers (Versagenswahrscheinlichkeit $P(\text{Versagen}) = 0,05$) wird analog ermittelt. Die Ergebnisse sind der Tabelle 2-27 zu entnehmen. Diese Untersuchungen basieren auf der Theorie des schwächsten Gliedes, welche von Tucker (1927) und Weibull (1939) für sprödes Material entwickelt wurde. Diese Theorie besagt, dass eine auf Zug beanspruchte Kette so stark ist wie ihr schwächstes Glied.

Tabelle 2-27 Maßgebende Zugfestigkeit in N/mm² des parallelgurtigen Fachwerkträgers der Länge L = 54 m nach Gleichung (30)

Versagenswahrscheinlichkeit = 0,5 bzw. 0,05 eines Fachwerkträgers mit zehn Gurtbauteilen unter Berücksichtigung der 1000 simulierten Festigkeitswerte nach Bild 2-61		
Maßgebende Zugfestigkeit	$f_{t,mean}$	24,9 N/mm ²
	$f_{t,k}$	19,7 N/mm ²

Durch den Anschluss von Diagonalen und Pfosten im Fachwerkträger an die Gurte kommt es gezwungenermaßen zu Querschnittsschwächungen. Der Einfluss von Verbindungsmitteln im zugbeanspruchten Bereich eines Bauteils wurde in den vorangegangenen Kapiteln 2.5.1 bis 2.5.4 experimentell untersucht. Die Schwächungen des Querschnitts im Bereich der Knotenpunkte eines Fachwerkträgers werden in den weiteren Überlegungen berücksichtigt. Da die Bereiche der Schwächungen deutlich kleiner sind als die Bauteillängen zwischen den Knotenpunkten, wird folgende Hypothese aufgestellt:

$$A_{Knoten} \cdot f_{t,Knoten} = A_{Gurt} \cdot f_{t,Gurt} \quad (33)$$

Da eine Querschnittsschwächung die zur Kraftübertragung zur Verfügung stehende Querschnittsfläche von A_{Gurt} zu A_{Knoten} mindert, muss unter der obigen Annahme die Zugfestigkeit im Knotenbereich $f_{t,Knoten}$ höher sein als in den übrigen Gurtbereichen. Dass diese Annahme grundsätzlich richtig sein kann, zeigen die Überlegungen in Kapitel 2.5.5.2 und Bild 2-66. Das dargestellte Diagramm zeigt die Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Bauteillänge und macht den Längeneffekt deutlich. Bei einer Querschnittsschwächung von ca. 20 % und einer um 25 % erhöhten Zugfestigkeit im geschwächten Bereich kann die Querschnittsschwächung theoretisch vernachlässigt werden. Allerdings stellen die Knoten zusätzliche Bauteilabschnitte im Gurt dar und erhöhen somit die Anzahl i nach Gleichung (30). Bild 2-63 zeigt, dass ein 10-feldriger Fachwerkträger aus 10 Gurtteilen und 11 Knoten besteht, die Kette aus hintereinander geschalteten Gliedern gegenüber den bisherigen Betrachtungen länger wird und die Versagenswahrscheinlichkeit bei gleichbleibender Belastung steigt.

$$P(\text{Versagen}) = 1 - P_{G1}(N-V) \cdot \dots \cdot P_{G10}(N-V) \cdot P_{K1}(N-V) \cdot \dots \cdot P_{K11}(N-V) \quad (34)$$

Analog zu den Betrachtungen, die zu dem Ergebnis in Tabelle 2-27 führten, werden sowohl das 5 %-Quantil als auch die Mittelwerte der Zugfestigkeit des gesamten Gurtes unter Berücksichtigung der Knoten nach Gleichung (34) ermittelt. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 2-28 angegeben.

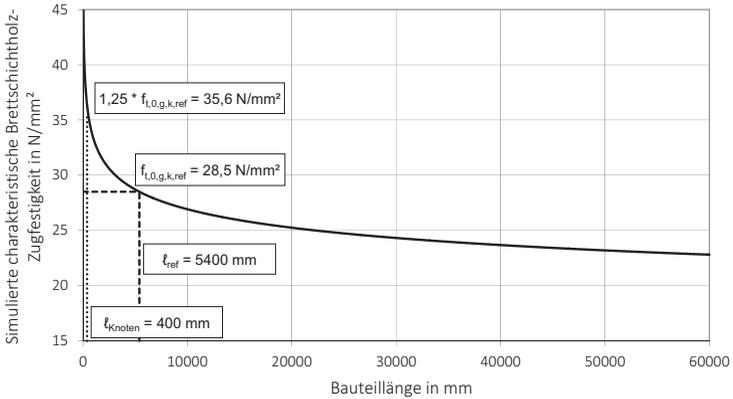


Bild 2-66 Längeneffekt nach Frese et al. (2010); Sortierverfahren EDYN II

Tabelle 2-28 Maßgebende Zugfestigkeit des parallelgurtigen Fachwerkträgers der Länge $L = 54\text{ m}$ nach Gleichung (34) unter Berücksichtigung der Querschnittsschwächungen im Fachwerkknotenbereich

Versagenswahrscheinlichkeit = 0,5 bzw. 0,05 eines Fachwerkträgers mit zehn Gurtbauteilen und elf Knotenpunkten unter Berücksichtigung der 1000 simulierten Festigkeitswerte nach Bild 2-61

Maßgebende Zugfestigkeit	$f_{t,mean}$	23,0 N/mm ²
	$f_{t,k}$	18,0 N/mm ²

2.5.5.4 Zusammenfassung

Die hier dargestellten Ergebnisse zeigen, dass es mehrere Möglichkeiten gibt, die anzusetzende Zugfestigkeit eines Fachwerkträgergurtes

zu ermitteln. Die konservativste Betrachtung kann mithilfe des k_r -Faktors nach Frese et al. (2010) geführt werden, welche von einer konstanten Belastung des Gurtes über die gesamte Länge ausgeht. Unter der Annahme eines parallelgürtigen Fachwerkträgers mit in den Knotenpunkten des Obergurtes angreifenden Einzellast, kann durch Berücksichtigung der geringer werdenden Normalkraft in Richtung der Auflager eine ca. 20 % höhere Zugfestigkeit angesetzt werden (vgl. Tabelle 2-25, Tabelle 2-26 und Tabelle 2-27). Querschnittsschwächungen können die zur Kraftübertragung vorhandene Fläche deutlich reduzieren, allerdings sind hierbei nur kurze Abschnitte in den Knotenbereichen betroffen. Bild 2-66 macht deutlich, dass in diesen Bereichen höhere Festigkeitswerte gelten, was die Querschnittsschwächung etwas relativiert. Die maßgebende Zugfestigkeit in dem gewählten Beispiel nach Tabelle 2-28 ist trotz Berücksichtigung der Querschnittsschwächung deutlich größer ($\approx 10\%$) als die konservative Annahme eines sehr langen Bauteils (hier: 54 m).

Nach aktueller Bemessungsnorm würde der charakteristische Bauteilwiderstand an der maßgebenden Stelle nach der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$R_k = A_{\text{Netto}} \cdot f_{t,k} \quad (35)$$

Unter der Annahme der hier gewählten 20%igen Querschnittsschwächung und der charakteristischen Zugfestigkeit des Trägers 1 von $f_{t,0,05} = 21,5 \text{ N/mm}^2$, ergibt sich die maßgebende charakteristische Zugfestigkeit zu $0,8 \cdot 21,5 = 17,2 \text{ N/mm}^2$. Dieser Wert ist 4 % geringer als die nach Gleichung (34) ermittelte charakteristische Zugfestigkeit des gesamten Fachwerkträgers.

Die hier dargestellten Überlegungen sollen den Einfluss der Bauteillänge auf die Zugfestigkeit verdeutlichen und gleichzeitig Möglichkeiten aufzeigen, wie eine Hintereinanderschaltung mehrerer Bauteile rechnerisch berücksichtigt werden kann und welchen Einfluss diese

unterschiedlichen Betrachtungen auf die maßgebende Zugfestigkeit des Systems haben. Die Ergebnisse sollen ebenso zeigen, dass das aktuell gültige Bemessungskonzept nach Gleichung (35) nicht im Widerspruch zu den alternativen Ansätzen steht und ähnliche Ergebnisse zumindest für den hier betrachteten Fachwerkträger liefert.

3 Kontaktverbindungen

3.1 Allgemeines

Neben mechanischen Verbindungsmitteln kommen im Ingenieurholzbau auch Kontaktverbindungen zum Einsatz. Historisch gesehen haben diese eine große Bedeutung. In den letzten Jahrzehnten wurden Holzbauteile meistens mittels mechanischer Verbindungsmittel verbunden, da die nötige Präzision der Kontaktverbindungen bei steigenden Anforderungen an das Bauprodukt fehlte und gleichzeitig der Arbeitsaufwand des Zimmermanns zu kostspielig wurde. Seitdem Abbundmaschinen die Bearbeitung von Bauteilen computergestützt übernehmen können, sind Kontaktverbindungen im heutigen Ingenieurholzbau wieder attraktiv und innovative Verbindungen bzw. Geometrien sind möglich. Im Folgenden werden ein optimierter Versatzanschluss für den Einsatzbereich in Fachwerkträgern und Zapfenverbindungen aus Buchen-Brettschichtholz in Holz-Glas-Fassaden vorgestellt und untersucht.

3.2 Versätze

3.2.1 Allgemeines

In einem Fachwerk werden Füllstäbe zwischen den Gurten benötigt, um den Schub über Zug- oder Druckkräfte aufzunehmen. Ein wesentlicher Bestandteil der Forschungsarbeit war die Entwicklung effizienter Verbindungen der druckübertragenden Füllstäbe im Knotenbereich von Fachwerkträgern. Mithilfe einer formschlüssigen Kontaktverbindung soll der Anschluss einer Druckdiagonale an einen durchlaufen-

den Gurt realisiert werden. Traditionelle zimmermannsmäßige Verbindungen kommen seit Jahrhunderten in verschiedensten Konstruktionen zum Einsatz, z. B. in Dachstühlen, Türmen, Brücken und Fachwerken. Im 20. Jahrhundert wurden neue Verbindungsmöglichkeiten in Form mechanischer Verbindungsmittel wie Nägel, Schrauben, Stabdübel oder Dübel besonderer Bauart entwickelt und häufig den zimmermannsmäßigen Verbindungen vorgezogen. Gelegentlich werden auch heute noch Versatzverbindungen hergestellt, welche sowohl hohe Druckkräfte als auch hohe Schubkräfte übertragen können. Die gängigen Versatzverbindungen im Holzbau sind der Stirn- und der Fersenversatz. Eine Kombination (doppelter Versatz) wird ebenfalls bei Druckanschlüssen unter einem Winkel von ca. 30° bis 60° in Betracht gezogen. Eine schematische Darstellung dieser Verbindungen enthält Bild 3-1. Obwohl die Vorteile dieser Kontaktverbindungen schon lange offensichtlich sind, hat sich der Anschluss auf maximal zwei Versätze pro Verbindung beschränkt. Ein modifizierter Versatz scheint eine vielversprechende Möglichkeit zu sein, hohe Kräfte zu übertragen und den Anschluss der Druckdiagonale an den Gurt zu optimieren. Dazu wurden Treppenversätze mit einer geringen Einschnitttiefe, bestehend aus mehreren Fersenversätzen und ggf. einem Stirnversatz, genauer betrachtet (s. Bild 3-2). Die geringe Versatztiefe schwächt den Gurtquerschnitt nur in geringem Maße und somit bleibt z. B. eine hohe Zug- und Drucktragfähigkeit im Gurt erhalten.

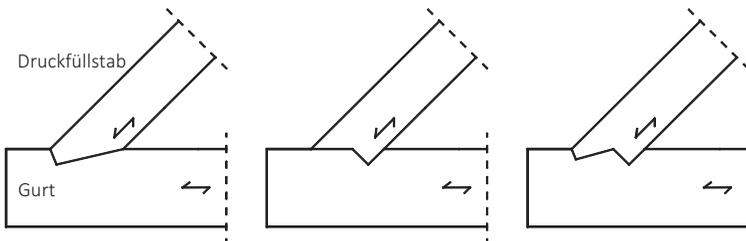


Bild 3-1 Stirnversatz, Fersenversatz und Doppelter Versatz



Bild 3-2 Treppenversatz (Buchenfurnierschichtholz)

Für eine formschlüssige Verbindung ist eine passgenaue Herstellung unabdingbar. Dröge und Stoy (1981) haben diese Problematik wie folgt beschrieben: „Mit Rücksicht auf die erforderliche große Arbeitsgenauigkeit ist der doppelte Versatz nur bedingt und der dreifache nicht zu empfehlen. Bei ungenauer Ausführung klafft allerdings eine der beiden Kontaktflächen, und infolge der unplanmäßigen Kraftübertragungen treten erhebliche Überbeanspruchungen auf“. Da heute die Qualität der Versatzanschlüsse nicht mehr vom handwerklichen Geschick des Zimmermanns abhängig ist, sondern durch CNC-gesteuerte Abbundmaschinen gewährleistet wird, sind auch geometrisch komplexe Kontaktverbindungen wieder wirtschaftlich. Bisherige Untersuchungen und Dokumentationen befassten sich mit dem Tragverhalten des Stirn- bzw. Fersenversatzes, ein mehrfacher Versatz wurde erwähnt, aber als nicht relevant betrachtet: „Nur drei- und mehrfache Versätze werden ihrer Unzuverlässigkeit wegen kaum mehr ausgeführt. – Seinem Wesen nach stellt der Versatz eine Verzahnung dar.“ (Troche 1951). Die schon von Troche (1951) erwähnte Verzahnung soll

in dem hier untersuchten Treppenversatz genutzt werden und eine formschlüssige, tragfähige und steife Verbindung ermöglichen. In der Vergangenheit wurde das Tragverhalten einfacher Versatzverbindungen mit Nadelvollholz ausführlich untersucht. Basierend auf experimentellen Untersuchungen stellten Heimeshoff und Köhler (1989) Gleichungen auf, um die Tragfähigkeit eines „rechtwinkligen Stirnversatzes“ nachzuweisen. Die Bemessungsnorm für den Ingenieurholzbau (DIN EN 1995-1-1/NA) gibt Gleichungen an, um die Tragfähigkeit von Versätzen (Stirnversatz, Fersenversatz und Doppelter Versatz) zu ermitteln. Görlacher und Kromer (1991) zeigen Möglichkeiten auf, die nach Norm scheinbar nicht ausreichend dimensionierten Versatzverbindungen trotzdem als „tragfähig“ anzusehen. Dies ist im Einzelfall bei genauerer Betrachtung der Anschlussstelle möglich und folglich ein wichtiger Beitrag zur Erhaltung historischer Holzkonstruktionen.

Zu Beginn der hier beschriebenen experimentellen Untersuchungen lagen keine Ergebnisse von Versuchen vor, welche sich mit dem Tragverhalten von Brettschichtholz in Versatzanschlüssen befasst haben, insbesondere nicht mit dem Versagen von Treppenversätzen. Somit konnte auch nicht auf Tragfähigkeits- und Steifigkeitswerte einzelner Versätze zurückgegriffen werden, was eine Untersuchung auch der herkömmlichen Geometrie erforderte, um diese mit dem Treppenversatz direkt vergleichen zu können. Des Weiteren wurde der Einsatz von Hybrid-BSH im Gurtbereich und die Verwendung von Buchen-Furnierschichtholz in Betracht gezogen und ebenso untersucht.

3.2.2 Geometrie Treppenversatz

3.2.2.1 Allgemeines

Die hohen Tragfähigkeiten und Steifigkeiten von Versatzanschlüssen waren Grund genug, diese genauer zu betrachten. Eine Modifikation der bestehenden Versatzgeometrie scheint sinnvoll, um die Querschnitte möglichst effizient zu nutzen. Durch den Einsatz eines Trep-

penversatzes soll die vollständige Strebhöhe h_s zur Kraftübertragung genutzt werden. Die Verzahnung zwischen Strebe und Gurtbauteil wird über mehrere Fersen erreicht. Mit abnehmender Einschnitttiefe t_v und kleiner werdendem Anschlusswinkel α nimmt die mögliche Fersenanzahl zu. Zu Beginn der Untersuchungen wurden mehrere Fersenversätze mit einem Stirnversatz, analog zum Aufbau des doppelten Versatzes, zum so genannten „Treppenversatz Plus“ kombiniert. Ein weiterer Optimierungsschritt führte zum endgültigen „Treppenversatz“, welcher lediglich aus der maximal möglichen Anzahl an Fersenversätzen besteht und die Verzahnung von Druckstrebe und Gurtbauteil realisiert. Im Folgenden werden beide Möglichkeiten vorgestellt.

3.2.2.2 Treppenversatz Plus

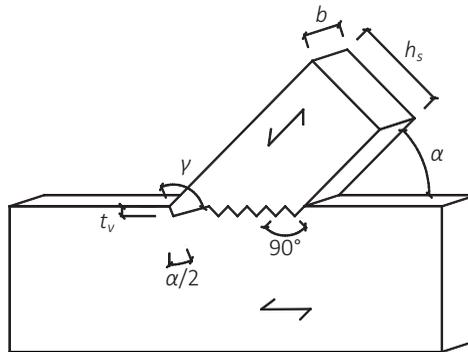


Bild 3-3 Treppenversatz Plus

Der Treppenversatz Plus wird durch eine geringe Einschnitttiefe, möglichst viele Fersenversätze und einen Stirnversatz ($n_s = 1$) charakterisiert. Die maximale Fersenanzahl ($\hat{=}$ Treppenanzahl) n_F ist von der Strebhöhe h_s , der Einschnitttiefe t_v und vom Strebenanschlusswinkel α abhängig und kann mit folgender Gleichung ermittelt werden:

$$n_F = \frac{(h_s - 2 \cdot t_v) \cdot \cos \alpha}{t_v} \quad (36)$$

In Tabelle 3-1 ist beispielhaft für einen Anschlusswinkel $\alpha = 45^\circ$ die maximale Fersenanzahl angegeben. Die abgerundete ganze Zahl gibt die Anzahl der Fersen in einem Treppenversatz Plus an.

Tabelle 3-1 Maximale Fersenanzahl n_f nach Gl. (36) für $\alpha = 45^\circ$

t_v in mm	h_s in mm			
	100	200	300	400
10	5,7	12,7	19,8	26,9
15	3,3	8,0	12,7	17,4
20	2,1	5,7	9,2	12,7

Dröge und Stoy (1981) geben in ihrer Arbeit Empfehlungen für die Ausbildung von Stirnversätzen an. Diese Vorschläge sollen im Folgenden beim Treppenversatz Plus berücksichtigt werden, um unerwünschte Versagensmechanismen zu vermeiden. Ein kleiner Kraft-Faser-Winkel ist für eine hohe Druckfestigkeit maßgebend. Somit ist nahe liegend, dass der Winkel zwischen der Stirn und dem Gurtquerschnitt die Hälfte des Anschlusswinkels α sein muss, um den gleichen Kraft-Faser-Winkel im Gurtbauteil und in der Strebe zu erzielen (vgl. Bild 3-3). Des Weiteren soll der Winkel γ nicht kleiner als 90° sein, um die Keilwirkung und die damit auftretende Querkzugbeanspruchung im Vorholz zu vermeiden. Die Fersenflächen stehen immer im 90° -Winkel zueinander und sind für den CNC-gesteuerten Abbund geeignet. Anders als beim Stirnversatz kann beim Fersenversatz nicht der gleiche Kraft-Faser-Winkel in Strebe und Gurt erreicht werden, da hierdurch ein Querkzugriss im Übergang der Fersen provoziert werden würde. Auch beim Schwinden der Bauteile könnte dies zum Aufspalten führen (Gattnar und Trysnar 1961). Üblicherweise wird beim doppelten Versatz eine um 10 mm größere Einschnitttiefe beim Fersenversatz gegenüber dem Stirnversatz gewählt, damit sich die Scherflächen nicht überlagern. Diese Empfehlung wird beim Treppenversatz (Plus) nicht berücksichtigt.

3.2.2.3 Treppenversatz

Der Treppenversatz (vgl. Bild 3-4), nur bestehend aus Fersenversätzen, soll folgende Vorteile gegenüber dem Treppenversatz Plus (vgl. Bild 3-3) aufweisen:

- Einfache Geometrie
- Vorteile für den Abbund
- Gleichmäßige Kraftverteilung auf die Treppen
- Unerwünschte Versagensmechanismen werden vermieden

In Bild 3-5 sind schematisch drei Versatzanschlüsse dargestellt mit den Anschlusswinkeln 30° , 45° und 60° . Bei einer konstanten Einschnitttiefe $t_v = 10$ mm und gleichen Treppenabmessungen variiert die Strebhöhe h_s im geringen Maße. Die Fersenanzahl n_F ist bei kleineren Anschlusswinkeln (hier $n_F = 9$) größer als bei großen Anschlusswinkeln (hier $n_F = 5$).

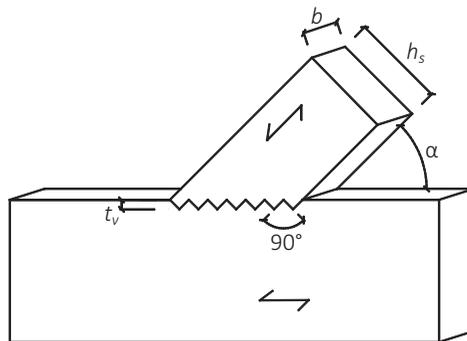


Bild 3-4 Treppenversatz

Charakteristisch für den Treppenversatz ist die hohe Anzahl identischer Fersenversätze bei gleichzeitig geringer Versatztiefe. Dabei stehen die Versatzflächen immer rechtwinklig zueinander. Durch diese Einteilung soll der gesamte Stabenquerschnitt gleichmäßig beansprucht werden. Die nachfolgende Tabelle 3-2 stellt eine Hilfe zur

Geometriefindung des Treppenversatzes dar. Da dem planenden Ingenieur bestimmte Parameter vorgegeben werden, muss die Treppenversatzgeometrie auf unterschiedliche Art (Gl. (37), (38), (39)) bestimmt werden können.

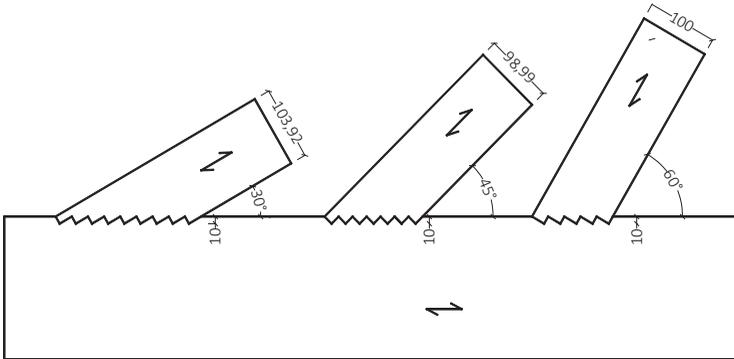


Bild 3-5 Treppenversatz mit $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ und 60° ; Maße in mm

Tabelle 3-2 Geometriefindung Treppenversatz

Gegeben	Gesucht		
h_s, α, n_F	t_v	$t_v = \frac{h_s \cdot \cos \alpha}{n_F}$	(37)
t_v, α, n_F	h_s	$h_s = \frac{t_v \cdot n_F}{\cos \alpha}$	(38)
		$n_F = \frac{h_s \cdot \cos \alpha}{t_v}$	(39)
t_v, α, h_s	n_F	→ n_F aufrunden	
		→ $h_s = \frac{t_v \cdot n_F}{\cos \alpha}$	

3.2.3 Abbund

Der Abbund der Treppenversätze erfordert eine hohe Präzision bei der Herstellung. Moderne CNC-gesteuerte Abbundmaschinen ermöglichen eine wirtschaftliche Bearbeitung der Bauteile bei gleichzeitig hoher Genauigkeit, welche durch eine Bearbeitung per Hand nicht zu realisieren wäre. Trotzdem können bei Nadelholz unsaubere, abgesplitterte Kanten entstehen (vgl. Bild 3-6). Das Fräsen der Strebe ist weniger problematisch, da hier vorwiegend rechtwinklig zur Faserrichtung das Holz entfernt wird. Auch wenn die gefrästen Buchenholzbauteile (sowohl FSH als auch Hybrid-BSH) nahezu fehlerfrei erscheinen, ist die höhere Beanspruchung der Maschinenwerkzeuge bei der Verarbeitung von Buchenholz nicht zu vernachlässigen, s. Bild 3-7 und Bild 3-8. Um eine möglichst gute Passgenauigkeit der Strebe und des Gurtes gewährleisten zu können, sollte die Holzfeuchte zur Zeit des Abbundes in etwa der Ausgleichsfeuchte im eingebauten Zustand entsprechen. Beim Abbund selbst haben sich eine ausreichend große Fixierlänge des Bauteils und exakt rechtwinklig zueinander stehende Bauteilseiten positiv auf die Qualität des Abbundes ausgewirkt. Für den baupraktischen Einsatz des Treppenversatzes wird von Einschnitttiefen kleiner 10 mm abgeraten, da anderenfalls mögliche Abbundgenauigkeiten oder Schwind- und Quellverformungen einen signifikanten Einfluss auf das Tragverhalten der Verbindung haben könnten.



Bild 3-6 Absplitterung beim Abbund des Gurtes (Nadelholz)

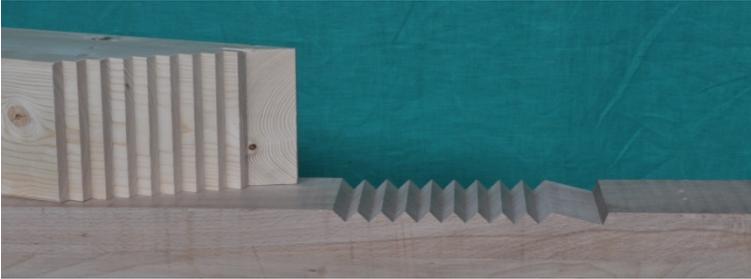


Bild 3-7 Fehlerfreier Abbund durch Verwendung von Buchenholz; Nadelholz-Strebe (oben) und Buchenholz-Gurtlamelle (unten)



Bild 3-8 Abbund der Strebe (links) und des Gurtbauteils (rechts) am Berufsbildungszentrum Euskirchen

3.2.4 Experimentelle Untersuchung

3.2.4.1 Allgemeines

Zur Bestimmung des Trag- und Verformungsverhaltens einer im 35°, 45°- oder 55°-Winkel angeschlossenen Strebe an ein Gurtbauteil wurden insgesamt über 50 Versatzanschlüsse experimentell untersucht. Im Rahmen dieser Untersuchungsserie wurden zehn verschiedene Versuchskonfigurationen berücksichtigt. Ein Versuchskörper besteht aus einem Gurt- und einem Strebenbauteil, welche nur über Kontakt „verbunden“ sind. Hierdurch können nur Druckkräfte in Strebenlängsrichtung aufgebracht werden. In existierenden Bauwerken wird die

Lagesicherung (nach DIN 1052 bzw. DIN EN 1995) z. B. durch Holzschrauben sichergestellt.

3.2.4.2 Material und Methode

Die formschlüssige Verbindung wird in heutiger Zeit mit CNC-gesteuerten Abbundmaschinen hergestellt und ermöglicht somit eine wirtschaftliche und präzise Herstellung. Für die Streben und die Gurte wurde Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL 28h bzw. Buchen-FSH verwendet. Alternativ wurde der Einsatz von Hybrid-BSH im Gurtbereich untersucht. Die Durchführung der Versuche mit einer modifizierten Versatzgeometrie soll Aufschluss darüber geben, ob der Treppenversatz eine Alternative zu herkömmlichen Versatzgeometrien darstellt und in welchem Ausmaß die Verwendung von Buchenholz eine höhere Tragfähigkeit und Steifigkeit der Verbindung zur Folge hat. Dabei werden die Tragfähigkeiten und Steifigkeiten der Verbindungen untersucht und miteinander verglichen. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der geringen Einschnitttiefe und der damit verbundenen Verzahnung durch mehrere Fersenversätze (Treppe). Das gesamte Versuchsprogramm ist in Tabelle 3-3 dargestellt und umfasst zehn Reihen à fünf bis sechs Einzelversuche. Die ersten drei Reihen befassen sich mit dem Versagensverhalten bekannter Versatzgeometrien (Stirnversatz, doppelter und dreifacher Versatz). Diese wurden ebenfalls untersucht, da keine Werte für Versätze aus Brettschichtholz (*Picea abies*) vorlagen. Die Einschnitttiefe $t_v = 30$ mm ist ein gängiges Maß und ist folglich dreimal so groß wie die Einschnitttiefe des gewählten Treppenversatzes. Reihe 4 bis 8 wurden als Treppenversatz Plus (s. Kapitel 3.2.2.2) ausgeführt, Reihe 9 und 10 bestehen lediglich aus 7 Fersenversätzen (Treppenversatz nach Kapitel 3.2.2.3). Die zur Reihe 9 identische Reihe 10 soll mit einer vereinfachten Versuchskonfiguration untersucht werden, um zu überprüfen, ob ein Versuchsaufbau mit deutlich geringerem Arbeitsaufwand gleiche Ergebnisse liefert (s. Kapitel 3.2.4.4). Die mittleren Rohdichten und Holzfeuchten der jeweiligen Reihen sind der Tabelle 3-7 zu entnehmen.

Tabelle 3-3 Versuchsprogramm (vgl. Bild 3-3 und Bild 3-4)

Reihe	Bauteil	Material	Höhe in mm	b in mm	α in °	t_v in mm	n_S	n_F
1	Strebe	GL 28h	160	120	45	30	1	0
	Gurt	GL 28h	200					
2	Strebe	GL 28h	160	120	45	30	1	1
	Gurt	GL 28h	200					
3	Strebe	GL 28h	160	120	45	30	1	2
	Gurt	GL 28h	200					
4	Strebe	GL 28h	160	120	45	10	1	9
	Gurt	GL 28h	200					
5	Strebe	GL 28h	100	120	45	10	1	5
	Gurt	GL 28h	200					
6	Strebe	GL 28h	100	120	45	10	1	5
	Gurt	GL 28 hyb	320					
7	Strebe	GL 28h	160	120	35	10	1	11
	Gurt	GL 28h	320					
8	Strebe	GL 28h	160	120	55	10	1	8
	Gurt	GL 28h	320					
9	Strebe	Bu-FSH	100	100	45	10	0	7
	Gurt	Bu-FSH	200					
10	Strebe	Bu-FSH	100	100	45	10	0	7
	Gurt	Bu-FSH	320					

Für die Prüfung der Versatzverbindungen werden zwei Konfigurationen in Betracht gezogen. Konfiguration 1 (Reihe 1 bis 9) wird mithilfe eines aus HEM 140-Profilen geschweißten Prüfrahmens geprüft. Die zweite Konfiguration (Reihe 10) untersucht einen vereinfachten Aufbau. Frühere Forschungsvorhaben (Heimeshoff und Köhler 1989 und Görlacher und Kromer 1991) haben gezeigt, dass eine Versatzprüfung analog zur Versuchskonfiguration 1 als bewährt angesehen werden kann. In Bild 3-9 ist sowohl der komplette Versuchsaufbau als auch

eine schematische Darstellung abgebildet. Das Gurtholz wird auf ein um 45° geneigtes Stahlprofil gelegt und mit Stahllaschen und Vollgewindeschrauben am oberen Ende gehalten. Um Reibeinflüsse auszuschließen wird zwischen Holz und Stahl eine Teflonschicht angeordnet. Die Strebe wird auf das Gurtholz gestellt und über die Prüfmaschine vertikal beansprucht. Eine Kalotte soll mögliche Schiefstellungen ausgleichen. Der Stahlrahmen ist mit der Unterkonstruktion der Prüfmaschine verbunden.

Innerhalb der zweiten Versuchskonfiguration (Reihe 10) soll auf die aufwendige Verankerung am Gurtbauteilende verzichtet werden. Der Aufbau ist in Bild 3-10 dargestellt. Die Ecke, welche am vorderen unteren Ende entfernt werden musste, wurde mit mehreren Schrauben als erweiterte Aufstandsfläche an das Gurtbauteil befestigt. Die Kontaktverbindungen werden in Anlehnung an DIN EN 26891 bis zum Versagen geprüft. Dazu wird eine Prüfmaschine mit einer Maximallast von 400 kN genutzt. Das Prüfverfahren wird eigentlich auf Versuche von Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln angewandt, findet aber auch bei Kontaktanschlüssen Verwendung. Um die Verschiebungen der Verbindung während der Versuchsdurchführung zu messen, wurden vorne und hinten jeweils drei induktive Wegaufnehmer angebracht. Mit deren Hilfe konnten Verschiebungen der Strebe in drei Richtungen gemessen werden. Die Anordnung der Wegaufnehmer und die Definition der Prüfkörperseiten sind in Bild 3-11 angegeben. Alle Wegaufnehmer greifen am gleichen Bezugspunkt der Strebe an und messen die lokalen Verschiebungen (rechtwinklig, parallel und unter einem Winkel von 45° zur Gurtlängsachse) bis zur Gurtbezugsebene, welche sich 10 cm unterhalb der Gurtoberkante befindet. Die Anordnung der Wegaufnehmer erfolgt in Anlehnung an die von Görlacher und Kromer (1991) gewählte Systematik.

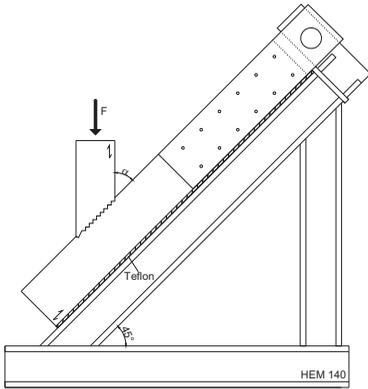


Bild 3-9 Versuchsaufbau Reihe 1 bis 9

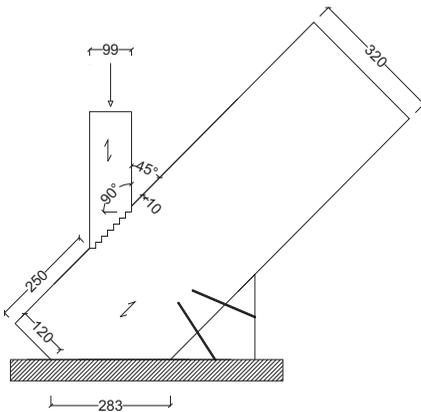


Bild 3-10 Versuchsaufbau Reihe 10

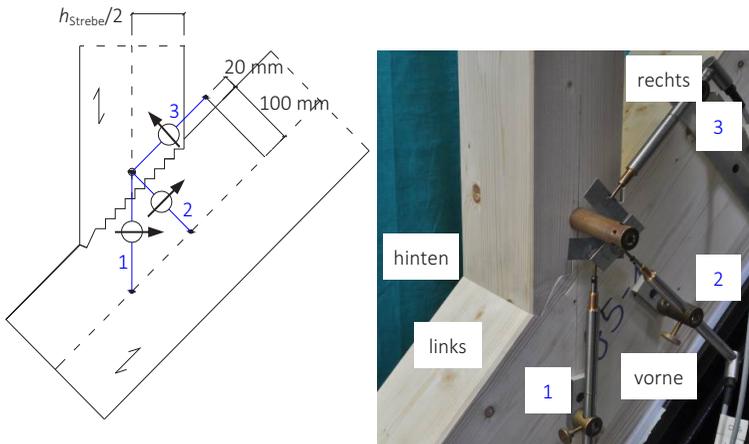


Bild 3-11 Anordnung der Wegaufnehmer auf der Vorderseite (Wegaufnehmer auf der Rückseite analog)

3.2.4.3 Ergebnisse

Das Erreichen der Maximallast war primär gekennzeichnet durch das Ausbilden von Druckfalten im Gurtbauteil und gelegentlich durch ein Scherversagen. Durch die große Anzahl verschiedener Prüfkörpergeometrien waren unterschiedliche Versagensformen zu beobachten, die in Tabelle 3-4 bis Tabelle 3-6 jeweils durch ein repräsentatives Bild und den wesentlichen Versagensmerkmalen veranschaulicht sind.

Tabelle 3-4 Tabellarische Darstellung der Versagensbilder (Reihe 1 bis 3)

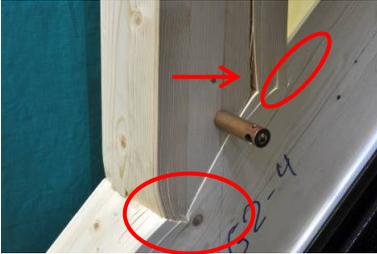
Reihe	Bemerkung	Versagensbild
1	<ul style="list-style-type: none"> - Versagen (lokales Ausknicken der Fasern) bei Druckbeanspruchung 	
2	<ul style="list-style-type: none"> - Druckversagen des Stirnversatzes (vgl. Reihe 1) - Querschnitt in der Strebe zw. Fersen- und Stirnversatz - Faserparalleler Riss im Gurt rechts im Abstand t_v von der Oberkante 	
3	<ul style="list-style-type: none"> - Querschnitt in der Strebe zw. Fersen- und Stirnversatz - Ausbeulen/Querdehnung des Gurtes direkt unter dem Versatz - Faserparalleler Riss im Gurt rechts und links im Abstand t_v von der Oberkante 	

Tabelle 3-5 Tabellarische Darstellung der Versagensbilder (Reihe 4 bis 6)

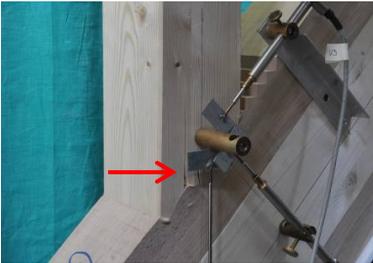
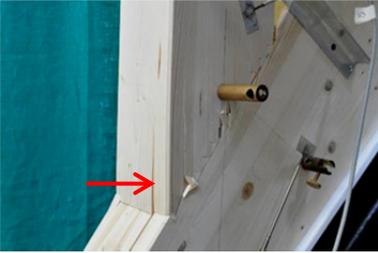
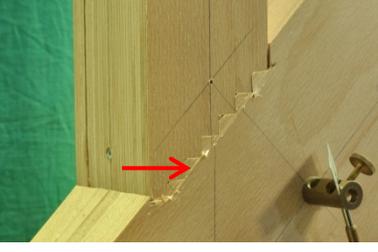
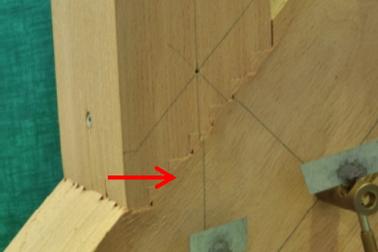
Reihe	Bemerkung	Versagensbild
4	<ul style="list-style-type: none"> - Querdruckversagen - Querzugriss in Strebe aufgrund der Querdehnung des Gurtes - Querzugriss in der Strebe zw. Fersen- und Stirnversatz - Fersenversätze teilweise abgeschert - Ausbeulen/Querdehnung des Gurtes direkt unter dem Versatz - Faserparalleler Riss im Gurt rechts und links im Abstand t_v von der Oberkante 	
5	- analog zu Reihe 4	
6	<ul style="list-style-type: none"> - Querzugriss in der Strebe zw. Fersen- und Stirnversatz - Druckversagen der Stirn - Längsrisse rechts der letzten Ferse im Gurtholz - Querdruckversagen (Ausbeulen) der Fichtenlamellen unterhalb des Versatzes bis hin zum linken Trägerrand - Querzugriss am rechten Trägerrand 	

Tabelle 3-6 Tabellarische Darstellung der Versagensbilder (Reihe 7 bis 10)

Reihe	Bemerkung	Versagensbild
7	<ul style="list-style-type: none">- Querszugriss in der Strebe zw. Fersen- und Stirnversatz- Abscheren der Fersen im Gurt und/oder des Vorholzes	
8	<ul style="list-style-type: none">- Querdruckversagen unterhalb des Versatzes im Gurt maßgebend	
9	<ul style="list-style-type: none">- Scherversagen im Fersen- grund	
10	<ul style="list-style-type: none">- Scherversagen im Bereich des Fersengrunds	

Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt in Anlehnung an DIN EN 26891. Die angegebenen Verschiebungen beziehen sich auf die in Strebenlängsrichtung gemittelten Verschiebungen (Wegaufnehmer 1). Die Mittelwerte der Versuchsergebnisse sind in Tabelle 3-7 dargestellt. Die Versuchsergebnisse sind unter Berücksichtigung der Versatzmerkmale nach Tabelle 3-3 zu betrachten und ggf. zu vergleichen. Da die Maximallast bei einer Verschiebung von 15 mm oder durch einen Lastabfall gekennzeichnet ist, können sehr große Verformungen Δ_{max} beim Erreichen der Tragfähigkeit auftreten, bevor eventuell ein sprödes Versagen eintritt. Gerade bei stumpfen Winkeln ist ein Querdruckversagen im Gurtbereich charakteristisch, wobei deutliche Schädigungen und Verschiebungen in der Verbindung offensichtlich sind, ein Lastabfall aber nicht zu verzeichnen ist. Als zusätzliches Auswertungskriterium wird somit eine Verschiebung in Strebenlängsrichtung von 1,5 mm gewählt, welches die Vergleichbarkeit der Versuchsreihen verbessert und zusätzlich einen sinnvollen Grenzwert zur Wahrung der Gebrauchstauglichkeit bei Kontaktverbindungen darstellt. Neben einer „Anfangsauswertung“, welche einen Anfangsschlupf mit berücksichtigt, erfolgt die „Auswertung ohne Schlupf“ im Bereich der Wiederbelastung und soll ein anfängliches nichtlineares Verformungsverhalten aufgrund von Passungenauigkeiten der Verbindung eliminieren (vgl. Bild 3-17). Sowohl die Einzel- als auch die Mittelwerte bezogen auf eine Bauteilbreite $b = 100$ mm, unter der Annahme einer linearen Korrelation zwischen den Festigkeits- bzw. Steifigkeitswerten und der Bauteilbreite b , sind in Bild 3-12 und Bild 3-13 veranschaulicht. Versuchsergebnisse der Einzelversuche aus Reihe 1 bis 8 sind der Literatur (Blaß und Enders-Comberg 2012) und aus der Reihe 9 und 10 dem Bild A-21 und Bild A-22 bzw. der Tabelle A-19 und Tabelle A-20 zu entnehmen.

Tabelle 3-7 Versuchsergebnisse – Mittelwerte der Versuchsreihen

Reihe	Bauteil	ρ in kg/m ³	u in %	F_{max} in kN	Δ_{max} in mm	$F_{1,5mm}$ in kN		k_s in kN/mm	
						Anfang	Wiederbel.	Anfang	Wiederbel.
1	Strebe	438	10,6	128	2,5	109	120	100	156
	Gurt	483	11,1						
2	Strebe	444	10,3	209	4,2	102	165	73,4	146
	Gurt	502	11,2						
3	Strebe	433	10,5	249	4,0	148	184	105	166
	Gurt	459	11,4						
4	Strebe	434	10,7	216	5,1	178	187	168	208
	Gurt	467	11,3						
5	Strebe	450	11,0	158	5,1	120	128	110	143
	Gurt	470	11,2						
6	Strebe	458	10,9	310	8,4	169	201	137	171
	Gurt	718/455*	11,4/11,0*						
7	Strebe	432	10,9	266	3,8	164	206	136	166
	Gurt	461	11,4						
8	Strebe	449	10,9	203	12,5	89,5	131	70,3	104
	Gurt	468	11,5						
9	Strebe	717	7,3	276	3,6	170	212	149	190
	Gurt	700	6,4						
10	Strebe	745	7,4	291	4,1	166	216	146	187
	Gurt	716	6,8						

*Buche/Fichte des Hybrid-BSH

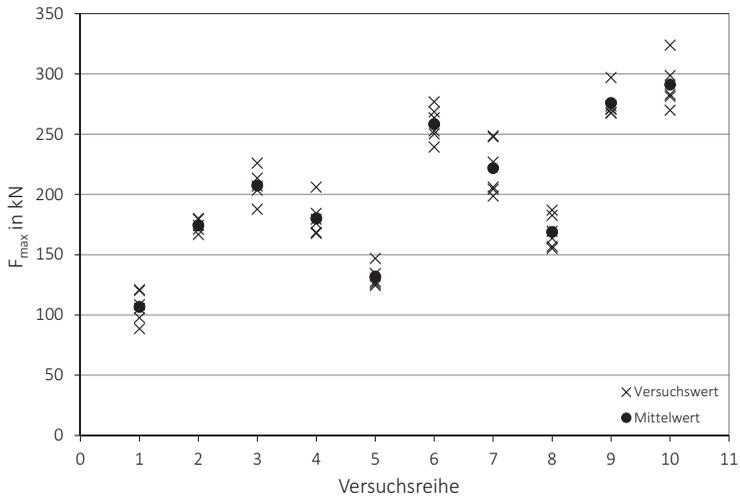


Bild 3-12 Einzel- und Mittelwerte der Maximallast F_{max} bezogen auf die Bauteilbreite $b = 100 \text{ mm}$; h_s variiert

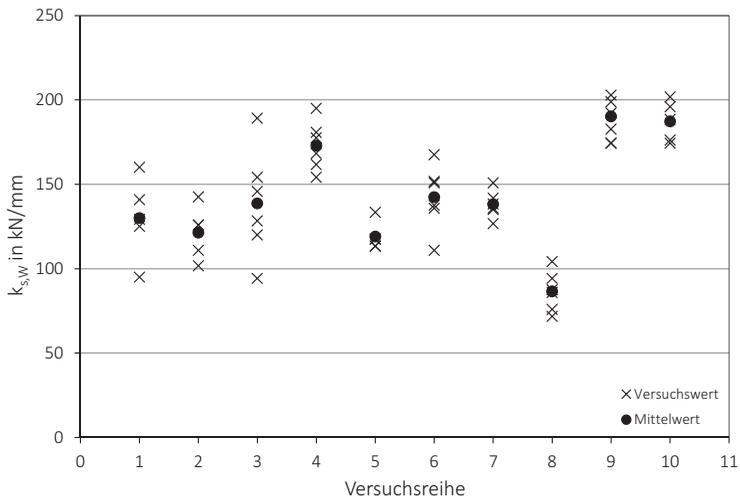


Bild 3-13 Einzel- und Mittelwerte des Verschiebungsmoduls nach Wiederbelastung $k_{s,w}$ bezogen auf die Bauteilbreite $b = 100 \text{ mm}$; Strebhöhe h_s variiert

3.2.4.4 Diskussion

Die vielfältigen Untersuchungen mit gleichzeitig geringer Versuchszahl innerhalb einer Reihe erschweren eine statistische Auswertung über die Mittelwerte und Variationskoeffizienten hinaus. Auf eine Bestimmung charakteristischer Werte oder eine Durchführung von Ausreißertests wird innerhalb dieses Kapitels verzichtet. Aus Bild 3-12 wird deutlich, dass sich die Versagensmechanismen der untersuchten Versatzgeometrien deutlich unterscheiden und die gemittelten Höchstlasten, bezogen auf eine Bauteilbreite von 100 mm, zwischen 107 und 291 kN liegen. Im Folgenden sollen die wichtigsten Erkenntnisse der vergleichenden Versuche kurz erläutert und durch repräsentative Last-Verschiebungs-Kurven veranschaulicht werden.

3.2.4.4.1 Vergleich Stirn-, doppelter und Treppenversatz Plus

Ziel dieser Untersuchung war auch die Beurteilung der Tragfähigkeit eines Treppenversatzes gegenüber herkömmlich verwendeten Versätzen. Der Vergleich der Reihen 1, 2 und 4 gibt Aufschluss über das Potential des Treppenversatzes (Plus). Die mittlere Tragfähigkeit des Treppenversatzes Plus (Reihe 4) ist ca. 70 % höher als F_{max} des Stirnversatzes. Die maximal aufnehmbare Last des doppelten Versatzes entspricht ungefähr derjenigen des Treppenversatzes Plus. Es ist hervorzuheben, dass beim Treppenversatz lediglich ein Drittel der Einschnitttiefe zur Verfügung steht. Ein nahezu perfekter Abbund des Versuchskörpers aus Reihe 4 ermöglicht eine passgenaue Kontaktverbindung und zusätzlich hohe Steifigkeitswerte, insbesondere Anfangssteifigkeitswerte. In Bild 3-14 sind drei typische Last-Verformungs-Kurven dargestellt, die das charakteristische Verhalten während einer Druckbeanspruchung in Strebenlängsrichtung verdeutlichen. Die Versuche haben gezeigt, dass mit steigender Anzahl der Fersen in der Verbindung ein ausgeprägteres Querdruckversagen und damit größere Verformungen rechtwinklig zur Gurtlängsachse zu beobachten sind. Dieser duktile Versagensmechanismus ermöglicht deutlich größere

Verschiebungen in Strebenlängsrichtung vor dem Erreichen der Maximallast als Stirnversätze.

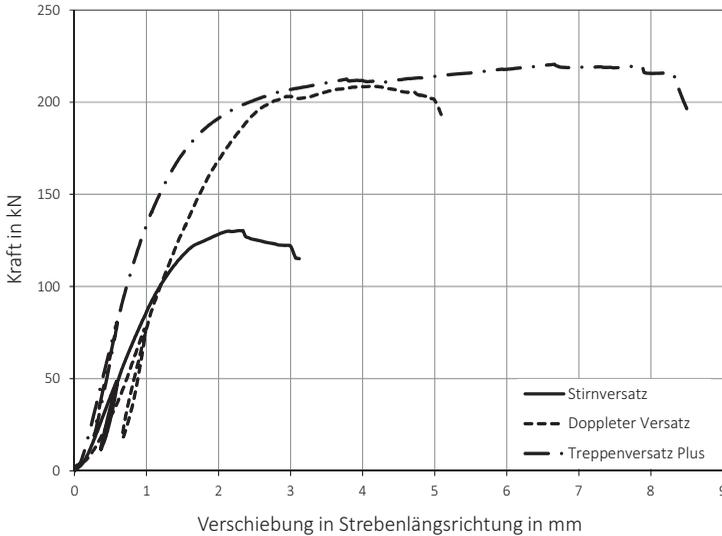


Bild 3-14 Vergleich Stirn-, doppelter und Treppenversatz Plus; $h_s = 160$ mm

3.2.4.4.2 Vergleich Fichten-BSH, Hybrid-BSH und Buchen-FSH

Der Einsatz von Buchenlamellen im Randbereich des Gurtbauteils (Reihe 6) beeinflusst die maximale Beanspruchbarkeit der Verbindung mittels Treppenversatz Plus deutlich. Die mittlere Tragfähigkeit der Reihe 5 (bezogen auf eine Bauteilbreite $b = 100$ mm) beträgt 132 kN und die der Reihe 6 258 kN. Demnach ergibt sich durch die Verwendung von Hybrid-BSH anstelle von homogenem BSH aus Nadelholz nahezu eine Verdopplung der Tragfähigkeit. Auch die Kraft $F_{1,5mm}$ liegt ca. 60 % höher. Eine Kraft von 258 kN in der Strebe entspricht einer Druckspannung parallel zur Faser von $25,8$ N/mm².

Das Last-Verformungs-Diagramm (Bild 3-15) der drei repräsentativen Versuche zeigt eine weitere Verbesserung durch den Einsatz von Buchen-FSH sowohl im Gurt als auch in der Strebe (Reihe 10). Neben einer weiteren Tragfähigkeitssteigerung gegenüber dem Versuch aus Reihe 6 ist die Verbindung auch deutlich steifer (ca. 62 % steifer). Auf das gutmütige Verhalten bis ca. 4 mm folgt ein plötzliches Scherversagen im Gurt. Eine allgemeingültige Aussage, dass die Verwendung von Buchenholz zu einer Verdopplung der Tragfähigkeit führt, kann an dieser Stelle nicht getroffen werden. Der Vergleich dreier Versuchsreihen hat allerdings bestätigt, dass eine deutliche Tragfähigkeitssteigerung und eine erhöhte Steifigkeit erzielt werden können.

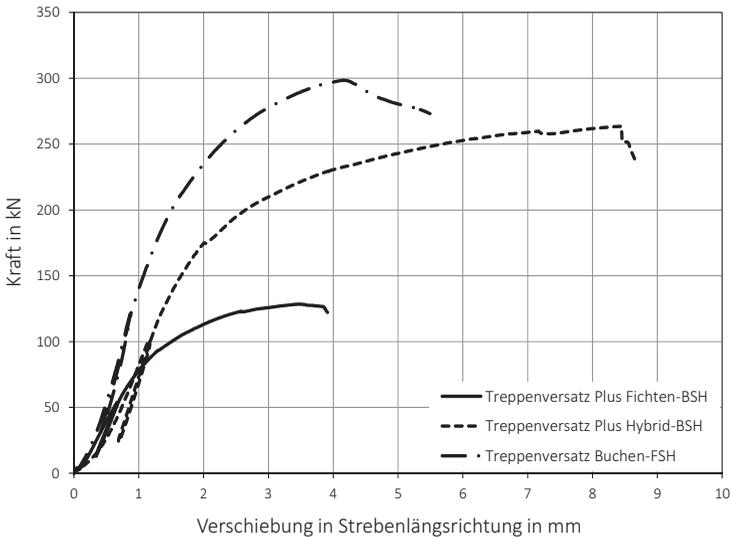


Bild 3-15 Vergleich Fichten-BSH, Hybrid-BSH und Buchen-FSH bezogen auf $b = 100 \text{ mm}$ (Annahme einer linearen Interaktion); $h_s = 100 \text{ mm}$

3.2.4.4.3 Vergleich Anschlusswinkel 35°, 45° und 55°

Die Last-Verformungs-Kurven (Bild 3-16) der drei Versuche aus den Reihen 4, 7 und 8 zeigen die Abhängigkeit des Tragverhaltens vom Strebenanschlusswinkel. Ein spitzer Winkel (Reihe 7 mit $\alpha = 35^\circ$) ermöglicht deutlich höhere Traglasten, birgt aber die Gefahr des Sprödbruchversagens durch Abscheren. Im Gegensatz dazu sind große Verschiebungen bei stumpfen Winkeln (Reihe 8 mit $\alpha = 55^\circ$) zu beobachten. Das duktile Verhalten lässt große Verformungen rechtwinklig zur Faser und somit zur Gurtlängsachse zu, ist jedoch durch ein frühzeitiges Querdruckversagen gekennzeichnet.

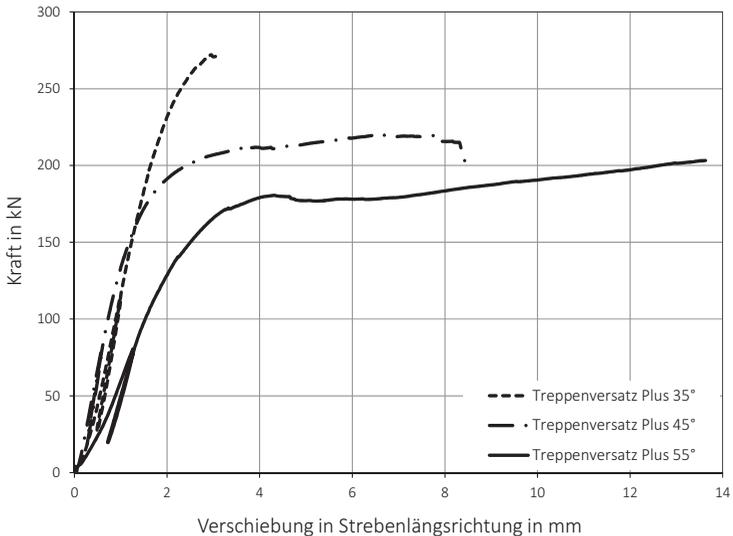


Bild 3-16 Vergleich Anschlusswinkel, $b = 120 \text{ mm}$ und $h_s = 160 \text{ mm}$

3.2.4.4.4 Vergleich Versuchsaufbau

Der Vergleich der Reihen 9 und 10 soll Aufschluss darüber geben, ob eine vereinfachte Versuchskonfiguration vergleichbare Ergebnisse liefert. Insbesondere die Stabilität der Prüfkörper der Reihe 10 während der Lastaufbringung wurde kritisch betrachtet. Steht dem Gurtbauteil eine genügend große Aufstandsfläche zur Verfügung, wie hier in Reihe 10, so lassen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen und die Versuchswerte aus Reihe 9 und 10 sind nahezu identisch. Die Abweichung von ca. 5 % der Tragfähigkeiten F_{max} sind im Hinblick auf die sonst sehr geringen Unterschiede (zwischen 1,6 und 2,4 %) wohl eher den natürlichen Streuungen des Werkstoffs Holz als der unterschiedlichen Versuchskonfigurationen geschuldet, siehe Tabelle 3-8. Die divergierenden Werte der Variationskoeffizienten der Anfangssteifigkeiten (vgl. Tabelle 3-9) verdeutlichen die Streuung innerhalb der einzelnen Reihen. Die nahezu perfekte Übereinstimmung zwischen den zwei Reihen 9 und 10 gilt hier nur für die Mittelwerte.

Tabelle 3-8 Vergleich der Mittelwerte Reihe 9 und 10

Reihe	F_{max} in kN	$F_{1,5mm}$ in kN		k_s in kN/mm	
		Anfang	Wiederbelastung	Anfang	Wiederbelastung
9	276	170	212	149	190
10	291	166	216	146	187
Δ	5,4 %	2,4 %	1,9 %	2,1 %	1,6 %

Der Vergleich zeigt, dass der hohe Arbeitsaufwand durch die Verankerung der Gurte mit Stahlblechen und Schrauben des Aufbaus 1 durch den alternativen Versuchsaufbau 2 umgangen werden kann, wenn für eine ausreichend große Aufstandsfläche und eine damit einhergehende große Gurthöhe gesorgt wird.

3.2.4.4.5 Vergleich Anfangs- und Wiederbelastung

Ein besonderes Augenmerk soll auf den Unterschied zwischen der Anfangs- und Wiederbelastung gelegt werden. Im Mittel ist $F_{1,5mm}$ am Anfang um 20 % geringer als bei Wiederbelastung. Die Bestimmung von $F_{1,5mm}$ bei Wiederbelastung wird aus Bild 3-17 deutlich.

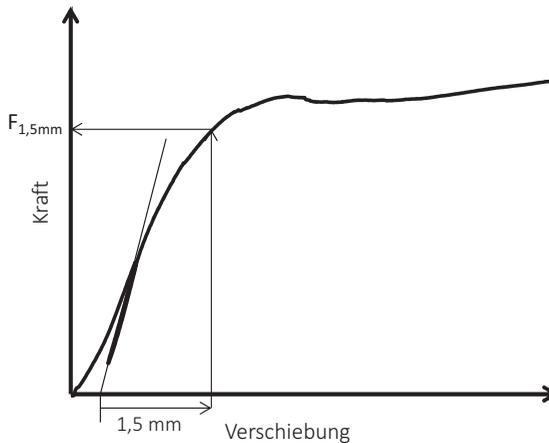


Bild 3-17 Schlupfbereinigung der Kraft-Verschiebungs-Kurve

Durch diese „Schlupfbereinigung“ können Aussagen über die Verbindung einigermaßen unabhängig von der Abbundpräzision getroffen werden. Dass die Passgenauigkeit der Verbindung zu Beginn der Belastung eine signifikante Rolle spielt und das Tragverhalten maßgeblich beeinflussen kann, zeigt Tabelle 3-9. Hierin sind die Variationskoeffizienten v der Kräfte F_{max} und $F_{1,5mm}$ und des Verschiebungsmoduls k_s angegeben. Da beim Treppenversatz erst bei Kontakt aller Treppen zwischen Strebe und Gurt die volle Tragfähigkeit und Steifigkeit erzielt werden kann, sind die relativ hohen Variationskoeffizienten im Anfangszustand aufgrund minimaler Abbundungenauigkeiten innerhalb eines Anschlusses plausibel. Ein offensichtlich passungenauser Abbund (vgl. Bild A-17) kann somit für hohe Werte verantwortlich sein, z. B.

$v = 33,7\%$ für die Kraft bei einer Anfangsverschiebung von 1,5 mm der Reihe 8. Würde dieser Prüfkörper als Ausreißer angesehen werden und nicht Bestandteil der Auswertung sein, so würde sich der Variationskoeffizient auf 15,7 % reduzieren. Auch wenn beim Treppenversatz die Gefahr großer Abweichungen der Steifigkeiten zu Beginn der Beanspruchung besteht, so wird deutlich, dass die Werte bei Wiederbelastung geringeren Schwankungen unterliegen.

Tabelle 3-9 Variationskoeffizienten v in %

Reihe	v von F_{max}	v von $F_{1,5mm}$		v von k_s	
		Anfang	Wiederbel.	Anfang	Wiederbel.
1	11,9	10,2	12,3	14,0	18,3
2	3,2	16,8	4,4	18,5	12,9
3	6,8	20,2	8,3	24,8	23,4
4	7,8	4,1	3,7	7,5	8,5
5	7,0	5,8	3,9	9,6	7,0
6	5,3	10,4	6,3	13,5	13,5
7	10,1	15,9	3,4	7,8	5,8
8	7,8	33,7*	9,8	28,6*	13,7
9	4,3	10,1	4,3	10,4	6,2
10	7,2	26,9	5,6	16,1	6,4
\bar{x}	7,1	15,4	6,2	15,1	11,6

* Schlechter Abbund lässt die Kraft zu Beginn nur über den Stirnversatz ableiten (vgl. Bild A-17)

3.2.5 Bemessungsvorschlag

3.2.5.1 Allgemeines

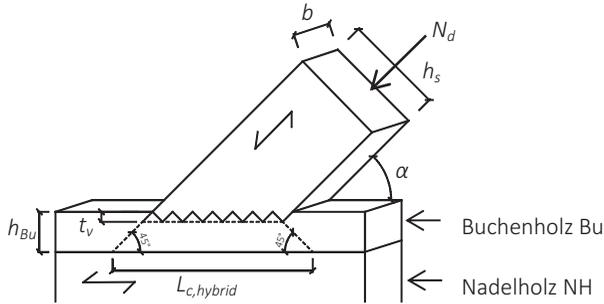
Um den Treppenversatz und den Treppenversatz Plus bemessen zu können, müssen zwei Versagensmechanismen berücksichtigt werden: Querdruck- und Scherversagen. Die Versuchsergebnisse in Kapitel 3.2.4.3 zeigen, dass beide Versagensbilder auch gleichzeitig auftreten können. In den nachfolgenden tabellarischen Auflistungen (Tabelle 3-10, Tabelle 3-11 und Tabelle 3-12) werden Annahmen getroffen, um die Tragfähigkeit eines Treppenversatzes bzw. Treppenversatzes Plus zu bestimmen. Die angegebenen Gleichungen sollen sowohl der baupraktischen Bemessung durch Ingenieure als auch der Ermittlung von Vorhersagewerte von Versatzversuchen dienen.

Tabelle 3-10 Nachweis der Querdrucktragfähigkeit R_c

Treppenversatz und Treppenversatz Plus	
<p>Das Diagramm zeigt einen Treppenversatz auf einer horizontalen Basis. Die Basis hat eine Dicke t_v und eine Länge L_c. Der Versatz hat eine Breite b und eine vertikale Höhe h_s. Der Neigungswinkel des Versatzes ist α. Eine Normalkraft N_d wirkt senkrecht auf der oberen Oberfläche des Versatzes.</p>	
Widerstand in Strebenlängsrichtung	$R_c = \frac{A_c \cdot f_{c,90}}{\sin \alpha} \quad (40)$
Länge der Druckfläche	$L_c = \frac{h_s}{\sin \alpha} \quad (41)$
Druckfläche	$A_c = b \cdot (L_c + 2 \cdot 30 \text{ mm}) \quad (42)$

Tabelle 3-11 Nachweis der Querdrucktragfähigkeit R_c :
Verwendung von Hybrid-BSH

Treppenversatz und Treppenversatz Plus



Widerstand in Streben-
längsrichtung

$$R_c = \min \left\{ \frac{A_c \cdot f_{c,90,Bu}}{\sin \alpha}; \frac{A_{c,hybrid} \cdot f_{c,90,NH}}{\sin \alpha} \right\} \quad (43)$$

Länge der Druckfläche
im Buchenholz

$$L_c = \frac{h_s}{\sin \alpha} \quad (44)$$

Länge der Druckfläche
im Nadelholz

$$L_{c,hybrid} = \frac{h_s}{\sin \alpha} + 2 \cdot (h_{Bu} - t_v) \quad (45)$$

Druckfläche

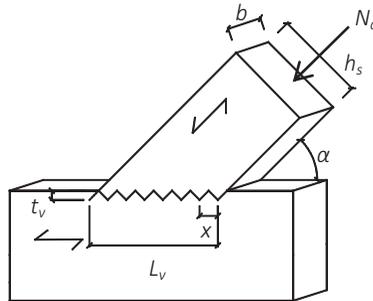
$$A_{c(hybrid)} = b \cdot (L_{c(hybrid)} + 2 \cdot 30 \text{ mm}) \quad (46)$$

Vereinfacht genügt es, bei der Bemessung der Querdrucktragfähigkeit nur die Querdruckfestigkeit $f_{c,90}$ zu berücksichtigen, was gegenüber der Bemessung von Stirn- und Fersenversätzen nach DIN EN 1995/NA einen großen Vorteil darstellt. Des Weiteren wird empfohlen, $k_{c,90} = 1,0$ zu wählen (siehe auch Görlacher 2004), da durch übermäßige Zusammendrückungen der Holzfasern eine Tragfähigkeitsminderung des Gurtes verursacht werden kann. Die Bemessung der Querdrucktragfähigkeit von Verbindungen mit Hybrid-BSH im Gurt unterscheidet sich geringfügig und ist in Tabelle 3-11 angegeben. Es wird festgelegt, dass entweder direkt in der Buchenlamelle ein Querdruckversagen auftreten kann oder unterhalb der Buchenschicht, wobei

von einem Lastausbreitungswinkel von 45° in der Buchenschicht ausgegangen wird. Diese Betrachtung stellt eine konservative Annahme dar, da der Einfluss der Biegesteifigkeit der Buchenlamelle vernachlässigt wird. Zudem sollte ggf. die Tragfähigkeit der Strebe R_{Strebe} (Druck parallel zur Faser) nachgewiesen werden, worauf hier nicht näher eingegangen wird.

Tabelle 3-12 Nachweis der Schubtragfähigkeit R_v

Treppenversatz und Treppenversatz Plus



Widerstand in Strebenlängsrichtung $R_v = \frac{A_v \cdot f_v}{\cos \alpha}$ (47)

Länge der Scherfläche $L_v = \frac{h_s}{\sin \alpha}$ (48)
(Treppenversatz)

$L_v = (n_s + n_f) \cdot x = (n_s + n_f) \cdot \frac{2 \cdot t_v}{\sin(2\alpha)}$ (49)
(Treppenversatz Plus)

Scherfläche $A_v = b \cdot L_v$ (50)

Die theoretische Länge der Scherfläche (vgl. Gleichung (48)) und die theoretische Länge der Querdruckfläche (vgl. Gleichung (41)) sind für den Treppenversatz identisch. Gleichung (48) und (49) in Tabelle 3-12 beschreiben die zur Verfügung stehende Scherflächenlänge und berücksichtigen, dass nicht von einer konstanten Schubspannungsverteilung

lung zwischen Stirn- und erstem Fersenversatz ausgegangen werden kann, da deren Abstand relativ groß werden kann. Der horizontale Abstand x darf somit nur $(n_s + n_f)$ -fach in Rechnung gestellt werden.

Die Tragfähigkeit eines Treppenversatzes ergibt sich somit aus dem Kleinstwert der einzelnen Widerstände und sollte folgendermaßen angenommen werden:

$$R = \min\{R_c; R_v\} \quad (51)$$

für Verbindungen mit Strebe und Gurt aus dem gleichen Material und

$$R = \min\{R_c; R_v; R_{Strebe}\} \quad (52)$$

für Treppenversätze bestehend aus unterschiedlichen Holzarten bzw. Holzwerkstoffen im Streben- und Gurtbauteil. Der Widerstand R_{Strebe} in Gleichung (52) steht für die Drucktragfähigkeit parallel zur Faser im verbindungsnahe Strebenquerschnitt, ohne Berücksichtigung eines möglichen Biegeknickens der Strebe.

3.2.5.2 Schätzlasten

Die experimentelle Prüfung der Versätze nach DIN EN 26891 erfordert im Vorfeld eine Festlegung der geschätzten Höchstlast F_{est} . Die Last F_{est} ist aufgrund von Erfahrungen, Berechnungen oder Vorversuchen zu bestimmen. Die allgemeinen Bemessungsregeln nach Kapitel 3.2.5.1 können hierbei behilflich sein. Zusätzlich können anhand der Versuchswerte die berechneten Werte im Nachhinein validiert werden. Für die in dieser Arbeit verwendeten Materialien sind somit Annahmen für die Festigkeitswerte zu treffen. Dabei bleiben Festigkeitswerte nach aktuellen Normen unberücksichtigt, da realitätsnahe Mittelwerte für die Bemessung der Schätzlast statt der charakteristischen Werte verwendet werden. Nachfolgend sollen die im Rahmen dieser Betrachtung verwendeten Festigkeitswerte Tabelle 3-13 und Tabelle 3-14 definiert werden.

Tabelle 3-13 Annahme von Mittelwerten der Querdruckfestigkeit

Mittlere Querdruckfestigkeit		
NH-BSH (nach EN 408)	$f_{c,90,\bar{x}} = 3,2 \text{ N/mm}^2$	(53)
Der angegebene Mittelwert der Querdruckfestigkeit von BSH aus Nadelholz nach Bogensperger et al. (2011) wurde nach EN 408 bestimmt und ist somit als ein Festigkeitswert bei einer gewissen Stauchung anzusehen. Hierbei wird die Gerade der Anfangssteifigkeit einer Last-Verschiebungs-Kurve um 1 % der geprüften Höhe verschoben und der Schnittpunkt mit der Kurve definiert die Tragfähigkeit und somit die Querdruckfestigkeit des Prüfkörpers.		
NH-BSH (Maximalwert)	$f_{c,90,\bar{x}} = 4,6 \text{ N/mm}^2$	(54)
Um größere Verformungen, die auch bei Versatzversuchen auftreten können, und eine damit einhergehende höhere Querdruckfestigkeit zu berücksichtigen, wird zur Bestimmung der Maximallast F_{max} die Festigkeit nach Gl. (54) angenommen. Dieser Wert wurde aus wenigen Versuchen von Blaß und Enders-Comberg (2012) ermittelt und stellt für diese Betrachtung eine ausreichende Näherung dar.		
Bu-BSH (nach EN 408)	$f_{c,90,\bar{x}} = 9,6 \text{ N/mm}^2$	(55)
Der Wert wurde durch 55 Querdruckversuche an Quadern ohne Überstand von Hübner (2013) ermittelt.		
Bu-FSH (nach EN 408)	$f_{c,90,\bar{x}} = 17,3 \text{ N/mm}^2$	(56)
Der Wert wurde durch 10 Querdruckversuche an Quadern mit stehenden Furnieren ohne Überstand am KIT ermittelt und nach EN 408 ausgewertet.		
Bu-FSH (Maximalwert)	$f_{c,90,\bar{x}} = 20,0 \text{ N/mm}^2$	(57)
Der Wert wurde durch 10 Querdruckversuche an Quadern ohne Überstand am KIT ermittelt und nach der maximal erreichten Last ausgewertet. Die Kraft wirkte in Furnierebenenrichtung und das Versagen wurde durch ein Ausknicken der Furniere begleitet.		

Durch die Angabe zweier Querdruckfestigkeitswerte für ein Material ist es möglich, zwei Schätzlasten zu ermitteln:

$F_{C,GZG,est}$ wird mit den Festigkeiten nach EN 408 bestimmt und soll die Kraft bei einer noch akzeptablen Verformung (vergleichbar mit dem GZG – Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit) bezeichnen

$F_{C,GZT,est}$ wird mit den maximalen Festigkeitswerten bestimmt und gibt die maximal aufnehmbare Kraft, unabhängig von der auftretenden Verformung, an. Dies wird hier als GZT – Grenzzustand der Tragfähigkeit – umschrieben.

Dass diese Annahme durchaus vom Querdruckversagen auf den Treppenversatz angewandt werden kann, zeigt Bild 3-18.

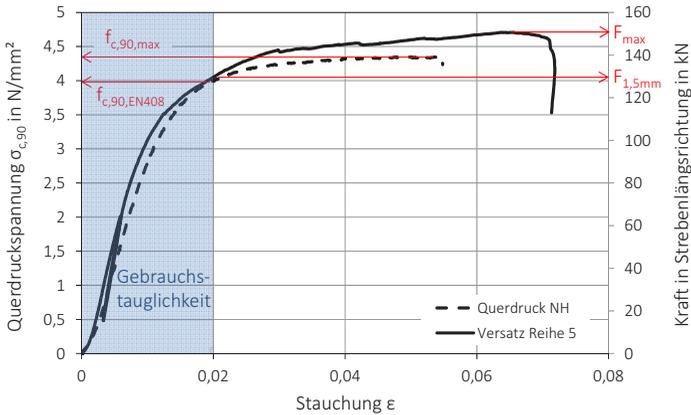


Bild 3-18 Vergleich Querdruck- und Treppenversatzversuch

Hierin sind zwei repräsentative Last-Verformungs-Kurven eines Querdruckversuchs mit BSH aus Nadelholz und ein Versatzversuch aus Reihe 5 dargestellt. Die Querdruckfestigkeitswerte ($f_{c,90,EN408}$ und $f_{c,90,max}$) können nach EN 408 bzw. durch Division der maximal erreichten Last durch die Querschnittsfläche bestimmt werden. Die Kurve des

Versatzes ist sowohl für die primäre als auch für die sekundäre Ordinatenachse gültig. Die zugrunde gelegte Querdruckfläche wurde nach Gl. (42) berechnet. Die Verschiebung rechtwinklig zur Gurtlängsachse (Wegaufnehmer 2, s. Bild 3-11) wurde in die Stauchung ϵ überführt und auf der Abszisse aufgetragen. Die Kraft F_{max} ist dann mit dem Widerstand im GZT vergleichbar, die Kraft $F_{1,5mm}$ beschreibt den Widerstand im GZG bei noch geringen Stauchungen rechtwinklig zur Faser. Neben dem Querdruckversagen spielt auch die Schubbeanspruchung in Versätzen eine große Rolle und sollte bei der Bestimmung der Schätzlasten ebenfalls berücksichtigt werden. Die angenommenen Mittelwerte der Schubfestigkeit für die Schubbemessung sind in Tabelle 3-14 dargestellt.

Tabelle 3-14 Annahme von Mittelwerten der Schubfestigkeit f_v

Mittlere Schubfestigkeiten		
NH-BSH $\sigma_{\perp} = 0 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,\bar{x}} = 4,75 \text{ N/mm}^2$	(58)
NH-BSH $\sigma_{\perp} \leq -4,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,\bar{x}} = 7,3 \text{ N/mm}^2$	(59)
Eine Besonderheit des Treppenversatzes ist, dass durch ein Überdrücken der Scherfläche eine Schub-Querdruckinteraktion berücksichtigt werden sollte, um möglichst zutreffende Schätzlasten zu erhalten. Nach Spengler (1982) gilt für Fichte folgende Beziehung		
$\tau = 4,75 \text{ N/mm}^2 - 1,15 \cdot \sigma_{\perp} - 0,13 \cdot \sigma_{\perp}^2$ mit $R=0,871$		(60)
Bu-BSH $\sigma_{\perp} = 0 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,\bar{x}} = 12,8 \text{ N/mm}^2$	(61)
Mittlere Schubfestigkeit nach Aicher und Ohnesorge (2011) für Bu-BSH ermittelt durch Block-Shear-Test nach DIN EN 392. Als Näherungswert für Randlamellen aus Buche sollte diese Annahme ausreichen.		
Bu-FSH $\sigma_{\perp} = 0 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,\bar{x}} = 10,5 \text{ N/mm}^2$	(62)
Im Rahmen der Zulassungsversuche wurden an der Technischen Universität in München 39 Versuche zur Ermittlung der Scherfestigkeit ohne Querdruckeinfluss durchgeführt und die mittlere Festigkeit nach Gl. (62) bestimmt.		
Bu-FSH $ \sigma_{\perp} \geq 0,5 \cdot \sigma_{\parallel}$	$f_{v,\bar{x}} = 12,9 \text{ N/mm}^2$	(63)
Der Wert mit gleichzeitig wirkender Querdruckkomponente wurde durch 10 Scherprüfungen am KIT ermittelt.		

Die geschätzte Höchstlast eines Schubversagens $F_{v,est}$ kann folglich nach Tabelle 3-12 und Tabelle 3-14 bestimmt werden. Die Definition der maßgebenden Schätzlast F_{est} der gesamten Verbindung ist in Gleichung (64) angegeben.

$$F_{est} = \min\{F_{c,GZT,est}; F_{v,est}\} \quad (64)$$

Tabelle 3-15 Vorhersagewerte, berechnet mit den Festigkeitswerten nach Tabelle 3-13 und Tabelle 3-14 und Versuchswerte

Reihe	$F_{c,GZT,est}$ in kN	$F_{v,est}$ in kN	$F_{max,test,MW}$ in kN	Versagen
4	224	248	216	c
5	157	149	158	c, v
6	204 ¹⁾	261 ²⁾	310	v, S
7	326	273	266	v
8	172	293	203	c
9	570	258	276	v

$F_{c,GZT,est}$	Schätzlast/Vorhersagewert des Querdruckwiderstands
$F_{v,est}$	Schätzlast/Vorhersagewert des Schubwiderstands
$F_{max,test,MW}$	Mittlere experimentell ermittelte Tragfähigkeit
c	Querdruckversagen maßgebend
v	Schubversagen maßgebend (s. Bild A-18 und Bild A-19)
S	u. a. starke Schädigung der Strebe
¹⁾	Rechnerisch maßgebend, aber durch Vernachlässigung des Biege- widerstands der Buchenlamelle sehr konservativ
²⁾	Analog zu Gl. (62) und (63) kann durch Erhöhung der Festigkeit nach Gl. (61) um den Faktor 12,9/10,5 ein $F_{v,est}$ von 320 kN bestimmt wer- den, welches eine Schub-Querdruckinteraktion berücksichtigt. Dieser erhöhte Wert ist im Bild 3-19 dargestellt.

Die nach Tabelle 3-15 und Gleichung (64) maßgebende Schätzlast F_{est} ist im folgenden Diagramm (s. Bild 3-19) den mittleren Maximallasten der Versatzversuche der Reihen 4, 5, 6, 7, 8 und 9 gegenübergestellt.

Die Tragfähigkeiten der Versatzverbindungen der Reihen 5, 8 und 9 werden nach Gleichung (64) leicht unterschätzt. Insgesamt umschreibt der Korrelationskoeffizient von 0,97 eine enge Korrelation zwischen Versuchswerten und Vorhersagewerten und bestätigt die Annahme, dass die vorgeschlagenen Gleichungen zur Bestimmung der Schätzlasten ausreichend genaue Ergebnisse liefern.

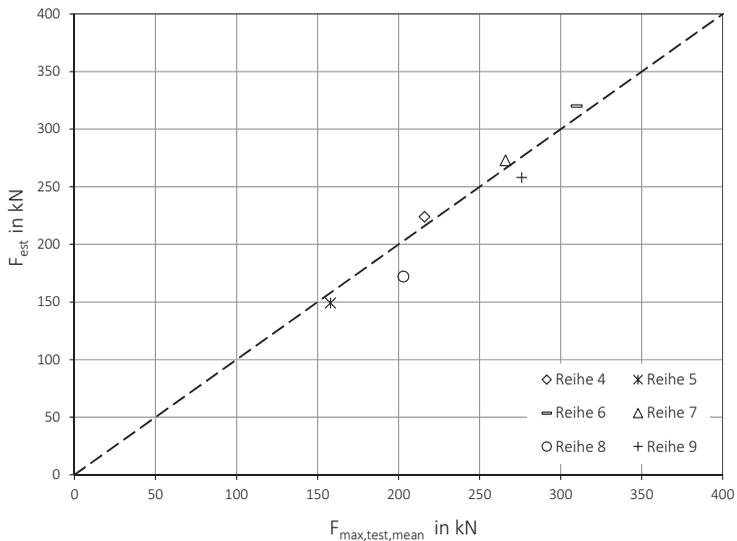


Bild 3-19 Vergleich zwischen Versuchsergebnissen und Vorhersagewerte der mittleren Maximallast

3.2.5.3 Charakteristische Tragfähigkeit

Der Bemessungswert R_d der Beanspruchbarkeit (Tragfähigkeit) einer Verbindung, eines Bauteils oder eines Tragwerks ist nach DIN EN 1995-1-1 wie folgt zu berechnen:

$$R_d = k_{mod} \cdot \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (65)$$

Dabei ist γ_M ein baustoffabhängiger Teilsicherheitsbeiwert und k_{mod} ein Modifikationsbeiwert für die Lasteinwirkungsdauer und Feuchtegehalt des Holzes. Diese Werte sind für den Ingenieurholzbau nach DIN EN 1995-1-1 anzunehmen. In diesem Kapitel soll lediglich auf die Bestimmung des charakteristischen Wertes der Beanspruchbarkeit R_k einer Druckstrebe mit Treppenversatzanschluss eingegangen werden.

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass die Tragfähigkeit eines Treppenversatzes gut mithilfe einer Querdruck- und Schubmessung abgeschätzt werden kann. Auch für die Berechnung der charakteristischen Werte der Tragfähigkeit sollen die Bemessungsansätze aus Kapitel 3.2.5.1 verwendet werden. Für die Festigkeitswerte sind charakteristische Werte einzusetzen, diese sind für Nadel-BSH, Buchen-BSH und Buchen-FSH in Tabelle 3-16, in Anlehnung an die aktuell gültigen Normen und allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen, angegeben.

Die erhöhte Schubfestigkeit $f_{v,k}^*$ beinhaltet den günstigen Einfluss der Querdruckspannung auf die Schubfestigkeit. Dieses Phänomen (s. a. Spengler 1982) wird aktuell schon in weiteren Bemessungsansätzen der gültigen Norm verwandt (z. B. Pultdachträger, Versätze) und soll auch hier genutzt werden. Die Diagramme im nachfolgenden Bild 3-20 und Bild 3-21 zeigen jeweils sechs Kurven, die die charakteristische Beanspruchbarkeit umschreiben. Neben der Querdrucktragfähigkeit $R_{c,90,k}$ wird auch die Schubtragfähigkeit mit und ohne Erhöhung der

Schubfestigkeit ($R_{v,k}$ und $R_{v,k}^*$) dargestellt. Des Weiteren zeigen die gestrichelten Linien die char. Tragfähigkeit der Druckstrebe unter Berücksichtigung eines möglichen Stabilitätsversagens (nach dem Ersatzstabverfahren) für Strebenlängen von zwei, drei, und vier Metern. Die Strebenhöhe h_s kann mithilfe der Gleichung (38) bestimmt werden. Bild 3-20 behandelt einen Treppenversatz aus NH-BSH mit einer konstanten Breite und einem unveränderlichen Anschlusswinkel. Das Bild 3-21 veranschaulicht die charakteristische Beanspruchbarkeit eines Treppenversatzanschlusses aus Buchen-FSH.

Tabelle 3-16 Charakteristische Festigkeitswerte

Material	Norm/AbZ	$f_{c,90,k}$ in N/mm ²	$f_{v,k}$ in N/mm ²	$f_{v,k}^*$ in N/mm ²
NH-BSH (GL 28h)	DIN EN 1194	3,0	2,5	3,5
Bu-BSH (z. B. GL 28h)	Z-9.1-679	8,4	3,4	4,4
Bu-FSH (längslagig)	Z-9.1-838	10,0	9,0	11,7
$f_{c,90,k}$	Charakteristische Querdruckfestigkeit			
$f_{v,k}$	Charakteristische Schubfestigkeit ($k_{cr} = 1,0$)			
$f_{v,k}^*$	Erhöhung der charakteristischen Schubfestigkeit durch Querdrucküberlagerung für $\alpha \geq 30^\circ$ + 40 % für Nadelholz; vgl. Gl. (60) + 30 % für Laubholz; vgl. Gl. (63)			

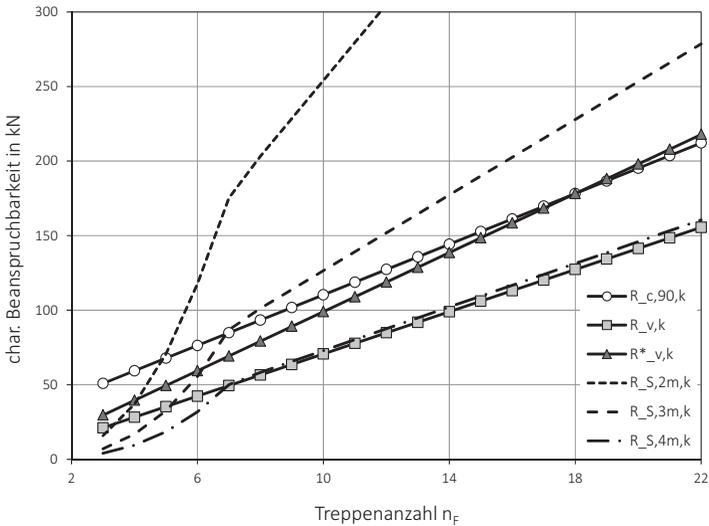


Bild 3-20 Char. Beanspruchbarkeiten für Druckstrebe mit Treppenversatz aus NH-BSH der Breite $b = 100 \text{ mm}$; $\alpha = 45^\circ$ und $t_v = 10 \text{ mm}$

Durch die Vernachlässigung einer Schub-Querdruckinteraktion würde der Schubnachweis ab sieben Treppen (entspricht $h_s = 99 \text{ mm}$) maßgebend werden, selbst eine vier Meter lange Strebe hätte rechnerisch eine höhere charakteristische Tragfähigkeit $R_{S,4m,k}$. Dass bei großen Strebenlängen nicht mehr die Verbindung das kritische Element darstellt, sondern rechnerisch ein Biegeknicken der Strebe auftritt, zeigt Bild 3-21. Hier wird deutlich, dass die hohen Tragfähigkeiten des Treppenversatzes aus Buchen-FSH nur für relativ kurze Druckstreben zu 100 % ausgenutzt werden können. Weitere Diagramme für Winkel von 35° und 55° sind im Anhang (Bild A-23 bis Bild A-26) angegeben. Eine pauschale Aussage, ab wieviel Grad Strebenneigung oder ab welcher Geometrie der Schub- bzw. der Querdrucknachweis maßgebend ist, kann nicht getroffen werden und ist immer im Einzelfall zu untersuchen.

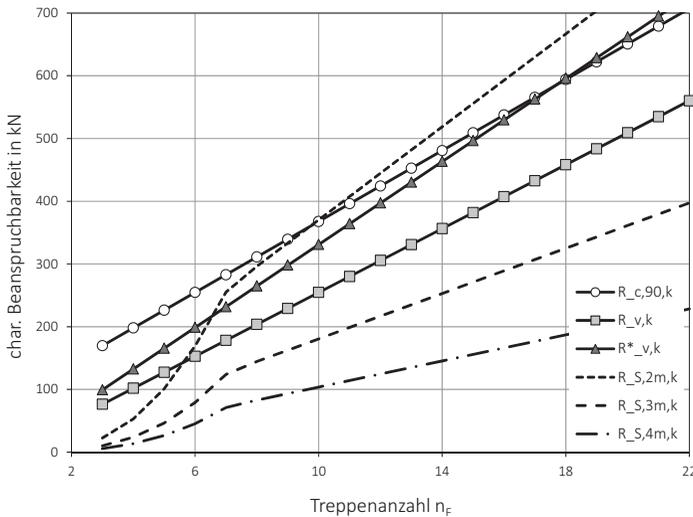


Bild 3-21 Char. Beanspruchbarkeiten für Druckstrebe mit Treppenversatz aus Bu-FSH der Breite $b = 100 \text{ mm}$; $\alpha = 45^\circ$ und $t_v = 10 \text{ mm}$

Allgemein gilt für die charakteristische Tragfähigkeit des Treppenversatzanschlusses:

$$R_{\text{Versatz},k} = \min\{R_{c,90,k}; R^*_{v,k}; R_{\text{Strebe},k}\} \quad (66)$$

Hierbei ist $R_{\text{Strebe},k}$ die charakteristische Tragfähigkeit des Strebenquerschnitts im Bereich der Kontaktverbindung. Für das gesamte Bauteil „Druckstrebe“ muss zudem auch die charakteristische Tragfähigkeit des knickgefährdeten Druckstabes berücksichtigt werden:

$$R_k = \min\{R_{c,90,k}; R^*_{v,k}; R_{S,k}\} \quad (67)$$

Die nachfolgende Tabelle 3-17 verdeutlicht das hohe Potenzial der Treppenversatzverbindung und die positive Wirkung der zentrischen Krafteinleitung gegenüber einer Druckstrebe mit ausmittigem Stirnversatz, was ein zusätzliches Moment im Strebenbauteil verursacht

und die Tragfähigkeit der Strebe $R_{S,k}$ deutlich reduziert, vgl. Bild 3-22. Wie aus Bild 3-21 ersichtlich, ist gerade das Buchen-FSH dazu prädestiniert, die volle Tragfähigkeit der Strebe auszunutzen, sodass $R_{S,k}$ bei der Bestimmung von R_k nach Gleichung (67) maßgebend wird.

Tabelle 3-17 Vergleich der charakteristischen Tragfähigkeiten; 100 x 100 mm Strebenquerschnitt, 45° Anschlusswinkel

Versatz	$R_{Versatz,k}$ in kN	$R_{S,k}$ in kN		
		$L_s = 1$ m	$L_s = 2$ m	$L_s = 3$ m
Stirnversatz (GL 28h)	51	89*	76*	53*
Treppenversatz (GL 28h)	70	255	180	90
Treppenversatz (Bu-FSH)	234	400	263	128

L_s	Strebenlänge
$R_{Versatz,k}$	Char. Tragfähigkeit der Verbindung nach Gl. (66)
$R_{S,k}$	Char. Tragfähigkeit des Druckstabes nach dem Ersatzstabverfahren
*	Berücksichtigung der Ausmitte $f = 0,5 \cdot (h_s - t_v)$; vgl. Bild 3-22

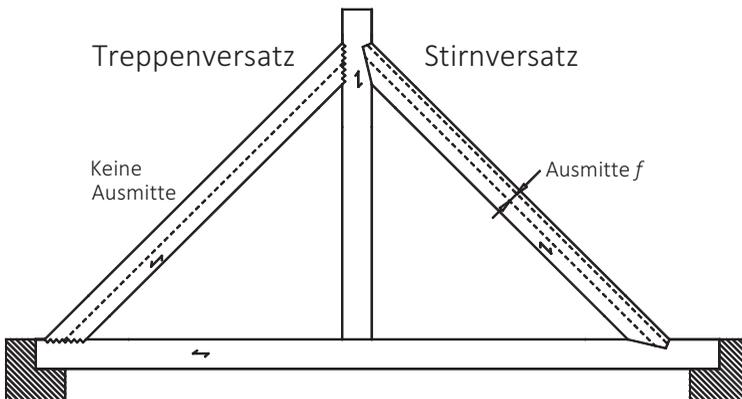


Bild 3-22 Verdeutlichung der Ausmitte f in einem Hängewerk

Ein Vergleich der charakteristischen Tragfähigkeiten der untersuchten Versätze (Reihe 4 bis 10) nach Gleichung (66) mit der durch die Versuche bestimmten mittleren Tragfähigkeit zeigt, dass kein Versuchswert den berechneten Wert unterschreitet. Der Quotient aus F_{max} und $R_{Versatz,k}$ liegt für die betrachteten Versätze aus Nadel-BSH (Reihe 4, 5, 7 und 8) zwischen 1,6 und 1,9. Für das untersuchte Hybrid-BSH ergibt sich rechnerisch ein Quotient von 3,4. Die sehr konservativ anzusetzende Schubfestigkeit für Buchen-BSH ist ausschlaggebend für die im Vergleich zum Versuchswert geringe charakteristische Tragfähigkeit nach Gleichung (66). Im Gegensatz dazu darf nach Tabelle 3-16 eine deutlich höhere Schubfestigkeit für Buchen-FSH angenommen werden, sodass der Quotient aus der Maximallast und der charakteristischen Tragfähigkeit für die Reihen 9 und 10 bei ca. 1,2 liegt.

3.2.5.4 Steifigkeit und Zusatzmoment

In der früher gültigen DIN 1052:1988 wird darauf hingewiesen, dass bei Kontaktanschlüssen von Diagonalstäben an die Gurte die Eindrückungen, hervorgerufen durch unvermeidbare Passungenauigkeiten bei der Herstellung oder durch Beanspruchungen der Gurte rechtwinklig zu den Fasern, abzuschätzen und bei der Berechnung zu berücksichtigen sind. Für Versätze kann für jeden Anschluss eine Verschiebung von etwa $\Delta_i = 1,5$ mm angenommen werden. Daraus ergibt sich für den Treppenversatz ein Verschiebungsmodul von

$$K_{ser} = \frac{R_{Versatz,k}}{\Delta_i} = \frac{R_{Versatz,k}}{1,5 \text{ mm}} \quad (68)$$

unter der Annahme, dass die Verschiebung von 1,5 mm bei dem Erreichen der charakteristischen Tragfähigkeit auftritt. Dies stimmt für die untersuchten Versatzanschlüsse im Mittel gut mit den Versuchsergebnissen überein.

Die ausführlichen Erläuterungen (Brüninghoff et al. 1989) zu DIN 1052 der Ausgabe 1988 zeigen eine weitere Problematik des Stirnversatzes

bei Auflagersituationen wie in Bild 3-22 gezeigt. Die Detailansicht des rechten Auflagers ist in Bild 3-23 dargestellt. Nach Brüninghoff et al. (1989) „muss bei solchen Auflagerpunkten, bei denen mit Rücksicht auf die Vorholzlänge ein Zusatzmoment der Auflagerkraft nicht vermieden werden kann, im Querschnitt A – A das Moment

$$M = V \cdot e - D \cdot \cos \alpha \cdot 0,5 \cdot (h - t_v) \quad (69)$$

berücksichtigt werden.“

Durch die Verwendung des Treppenversatzes kann die Ausmitte e bei Auflagerpunkten deutlich reduziert werden. Folglich ist das beschriebene Zusatzmoment nach Gleichung (69) verschwindend gering, so dass es in der statischen Berechnung vernachlässigt werden kann.

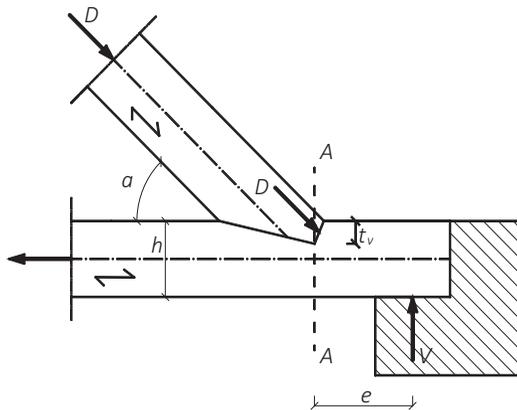


Bild 3-23 Auflager mit ausmittigem Strebenanschluss mittels Stirnversatz nach Brüninghoff et al. (1989)

3.2.6 Zusammenfassung

Der Treppenversatz stellt eine Verbindungsmöglichkeit zwischen zwei Bauteilen dar, die in einem Winkel zwischen 30° und 60° zueinander

angeordnet sind. Bei langen Druckstäben erreicht oder überschreitet die Tragfähigkeit des Treppenversatzes diejenige der angeschlossenen Druckstrebe. Die Auswertung der Versuchsdaten zeigt, dass die Herstellung und der Einsatz eines Treppenversatzes als Kontaktanschluss realisierbar sind und gegenüber den bisher gängigen Versatzanschlüssen wesentliche Vorteile aufweist. Die sehr steife Kontaktverbindung kann hohe Druckkräfte aus einem Stab in ein weiteres Bauteil einleiten und bildet eine Alternative zu stiftförmigen Verbindungsmitteln in z. B. Fachwerkträgern, Hängewerken oder Kopfbändern. Neben höheren Traglasten können auch größere Verschiebungen vor dem Erreichen der Tragfähigkeit von der Verbindung aufgenommen werden. Dieses duktile Versagen wird bei relativ großen Anschlusswinkeln erreicht. Durch die Verwendung von Buchenrandlamellen im Gurtbauteil oder von Buchen-FSH kann die Tragfähigkeit gegenüber homogenem BSH aus Nadelholz verdoppelt werden. Die Verwendung von Buchenholz bedeutet somit eine effiziente Verstärkung des Treppenversatzes. Passungengenauigkeiten sind kritisch zu betrachten, da diese sich signifikant auf die Anfangssteifigkeit der Verbindung auswirken können. Allerdings ist diese Beobachtung bei wenigen Fersen ausgeprägter als bei einer Verbindung mit kleiner Einschnitttiefe und einer maximalen Fersenanzahl.

Da der Verhältniswert von Querdruck- zu Schubfestigkeit von Nadelholz deutlich kleiner ist als der Wert von Buchenholz, wurde bei den Versuchen mit BSH aus Nadelholz häufig ein Querdruckversagen und bei Versuchen mit Buchenholz zumeist ein Schubversagen beobachtet. Ein Scherversagen des Fichten-BSH trat nur beim Anschlusswinkel $\alpha = 35^\circ$ vermehrt auf. Kann durch den passgenauen Abbund eine formschlüssige Verbindung in Form eines Treppenversatzes hergestellt werden, so steht eine ausreichend gute Verzahnung zur Verfügung, um hohe Kräfte gleichmäßig in das Gurtbauteil zu übertragen. Die Erfahrungen während des Abbundes und der Versuche haben gezeigt, dass der Treppenversatz dem Treppenversatz Plus bevorzugt

werden sollte, da dieser herstellungstechnische Vorteile mit sich bringt und sich die Gefahr von ungewollt auftretenden Quersugrissen zwischen Stirn- und dem ersten Fersenversatz minimieren lässt.

Zusammengefasst lässt sich der Treppenversatz durch folgende positive Eigenschaften umschreiben:

- Hohe Steifigkeit und Tragfähigkeit
- Gute Querschnittsausnutzung
- Kurze erforderliche Vorholzlängen
- Keine Ausmitte im Druckstab
- Geringe Auflagerausmitte durch Strebenanschluss
- Einfache Bemessung durch Querdruck- und Schubnachweis
- Geringe Querschnittsschwächung des Gurtes
- Positives Verhalten im Brandfall
- Einfache Montage
- Nutzung von CNC-Abbundmaschinen
- Buchenholz im Randbereich des Gurtes wirkt signifikant tragfähigkeitssteigernd

3.3 Mehrfachzapfen und Schwalbenschwanz

3.3.1 Allgemeines

Holz-Glas-Fassaden, bei denen die tragenden Bauteile aus Holz durch die Isolierverglasung vor Witterungseinflüssen geschützt sind, haben in den vergangenen Jahren in der Architektur stark an Bedeutung gewonnen. Es gibt eine Vielzahl von zugelassenen Systemen für die Verbindung zwischen Riegeln und Pfosten. Von technischer Bedeutung sind steife und tragfähige Verbindungen zwischen den vertikalen Fassadenpfosten und den horizontalen Riegeln. Bedingt durch die gesetzlich festgelegten wärmetechnischen Anforderungen für Neubauten werden die Ausfachungen von Holz-Glas-Fassaden heutzutage in der Regel mit Mehrscheiben-Isolierglas vorgenommen. Zudem erfordern ästhetisch anspruchsvolle Vorstellungen der Architekten und Bauherren eine besondere Beachtung des optischen Eindrucks der Konstruktion.

Die höheren Belastungen bei gleichzeitig möglichst schlanken Bauteilen waren Anlass, innovative Zapfen- und Schwalbenschwanzverbindungen für Pfosten-Riegel-Konstruktionen aus Buchenbrettschichtholz (Bu-BSH) zu untersuchen. Damit werden Alternativen zu gängigen Verbindungssystemen geschaffen und gleichzeitig ein für das Buchenholz prädestiniertes Einsatzfeld erschlossen.

Die besondere Beachtung der Ästhetik und das Streben nach wenigen Verbindungsmitteln ist für den Ingenieurholzbau untypisch, bietet aber neue Möglichkeiten, insbesondere um die guten mechanischen Eigenschaften der Buche zu nutzen. In Bild 3-24 ist ein Pfosten-Riegel-Knotenpunkt mit beschrifteten Bauteilen dargestellt. Grundsätzlich können unterschiedliche Lasten zeitgleich oder separat auf die Konstruktion wirken und so die Verbindung zwischen Pfosten und Riegel

beanspruchen. Die zu berücksichtigenden Lasten auf den Riegel sind im Wesentlichen:

- Ständige Lasten (insbesondere Eigengewicht Glas)
- Windlast (kann im Gebäudeeckbereich auch Kräfte in Riegel-längsachse bewirken)
- Horizontale Nutzlasten

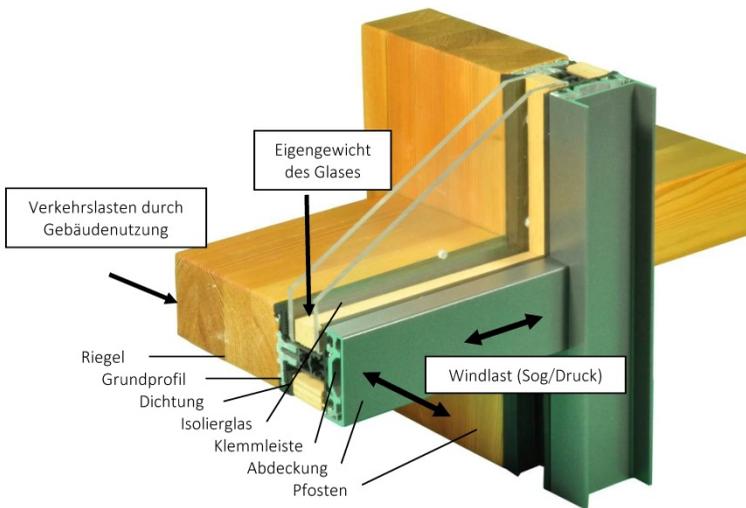


Bild 3-24 Pfosten-Riegel-Knotenpunkt mit angreifenden Kräften

Durch die exzentrische Belastungssituation infolge des Glasgewichts wird die Verbindung zwischen Pfosten und Riegel durch ein Torsionsmoment und eine Querkraft beansprucht. Insbesondere die Tragfähigkeit und Steifigkeit in Bezug auf diese Torsionsbeanspruchung wurde anhand mehrerer Kontaktverbindungen experimentell untersucht. Die Beschreibung und die Ergebnisse dieser Versuche sind im Folgenden angegeben. Der Vergleich der Schwalbenschwanzverbindung mit den Mehrfachzapfen-Varianten in Kapitel 3.3.2 zeigt, dass

die Ausbildung einer Schwalbenschwanzverbindung wesentliche Vorteile bietet und im Gegensatz zu den Mehrfachzapfenverbindungen eine baupraktische Verwendung der Verbindung begünstigt. Aufgrund dessen wurde in weiteren Untersuchungsschritten das Hauptaugenmerk auf die Schwalbenschwanzverbindungen gelegt und die Mehrfachzapfenverbindungen nicht weiter untersucht. In Kapitel 3.3.3 werden vier verschiedene auf die Verbindung einwirkende Lastfälle experimentell untersucht und die Ergebnisse dargestellt.

3.3.2 Varianten möglicher Zapfenverbindungen

3.3.2.1 Material

Zur Bestimmung des Trag- und Verformungsverhaltens von Pfosten-Riegel-Verbindungen mit identischen Querschnitten ($B / H = 200 \text{ mm} / 50 \text{ mm}$) bei einer Vertikalbeanspruchung 15 mm vor der Riegelvorderkante wurden insgesamt 20 Versuche durchgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchungsserie wurden vier Verbindungsvarianten (vgl. Tabelle 3-18) berücksichtigt:

- Variante 1: Mehrfachzapfen mit 9 Zapfen der Höhe 10 mm
- Variante 2: Mehrfachzapfen mit 6 Zapfen der Höhe 15 mm
- Variante 3: Mehrfachzapfen mit 6 Zapfen der Höhe 15 mm mit Einschubkanal
- Variante 4: Schwalbenschwanzverbindung

Ein Versuchskörper besteht aus einem Riegel- und zwei Pfostenbauteilen, die ineinandergesteckt werden und mit in das Hirnholz der Riegel eingebrachten Teilgewindeschrauben in der Lage gesichert sind, s. Bild 3-25. Für die Pfosten und Riegel wurde Buchenbrettschichtholz der Festigkeitsklasse GL 40h hergestellt. Das verwendete Material hatte eine mittlere Holzfeuchte von 8,2 %, eine mittlere Rohdichte von 708 kg/m^3 und einen mittleren Elastizitätsmodul von 15500 N/mm^2 . Für die Herstellung des Brettschichtholzes bei ca. 21°C

und 55 % rel. Luftfeuchte wurde der Klebstoff Kauramin® 683 und der Härter Kauramin® 688 verwendet.

Tabelle 3-18 Untersuchte Varianten, Maße in mm

Variante	Geometrie	
1		
2		
3		
4		

3.3.2.2 Prüfmethode

Das gesamte Versuchsprogramm umfasst die in Tabelle 3-18 dargestellten vier Reihen à 5 Einzelversuche. Durch den symmetrischen Aufbau der Versuchskörper wurden insgesamt 40 Verbindungen geprüft. Der Versuchskörper (s. Bild 3-26) wird an den oberen und unteren Stützenenden durch Stahlprofile und Gewindestangen gehalten, sodass die Vertikalkraft durch einen Stahlrahmen, welcher die Glascheibe darstellen soll, mit insgesamt 115 mm horizontaler Ausmitte zur Riegel längsachse auf die obere Riegelvorderkante aufgebracht werden kann. Neben der Verschiebung des Stahlrahmens Δ_{oben} wird auch die Absenkung der Riegelvorderkante gegenüber dem Pfosten Δ_{vorne} gemessen. Die Kontaktverbindungen werden in Anlehnung an DIN EN 26891 bis zum Versagen geprüft, sodass sich eine Anfangs- und eine Wiederbelastungssteifigkeit bestimmen lassen.

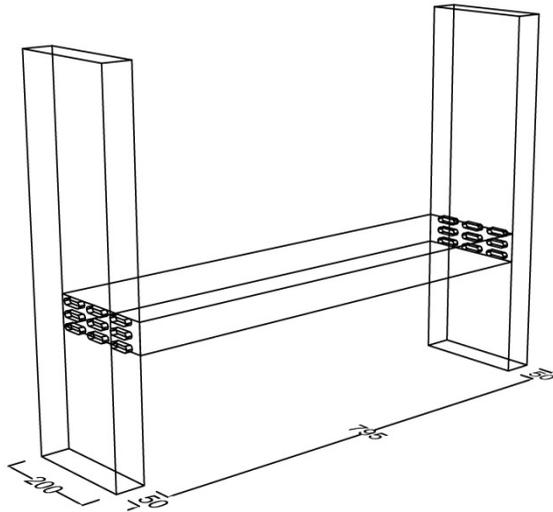


Bild 3-25 Schematische Darstellung des Prüfkörpers (Variante 1);
Maße in mm

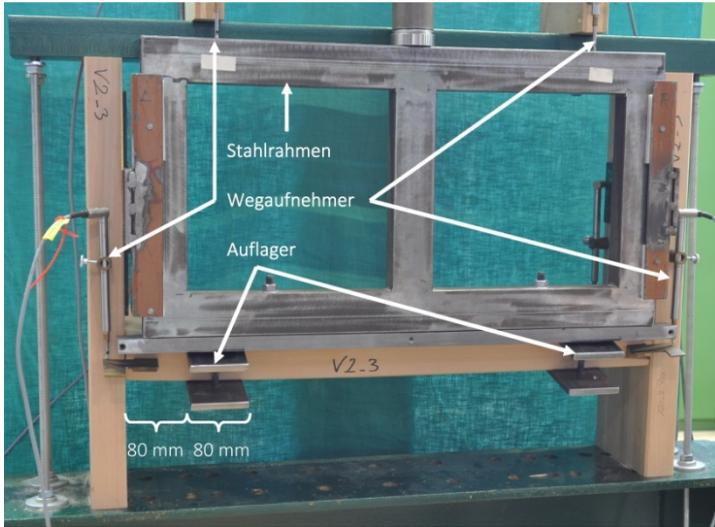


Bild 3-26 Versuchsstand – Vorversuche Glaslast

3.3.2.3 Ergebnisse

Die mittleren Versuchsergebnisse in Bezug auf die Verschiebung der Oberkante des Stahlrahmens („oben“) und der Vorderkante des Riegels („vorne“) sind in Tabelle 3-19 dargestellt. Hierbei ist jeweils die Kraft pro Verbindung angegeben.

Tabelle 3-19 Mittelwerte der Versuchsergebnisse – Vorversuche Glaslast

Variante	Anzahl Verbindungen	F_{max} * in kN	F in kN bei 1,0 mm		F in kN bei 4,0 mm		$k_{s,Anfang}$ in kN/mm	
			Δ_{oben}	Δ_{vorne}	Δ_{oben}	Δ_{vorne}	Δ_{oben}	Δ_{vorne}
1	10	18,2	2,20	5,40	8,41	14,3	2,07	5,32
2	10	17,4	2,36	5,25	8,01	14,6	1,94	4,86
3	10	16,9	1,53	3,44	6,37	12,6	1,68	4,14
4	10	21,1	2,47	10,4	9,29	19,8	2,35	11,9

* F_{max} gilt nur für die maßgebende Verbindung innerhalb eines Versuchs (N = 5)

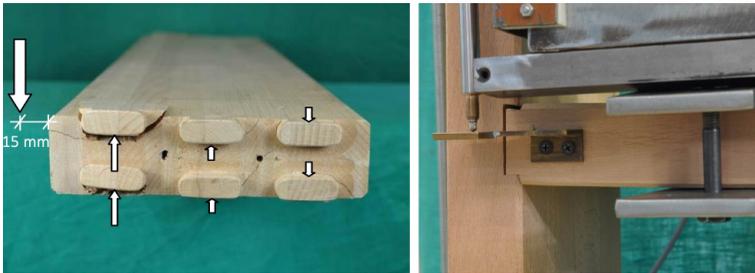


Bild 3-27 Typisches Versagensbild des Riegels der Variante 2 (links) und Variante 4 (rechts)

Die Maximallast der Mehrfachzapfenverbindung ist durch die Tragfähigkeit der Einzelzapfen begrenzt. Die auf die Einzelzapfen wirkenden idealisierten Vertikalkräfte sind in Bild 3-27 (links) für eine Verbindung der Variante 2 dargestellt. Die Zapfenverbindungen weisen lokales Quersugversagen im Bereich der Ausklinkung der vorderen Zapfen auf. Am unteren Zapfen ist zudem ein ausgeprägtes Querdruckversagen zu beobachten. Bei den Schwalbenschwanzverbindungen wurden häufig neben dem Querdruckversagen auch Quersugrisse parallel zur Riegelängsachse, beginnend an der unteren Zapfenausklinkung, oder ein Schubbruch in Riegelmitte in Verbindungsnähe beobachtet. Variante 4 weist deutlich größere Tragfähigkeits- und Steifigkeitswerte im Vergleich zu den anderen untersuchten Konfigurationen auf. Insbesondere die zur Riegelvorderkante zugehörigen Werte erscheinen vielversprechend. Weitere Details des Last-Verformungs-Verhaltens der Einzelversuche sind den Diagrammen des Anhangs (Bild A-27 bis Bild A-30) zu entnehmen.

3.3.2.4 Diskussion

Die dauerhaft wirkende und ausmittig angreifende Eigenlast der Scheibe verursacht ein Torsionsmoment und eine Vertikalbeanspruchung im Riegel. Diese Belastung muss von der Verbindung verformungsarm und zuverlässig an die Pfosten weitergegeben werden. Die

im Rahmen dieses Projektes bisher durchgeführten Versuche zielen auf dieses Kriterium „Absenkung der Glasscheibe“ ab, vgl. Bild 3-28. Die maximal aufnehmbare Kraft spielt bei Pfosten-Riegel-Verbindungen nur eine untergeordnete Rolle, entscheidend ist die Steifigkeit der Verbindung bis ca. 4 mm Vertikalverschiebung der simulierten Glasscheibe.

Das Prüfverfahren nach DIN EN 26891 berücksichtigt eine Entlastungsphase, sodass auch Daten gewonnen werden, die etwas über das Wiederbelastungsverhalten der Verbindung aussagen, vgl. Bild 3-29. Der Vergleich der Steifigkeiten im Anfangs- und Wiederbelastungsbereich in Tabelle 3-20 zeigt, dass insbesondere die Verformung an der Riegelvorderkante signifikant von einer Vorbelastung abhängig ist. Die Wegaufnehmer oben am Stahlrahmen messen neben der eigentlichen Verdrehung des Riegels zusätzliche Verformungen wie z. B. solche, die aus der Prüfvorrichtung resultieren und nicht direkt mit dem Pfosten-Riegel-Anschluss in Verbindung gebracht werden können. Die Tragfähigkeit von bis zu 21,1 kN pro Verbindung zeigt, dass weniger die Standsicherheit einer Holz-Glas-Fassade entscheidend ist, vielmehr sind große Verformungen für die Glasscheiben als kritisch anzusehen.

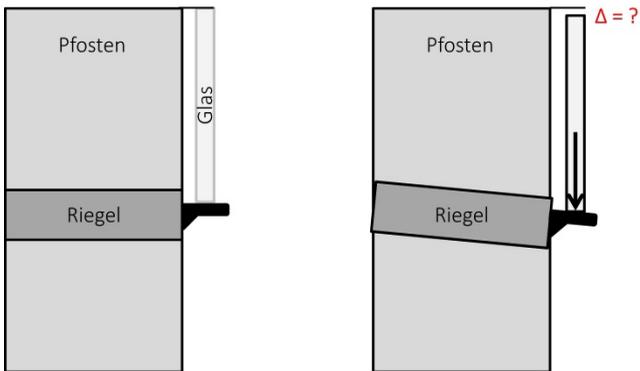


Bild 3-28 Verdrehung des Riegels aufgrund des durch die Glaslast entstehenden Torsionsmomentes

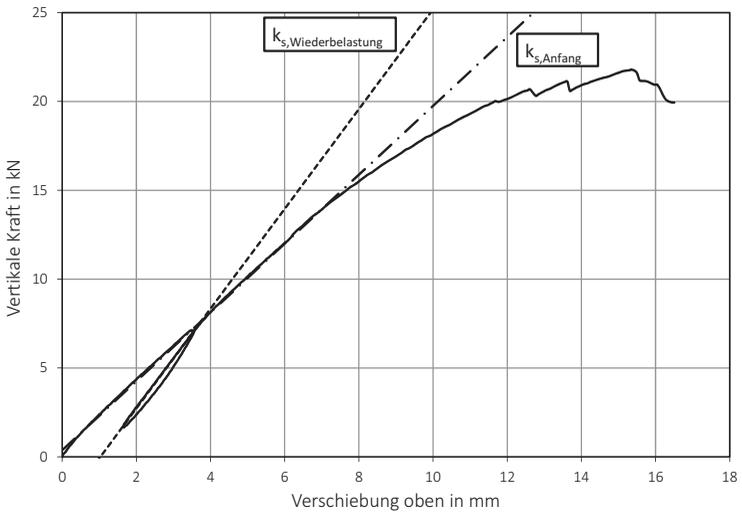


Bild 3-29 Typisches Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Schwalbeschwanzverbindung (Variante 4) mit Verschiebungsmoduln im Anfangs- und Wiederbelastungsbereich

Tabelle 3-20 Vergleich der mittleren Steifigkeiten

Variante	Oben	Vorne
	$\frac{k_{s,Wiederbelastung}}{k_{s,Anfang}}$	$\frac{k_{s,Wiederbelastung}}{k_{s,Anfang}}$
1	1,5	3,0
2	1,5	2,3
3	1,6	2,6
4	1,4	3,4

3.3.2.5 Zwischenfazit

Die hohen Tragfähigkeiten und Steifigkeiten der Kontaktverbindungen begünstigen den Einsatz von Buchenholz in Holz-Glas-Fassaden. Allerdings sollte neben theoretischen und wissenschaftlichen Fragestellungen auch die Alltagsauglichkeit für den baupraktischen Einsatz berücksichtigt werden. Während des Abbundes wurde deutlich, dass die Mehrfachzapfen in der Programmierung der Abbundmaschine und beim Abbund selbst zeitintensiver sind. Zudem müssen die Bauteile mit einem geringen Untermaß hergestellt werden und ggf. die Kanten der Zapfen leicht abgeschliffen werden, um ein zwängungsfreies Zusammenfügen der Bauteile zu ermöglichen. Die Schwierigkeit des Zusammenfügens bei Mehrfachzapfen auf der Baustelle besteht darin, dass die Riegel nicht wie gängige Pfosten-Riegel-Systeme von der Gebäudeaußenseite eingeschoben werden können. Die Montage sieht vor, dass ein Pfosten aufgestellt werden muss, um dann einen Riegel einseitig einzuschieben bevor der nächste Pfosten platziert werden kann. Eine Teillösung würde ein zweiteiliger Pfosten bieten, sodass einzelne Segmente vorgefertigt werden könnten. Die Zapfenverbindung der Variante 3 ist so konzipiert, dass durch einen Einschubkanal der Riegel montiert werden kann und anschließend der Kanal durch eine Leiste verschlossen wird. Dieser Lösungsansatz stellt theoretisch einen guten Kompromiss dar, erfordert aber einen fehlerfreien Abbund der Bauteile und verzeiht keine Schwind- bzw. Quellverformungen vor der Montage. Die Schwalbenschwanzverbindung scheint für den Einsatz als Pfosten-Riegel-Verbindung die beste Lösung zu sein und bietet folgende positive Eigenschaften:

- Gängige Geometrie für CNC-Abbundmaschinen
- Montagefreundlich durch einfaches Einschieben der Riegel
- Robuste Verbindung
- Hohe Tragfähigkeiten und Steifigkeiten

3.3.3 Experimentelle Untersuchung der Schwalbenschwanzverbindung

3.3.3.1 Allgemeines

Die Voruntersuchungen (vgl. Kapitel 3.3.2) mit vier verschiedenen Zapfengeometrien haben gezeigt, dass ein Schwalbenschwanz-Kontaktanschluss (Variante 4) vielversprechende Ergebnisse liefert und sowohl gute Tragfähigkeitswerte aufweist als auch eine steife Verbindung zwischen Stütze und Pfosten ermöglicht. Innerhalb dieses Kapitels soll die Schwalbenschwanzverbindung für vier unterschiedliche Lastfallsituationen für den Einsatz in einer Holz-Glas-Fassade untersucht und folgende Parameter variiert werden:

3.3.3.1.1 Bauteiltiefe T (100 mm, 150 mm und 200 mm)



Bild 3-30 Variation der Bauteiltiefe (100 mm, 150 mm und 200 mm) bei gleichbleibender Bauteilbreite (50 mm)

Tannert et al. (2011) geben an, dass ein optimales Tragverhalten bei einer Schwalbenhöhe von ca. $\frac{2}{3}$ der Balkenhöhe erzielt wird. Zudem wird festgestellt, dass die Tragfähigkeit nahezu unabhängig vom Flankenwinkel des Zapfens ist. Die hier gewählten Schwalbenhöhen

(80 mm, 125 mm und 170 mm) nehmen 80 bis 85 % der vorhandenen Riegelhöhe ein und weichen somit vom empfohlenen 2/3-Wert ab, vgl. Bild 3-30. Die größeren Schwalbenmaße wurden so gewählt, da hier die vorwiegende Belastungsrichtung rechtwinklig zur Einschubrichtung verläuft und nicht wie gewöhnlich in Einschubrichtung der Schwalbenschwanzverbindung.

3.3.3.1.2 Untermaß

Mögliche Passungenauigkeiten durch Schwinden der Bauteile (im Folgenden als „Untermaß“ bezeichnet) werden durch einen veränderten Abbund der Zapfenlöcher vorgenommen, s. Bild 3-31. Hierbei wird das Zapfenloch geringfügig (ca. 0,5 mm) größer gefräst, sodass ein Einschieben des Riegels ohne Kraftaufwand möglich ist, gleichzeitig der Reibwiderstand in den Flankenfugen nicht zur Verfügung steht, welcher ein Herausrutschen im Montagezustand verhindern würde.

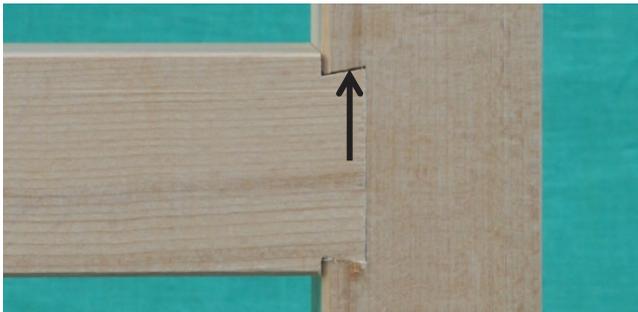


Bild 3-31 Herstellung der Zapfen mit einem Untermaß (ca. 0,5 mm)

3.3.3.1.3 Berücksichtigung NKL 1 und NKL 2

Versuchsergebnisse mit Buchenholz der NKL 1 (ca. 9,5 % Holzfeuchte) wurden Ergebnissen von Prüfkörpern der NKL 2 (ca. 16 % Holzfeuchte) gegenübergestellt.

3.3.3.1.4 Verstärkungsschrauben

Zur Lagesicherung entgegen der Einschubrichtung wurden Holzschrauben in die Flankenfugen eingebracht (im Folgenden als „V-Sr“ bezeichnet). Die schematische Darstellung für eine Schwalbenschwanzverbindung mit der Bauteiltiefe $T = 100$ mm und eingebrachten V-Schrauben ist in Bild 3-32 gezeigt.

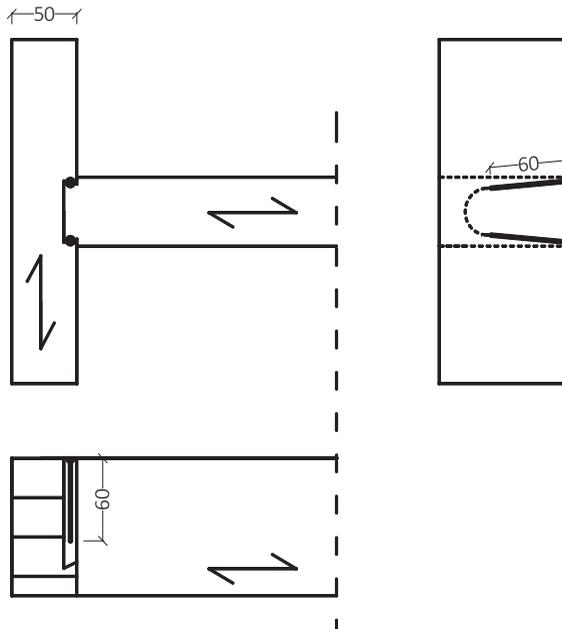


Bild 3-32 V-Verschraubung: Zwei 60 mm lange Teilgewindeschrauben (Hapatec Inox® Edelstahl gehärtet 4,0 x 60) ohne Vorbohren zur Lagesicherung in Einschubrichtung eingebracht

Von insgesamt 90 eingebrachten V-Schrauben waren 59 % (53 Stück) nahezu vollständig und mittig in der Fuge. 27 % bzw. 24 Stück waren teilweise in der Fuge und 14 % (13 Stück) sind so im Holz verlaufen, dass lediglich ein Teil des Schafts und der Schraubenkopf der Fuge zuzuordnen waren.

Zur Lagesicherung in Riegellängsrichtung wurden gekreuzte Vollgewindeschrauben (im Folgenden als „X-Sr“ bezeichnet) eingebracht, s. Bild 3-33. Ein Vorbohren ist hier unerlässlich.

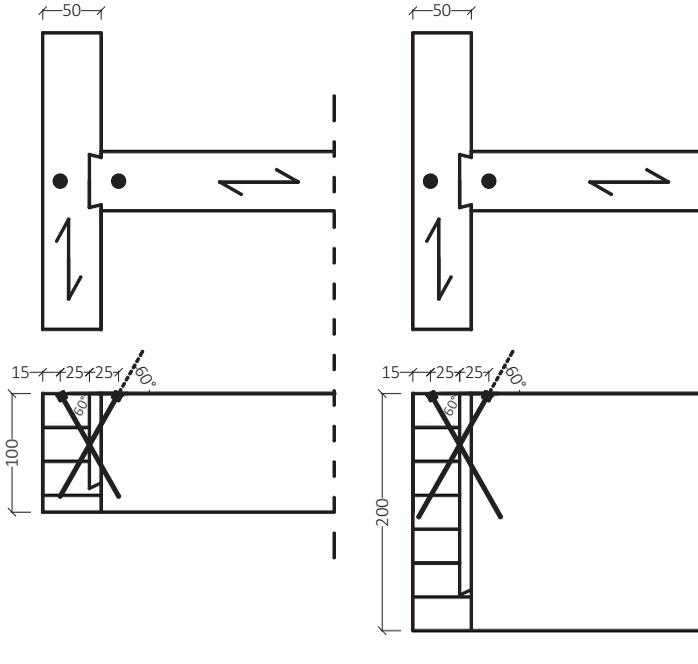


Bild 3-33 Gekreuzte Verschraubung (X-Sr); Würth ASSY® plus 6 mm mit 4 mm Vorbohrdurchmesser. 100 bzw. 120 mm Länge zur Lagesicherung in Riegellängsachse

3.3.3.1.5 Holzart

Die Holzart Fichte wurde in der Versuchsreihe „Lastfall Glaslast“ (Kapitel 3.3.3.2) der Holzart Buche gegenübergestellt, Bild 3-34.

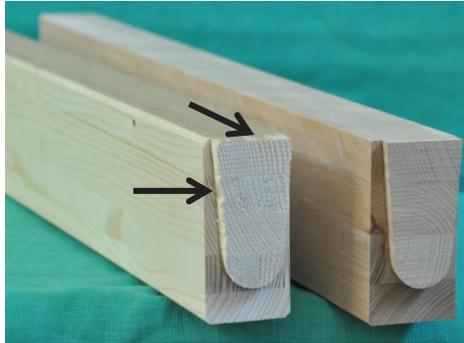


Bild 3-34 Fichte vs. Buche (Holzabsplitterung am Zapfen beim Abbund der Bauteile aus Fichte)

3.3.3.1.6 Glasauflager

Die simulierte Glaslast (Kapitel 3.3.3.2) wurde auf zwei Arten in den Riegel eingebracht: Eine starre Einspannung mithilfe von zwei Stahl-U-Profilen pro Verbindung und ein Schwerlast-Glasauflager, das mithilfe von acht Vollgewindeschrauben (5,0 x 60 mm) am Riegel befestigt ist, s. Bild 3-35.



Bild 3-35 Starre Einspannung des Riegels (links) und Glasauflager (rechts)

Sonstige belastungsabhängige Parameter (Lasteinleitung, Versuchsaufbau o. Ä.) werden im dafür vorgesehenen Kapitel 3.3.3.2 bis 3.3.3.5 kurz erläutert.

3.3.3.2 Lastfall Glaslast

Die Überprüfung der Tragfähigkeit im Lastfall „Glaslast“ wurde analog zu der in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Versuchsreihen durchgeführt. Eine Optimierung der Krafteinleitung wurde vorgenommen, sodass auf den Stahlrahmen und die seitlichen Schienen verzichtet werden konnte. Die schematische Darstellung ist in Bild 3-36 angegeben. Innerhalb dieses Versuchsprogramms wurden drei Bauteiltiefen T (100 mm, 150 mm und 200 mm), zwei Zapfenlängen Z (10 mm und 20 mm) und unterschiedliche Ausmitten x untersucht. Das gesamte Versuchsprogramm ist in Tabelle 3-21 angegeben. Die Durchführung erfolgte in Anlehnung an DIN EN 26891.

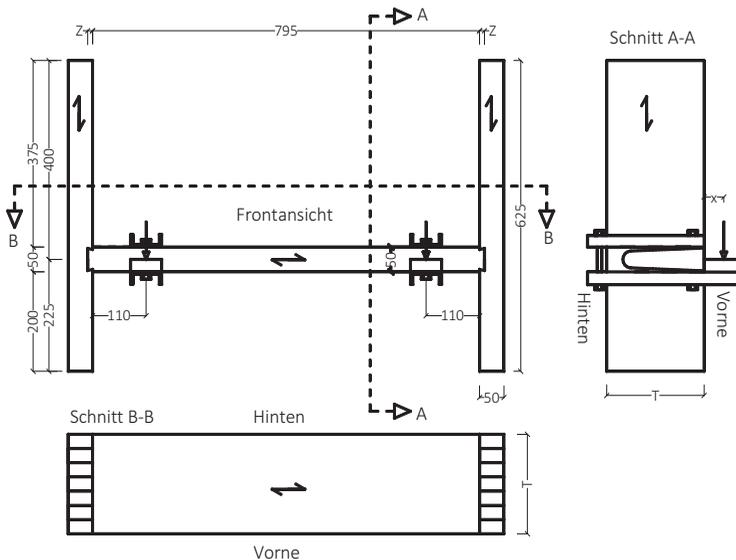


Bild 3-36 Bauteilabmessungen; Ansicht und Querschnitte des Versuchsaufbaus 1 – Reihe G; Maße in mm

Tabelle 3-21 Versuchsprogramm Reihe G – Glaslast

Reihe	Aufbau	T in mm	Z in mm	NKL	Untermaß	V-Sr	Holzart	Ausmitte ²⁾ in mm	N
G1.1	1	200	10	1	-	-	Bu	30	3
G1.2	1	200	10	1	-	-	Bu	50	3
G2.1	1	150	10	1	-	-	Bu	30	3
G2.2	1	150	10	1	-	-	Bu	50	3
G3.1	1	100	10	1	-	-	Bu	25	2
G3.2	1	100	10	1	-	-	Bu	30	2
G4.1	1	200	10	1	✓	✓	Bu	30	4
G4.2	1	200	10	1	✓	✓	Bu	50	4
G5	1 ¹⁾	200	10	1	✓	✓	Bu	50	4
G6.1	1	100	10	1	✓	-	Bu	30	3
G6.2	1	100	10	1	✓	✓	Bu	30	3
G6.3	1 ¹⁾	100	10	1	✓	✓	Bu	45	4
G7	1	100	10	2	✓	✓	Bu	30	5
G9	1	100	20	1	✓	✓	Bu	30	5
G10	1	200	10	1	-	-	Fi	30	3
G11	1	100	10	1	-	-	Fi	30	3

¹⁾ Mit Glausauflager (vgl. Bild 3-35, rechts)

²⁾ Bezogen auf die Riegelvorderkante (vgl. „x“ in Bild 3-36)

Die Verdrehung des Riegels lässt sich mithilfe der während der Versuche ermittelten Verschiebungen nach Bild 3-37 wie folgt ermitteln:

$$\text{Verdrehung } \beta = \arctan\left(\frac{u_{\text{vorne}} - u_{\text{hinten}}}{\text{Abstand WA}}\right) \quad (70)$$

Hierbei ist ein Absenken des Riegels als eine positive und ein Anheben – z. B. der Riegelhinterkante – als negative Verschiebung definiert. Nachfolgend sind ausgewählte Versuchsergebnisse gegenüber gestellt. Die ausführlichen Versuchsergebnisse (Bild A-31 bis Bild A-54 und Tabelle A-21 bis Tabelle A-36) sind dem Anhang zu entnehmen. Neben den Werten der Tragfähigkeit, der Kraft bei einer Vertikalverschiebung der „Glasscheibe“ bei 1, 4 und 15 mm, den Verschiebungsmoduln und der Riegelverdrehung bei Erreichen der Maximallast sind auch die Steifigkeitswerte $k_{s,\beta,Anfang}$ und $k_{s,\beta,Wiederbel.}$ angegeben. Diese umschreiben die Verdrehsteifigkeit des Anschlusses. Hierfür wurde das wirkende Torsionsmoment (Halbe Schwalbenhöhe plus Ausmitte x multipliziert mit der wirkenden Vertikalkraft) mit der Verdrehung nach Gl. (70) im Anfangs- und Wiederbelastungszyklus ins Verhältnis gesetzt. Dadurch soll rechnerisch der Einfluss der Ausmitte x auf die Steifigkeit der Verbindung eliminiert werden.

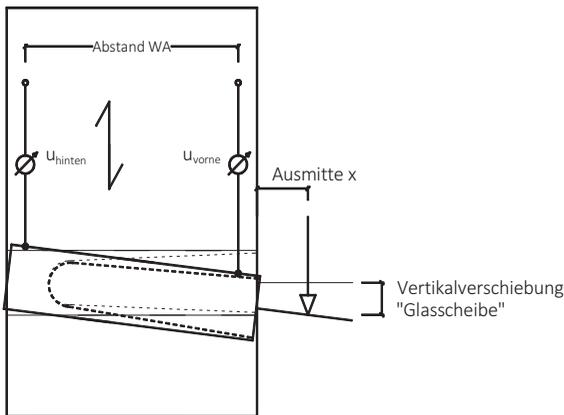


Bild 3-37 Verformungsanteile der Schwalbenschwanzverbindung

Tabelle 3-22 Mittlere Versuchsergebnisse Reihe G – Glaslast

Reihe	F_{max} in kN	F_{15mm} in kN	$k_{s,Aufgang}$ in kN/mm	$k_{s,Wiederbel.}$ in kN/mm	F bei 1,0 mm in kN	F bei 4,0 mm in kN	$K_{s,\beta,Anfang}$ in kNmm ²	$K_{s,\beta,Wiederbel.}$ in kNmm ²	β_{max} in °
G1.1	22,9	20,9	2,4	3,1	2,7	9,4	1713	2688	4,9
G1.2	19,3	16,7	1,7	2,3	1,9	7,2	1494	2356	5,4
G2.1	12,2	12,2	1,5	2,5	1,6	6,0	464	1124	4,5
G2.2	12,2	11,4	1,3	2,0	1,7	5,4	628	1265	5,9
G3.1	10,2	9,4	1,0	1,5	1,2	4,1	197	534	9,9
G3.2	8,3	8,2	1,0	1,8	1,4	4,3	185	461	9,6
G4.1	20,0	18,8	1,7	2,7	2,1	7,3	866	2284	4,3
G4.2	16,8	16,0	1,5	2,3	1,8	6,4	981	2377	3,9
G5	10,1	10,0	1,0	1,5	1,2	4,4	1178	3168	1,2
G6.1	8,8	7,0	0,8	1,9	0,7	3,2	117	512	14,0
G6.2	9,2	8,3	1,3	2,1	1,6	4,8	251	635	13,6
G6.3	7,1	6,2	0,7	1,4	1,0	3,0	183	576	9,0
G7	7,2	6,6	1,0	1,8	1,4	3,8	191	470	12,9
G9	9,0	9,0	1,1	1,9	1,3	4,4	192	516	7,4
G10	9,2	8,3	1,1	1,8	1,4	4,0	503	1126	6,5
G11	3,2	2,6	0,4	1,0	0,6	1,4	43	186	17,0

Die wichtigsten Beobachtungen der Versuche des Lastfalls „Glaslast“ sind im Folgenden dargestellt:

3.3.3.2.1 Einfluss der Bauteiltiefe

Schwalbenschwanzverbindungen mit Bauteiltiefen von 200 mm können im Vergleich zu Bauteilen der Tiefe 100 mm ca. das 2,5-fache an Tragfähigkeit und Steifigkeit leisten, vgl. Bild 3-38.

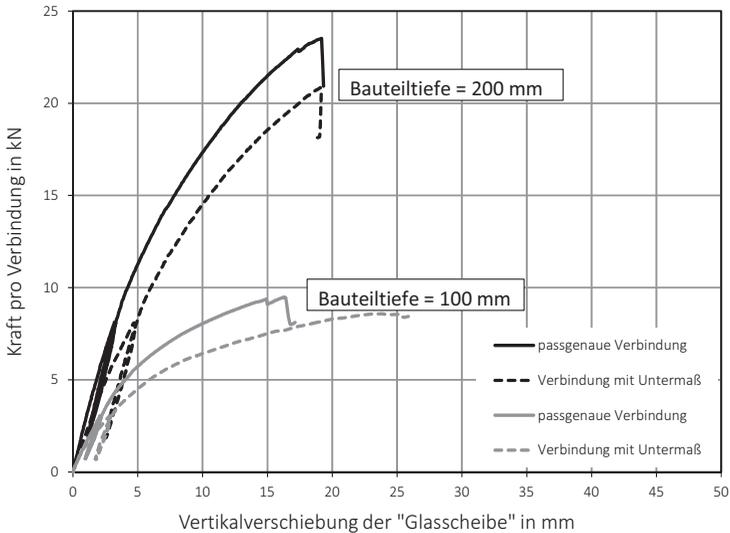


Bild 3-38 Repräsentative Last-Verformungs-Kurven für Bauteile der Tiefe 100 mm und 200 mm. Durchgezogene Linien sind Prüfkörper mit einer passgenauen Verbindung – gestrichelte Linien sind solche mit einem Untermaß und eingebrachten V-Schrauben

3.3.3.2.2 Einfluss des Untermaßes

Verbindungen mit einem gewissen Untermaß bei gleichzeitig eingebrachten V-Schrauben weisen ein ähnliches Tragverhalten wie satt sitzende Verbindungen auf, erweisen sich aber insgesamt als weicher und weniger tragfähig, siehe hierzu Bild 3-38.

3.3.3.2.3 Einfluss der Holzart

Der Vergleich von Buchen-BSH mit Brettschichtholz aus Nadelholz hat gezeigt, dass sowohl die Steifigkeit als auch die Tragfähigkeit um den Faktor 1,7 bis 3,1 gesteigert werden kann, s. Tabelle 3-23.

Tabelle 3-23 Vergleich der Mittelwerte für Buchen-BSH und BSH aus Nadelholz

Reihe	T = 200 mm			T = 100 mm		
	G1.1 Laubh.	G10 Nadelh.	η	G3.2 Laubh.	G11 Nadelh.	η
F_{max} in kN	22,9	9,2	2,5	8,3	3,2	2,6
F_{1mm} in kN	2,7	1,3	2,1	1,4	0,6	2,3
F_{4mm} in kN	9,4	4,4	2,1	4,3	1,4	3,1
k_s in kN/mm	2,4	1,1	2,2	1,0	0,4	2,5
$k_{s,w}$ in kN/mm	3,1	1,8	1,7	1,8	1,0	1,8
β_{max} in °	4,9	6,5	0,8	9,6	17,0	0,6

3.3.3.2.4 Einfluss der Zapfenlänge

Eine Verdopplung der Zapfenlänge von 10 mm auf 20 mm hat ein sehr ähnliches Tragverhalten zur Folge, vgl. Bild 3-39. Die Versuche der vergleichbaren Reihen G6.2 und G9 weisen nahezu identische Tragfähigkeiten ($F_{max} = 9,2$ bzw. $9,0$ kN) und Steifigkeiten ($k_s = 1,3$ bzw. $1,1$ kN/mm) auf. Lediglich die Vertikalverschiebung der Glasscheibe einer Verbindung mit 10 mm langen Zapfen ist beim Erreichen der Tragfähigkeit F_{max} im Mittel ca. 40 % höher als die einer Verbindung mit 20 mm langen Zapfen. Dieses gutmütige Versagen bei gleichzeitig etwas höheren Tragfähigkeiten und Steifigkeiten spricht gegen die Verwendung von Zapfenlängen $Z > 10$ mm. Gleichzeitig wird die Querschnittsschwächung der Stütze im Bereich der Verbindung relativ gering gehalten. Insbesondere bei einem möglichen Versagen der Stütze auf Druck in Faserrichtung ist die Querschnittsfläche und zu-

sätzlich das Flächenmoment zweiten Grades in Richtung der starken Achse von großer Bedeutung, welche sich bei 20 mm langen Zapfen deutlich reduzieren würden, vgl. Tabelle 3-24.

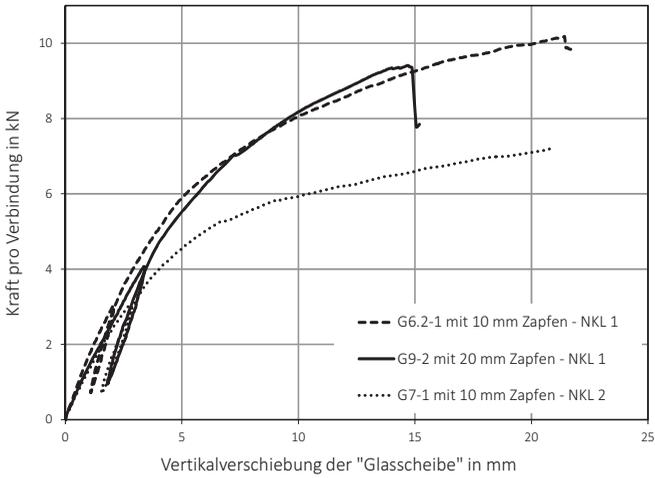


Bild 3-39 Repräsentative Last-Verformungs-Kurven für Bauteile mit Zapfenlänge 10 und 20 mm in NKL 1 und NKL 2

Tabelle 3-24 Nettoquerschnittswerte der Pfosten

Querschnitt im Bereich der Kontaktverbindung; Maße in mm	Diagram 1	Diagram 2	Diagram 3	Diagram 4
I in mm^4	$3,3 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^7$	$2,4 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^7$
A in mm^2	10.000	7.600	6.600	3.200

3.3.3.2.5 Einfluss der Nutzungsklasse

Prüfkörper der NKL 2 weisen um ca. 20 % geringere Werte auf als solche, die dem Klima der NKL 1 ausgesetzt waren. Eine repräsentative Last-Verformungs-Kurve des Prüfkörpers G7-1, der in NKL 2 klimatisiert wurde, ist ebenfalls in Bild 3-39 dargestellt und ist mit Versuch G6.2-1 der NKL 1 und gleichen Abmessungen vergleichbar.

3.3.3.2.6 Einfluss Glasauflager

Bei großen Bauteilen ($T = 200 \text{ mm}$) wird das Versagen der Lasteinleitung mittels Glasauflagern maßgebend. In Bild 3-40 sind sowohl die auftretenden Beanspruchungen (Querkraft und Moment) als auch die Spannungen, welche einen vertikalen und einen horizontalen Querschnitt hervorrufen, kenntlich gemacht. Das Versagen eines Querschlusses bzw. die Querbiegung im Bereich der Schraubenspitzen sind somit ausschlaggebend für das Erreichen der Tragfähigkeit des gesamten Prüfkörpers. Bei geringen Bauteiltiefen von 100 mm findet das maßgebende Versagen in der Kontaktverbindung statt (Querdruckversagen und Querschnitt im Bereich der Ausklinkung).



Bild 3-40 *Oben: Querschnitt des Riegels im Bereich der Auflagerbefestigung; unten: auftretende Spannungen*

3.3.3.2.7 Einfluss der Verstärkungsschrauben

Bei mit Untermaß hergestellten Versuchskörpern haben eingebrachte V-Schrauben einen geringen Einfluss auf die Tragfähigkeit (9,2 kN anstatt 8,8 kN) aber einen signifikanten Einfluss auf die Anfangssteifigkeit der Verbindung (1,3 kN/mm anstatt 0,8 kN/mm). Die Last-Verformungs-Kurven der einzelnen Verbindungen der Reihen 6.1 (ohne V-Schrauben) und 6.2 (mit V-Schrauben) sind in Bild 3-41 dargestellt und zeigen den Anfangsschlupf bei Schwalbenschwanzverbindungen, die mit Untermaß herstellt, aber nicht mit V-Schrauben versehen wurden.

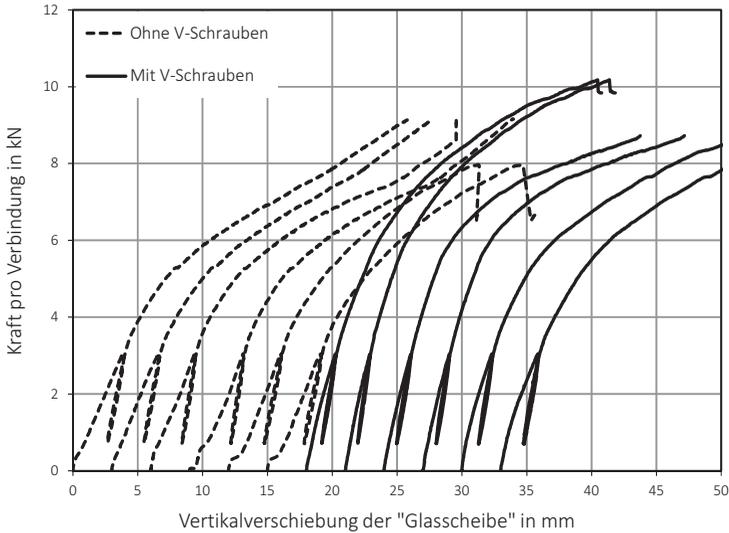


Bild 3-41 Last-Verformungs-Diagramm der Reihen 6.1 und 6.2

3.3.3.3 Lastfall Winddruck

Wirkt auf eine Holz-Glas-Fassade Winddruck, so werden die Pfosten-Riegel-Verbindungen in Einschubrichtung beansprucht. Diese Belastungssituation entspricht der Hauptbeanspruchungsart für gängige Schwalbenschwanzverbindungen. Die Versuchsreihe „Winddruck“ berücksichtigt eine Variation der Einflussparameter Nutzungsklasse, Untermaß und Verwendung von V-Schrauben. Das gesamte Versuchsprogramm ist in Tabelle 3-25 dargestellt. Der Versuchsaufbau ist schematisch in Bild 3-42 veranschaulicht. Die Versuche werden in Anlehnung an DIN EN 26891 bis zum Versagen oder einer Verschiebung von 15 mm geprüft. Hierbei wird auch ein Entlastungszyklus berücksichtigt, sodass eine modifizierte Anfangssteifigkeit k_s und eine Steifigkeit $k_{s,W}$ bei Wiederbelastung ermittelt werden kann. Die Holzeigenschaften der Bauteile aus Buchen-Brettschichtholz sind der Tabelle 3-26 zu entnehmen.

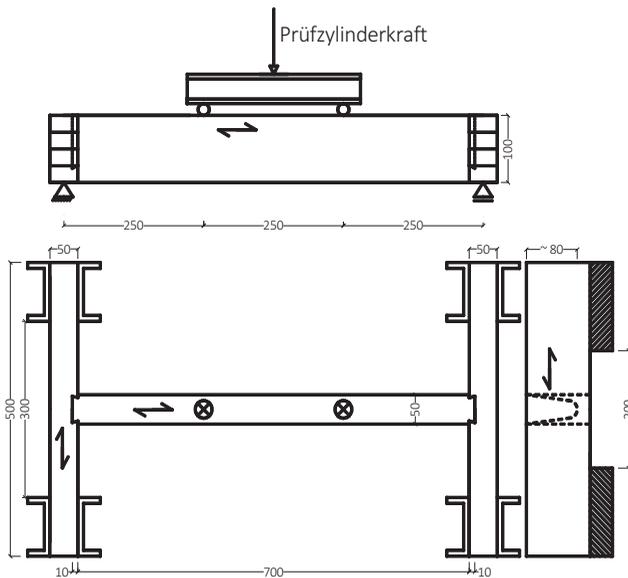


Bild 3-42 Bauteilabmessungen; Ansichten und Draufsicht des Versuchsaufbaus – Reihe D; Maße in mm

Tabelle 3-25 Versuchsprogramm Reihe D – Winddruck

Reihe	Riegel- und Stütztiefe in mm	NKL	Untermaß	V-Sr	Anzahl
D1	100	1	-	-	5
D2	100	1	✓	-	5
D3	100	1	✓	✓	5
D4	100	2	✓	✓	5

Tabelle 3-26 Holzeigenschaften Reihe D – Winddruck; Mittelwerte

Reihe	Holzfeuchte in %		Rohdichte in kg/m ³	
	Pfosten	Riegel	Pfosten	Riegel
D1	9,8	9,9	745	706
D2	9,6	10,2	691	749
D3	9,8	10,1	709	759
D4	15,7	15,9	705	724
\bar{x}	-	-	724	

Tabelle 3-27 Versuchsergebnisse Reihe D – Winddruck

Reihe	F_{max} in kN			k_s in kN/mm			$k_{s,w}$ in kN/mm		
	\bar{x}	s	v	\bar{x}	s	v	\bar{x}	s	v
D1	17,9	1,8	10 %	6,7	1,3	19 %	23,6	10,0	42 %
D2	17,9	1,5	8 %	4,2	1,0	23 %	12,1	2,3	19 %
D3	17,2*	2,9	17 %	15,7	6,9	44 %	29,0	13,2	45 %
D4	17,5	0,5	3 %	19,8	12,1	61 %	47,5	64,0	135 %

* Versuche mit Keilzinkenversagen in Nebenträgermitte wurden in der Auswertung berücksichtigt, anderenfalls ist $F_{max,mean} = 19,0$ kN



Bild 3-43 *Typisches Versagensbild im Lastfall „Winddruck“ – Reihe D2*

Als Versagensursache wurde bei den meisten Versuchen ein Querkzugversagen des Pfostens im Bereich des Zapfengrunds beobachtet, welches beim Erreichen der Tragfähigkeit durch ein Längsaufspalten des Riegels begleitet wurde, vgl. Bild 3-43. Zusätzlich waren teilweise erhebliche Querdruckdeformationen im Bereich des Zapfens und des Zapfenloches zu beobachten, sodass auch Relativverschiebungen von bis zu 15 mm gemessen wurden. Die vertikalen Verschiebungen, welche auf der Relativverschiebung zwischen Oberkante des Hauptträgers und Unterkante des Nebenträgers beruhen, wurden mittels zwei beidseitig angebrachten induktiven Wegaufnehmern je Verbindung gemessen, vgl. Bild 3-45 (links).

Das Last-Verformungs-Verhalten der geprüften Verbindungen der symmetrisch aufgebauten Prüfkörper ist aus den Diagrammen nach Bild A-55 bis Bild A-58 ersichtlich. Die in den Diagrammen und Tabellen (Tabelle 3-27 und im Anhang Tabelle A-37 bis Tabelle A-40) angegebenen Kräfte beziehen sich auf die halbierte Prüfzylinderlast, vgl. Bild 3-42. In Tabelle 3-27 sind die gemittelten Tragfähigkeiten und Steifigkeitswerte angegeben. Die Versuchsergebnisse der Einzelversuche sind dem Anhang (Tabelle A-37 bis Tabelle A-40) zu entnehmen.

Die wichtigsten Beobachtungen der Versuche des Lastfalls „Winddruck“ sind im Folgenden dargestellt:

- Der Einfluss einer mit Untermaß abgebundenen Zapfenverbindung (D2) ohne V-Sr im Vergleich zur passgenauen Variante D1 spiegelt sich nur in den Steifigkeitskennwerten wieder. Hier sind teilweise um 100 % erhöhte Steifigkeitswerte der Reihe D1 gegenüber der Reihe D2 zu beobachten. Im Gegensatz dazu entspricht die Tragfähigkeit der Verbindung mit passgenauem Abbund (Reihe D1) der Tragfähigkeit der mit Untermaß hergestellten Zapfenverbindung (Reihe D2), vgl. Tabelle 3-27.
- In Reihe D3 wurden die Nachteile einer mit Untermaß hergestellten Verbindung erfolgreich durch das Eindrehen der V-Schrauben ausgeglichen und auch deutlich höhere Steifigkeitswerte im Vergleich zur Reihe D1 erzielt, da die V-Sr das Tragverhalten im Anfangslastbereich maßgeblich beeinflussen. Das frühzeitige Versagen der Keilzinkenverbindungen aufgrund einer fehlerhaften Verklebung (s. Bild A-59) zweier Prüfkörper in Nebenträgermitte verzerrt das Ergebnis und führt zu einer geringeren Tragfähigkeit von 17,2 kN.
- Ein Quellen der Bauteile durch die Klimatisierung der Prüfkörper auf eine durchschnittliche Holzfeuchte von 15,8 % wirkt sich positiv auf die Steifigkeit der Verbindung aus. Eine negative Beeinflussung der Tragfähigkeit durch geringere Festigkeiten bei höherer Holzfeuchte findet nur im geringen Maße statt.

3.3.3.4 Lastfall Windsog

Der der Einschubrichtung entgegenwirkende Lastfall „Windsog“ wurde anhand 16 symmetrisch aufgebauter Prüfkörper, wie in Bild 3-44 dargestellt, experimentell untersucht. Hierbei wurden in drei Versuchsreihen die Nutzungsklasse und die Verschraubungsart (V- oder X-Schrauben) variiert, vgl. Tabelle 3-28. Die Messung der Relativverschiebung erfolgte analog zu den Versuchen der Reihe „Winddruck“ und die Anordnung der Wegaufnehmer ist im Bild 3-45 (links) zu sehen. Die Prüfkörper der Reihe S1 und S3 wurden mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 2 mm/min belastet, bei Prüfkörpern der Reihe S2 wurde eine zusätzliche Entlastungsphase nach DIN EN 26891 berücksichtigt. Die Mittelwerte der Holzeigenschaften sind der Tabelle 3-29 zu entnehmen.

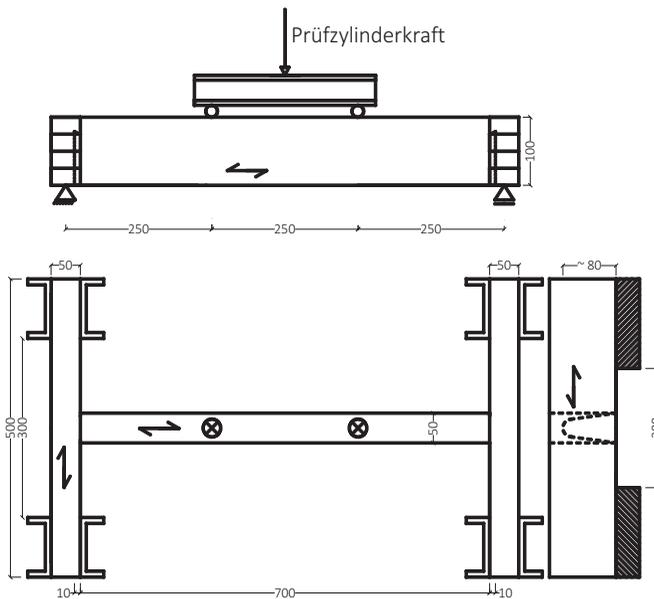


Bild 3-44 Bauteilabmessungen; Ansichten und Draufsicht des Versuchsaufbaus – Reihe S, Maße in mm

Tabelle 3-28 Versuchsprogramm Reihe S – Windsog

Reihe	Riegel- und Stützen- tiefe in mm	NKL	Untermaß	V-Sr	X -Sr	Anzahl
S1	100	1	✓	✓	-	5
S2	100	1	✓	-	✓	6
S3	100	2	✓	✓	-	5

Tabelle 3-29 Holzeigenschaften Reihe S – Windsog; Mittelwerte

Reihe	Holzfeuchte in %		Rohdichte in kg/m ³	
	Pfosten	Riegel	Pfosten	Riegel
S1	9,7	10,1	710	754
S2	9,9	10,2	733	726
S3	15,8	15,9	702	745
\bar{x}				728

Tabelle 3-30 Versuchsergebnisse Reihe S – Windsog

Reihe	F_{max} in kN			k_s in kN/mm			$k_{s,w}$ in kN/mm		
	\bar{x}	s	v	\bar{x}	s	v	\bar{x}	s	v
S1	4,2	1,0	24 %	-	-	-	-	-	-
S2	17,2	1,7	10 %	30,4	10,9	36 %	31,5	8,2	26 %
S3	3,9	0,5	12 %	19,9	7,0	35 %	-	-	-

Die Versuche haben gezeigt, dass bei geringen Verschiebungen und beim Erreichen der Tragfähigkeit der Riegel entgegen der Einschubrichtung herausgedrückt wurde, s. Bild 3-45 (rechts). Dieser Belastung wirkte entweder die durch die eingebrachten V-Schrauben wirkende Reibung in den Flankenfugen entgegen oder die gekreuzten

X-Schrauben der Reihe S2 wurden auf Herausziehen belastet. Bei Prüfkörpern der Reihen S1 und S3 war das Tragverhalten und die Tragfähigkeit signifikant von den V-Schrauben abhängig. Bei planmäßig in die Fuge eingebrachten V-Schrauben (z. B. Versuch S1-4, vgl. Bild 3-46) konnten relativ hohe Kräfte übertragen werden. Im Vergleich zur Reihe S2 wurde jedoch nur ca. ein Viertel der Maximallast bei gleichzeitig kleineren Verschiebungen erzielt, vgl. Tabelle 3-30. Die robusteren und tragfähigeren Verbindungen mit gekreuzten X-Schrauben weisen zudem sowohl bei Belastungsbeginn als auch in der Wiederbelastungsphase eine relativ hohe Steifigkeit von ca. 30 kN/mm auf. Das Last-Verformungs-Diagramm der Reihe S2 ist in Bild 3-47 dargestellt. Detailliertere Versuchsergebnisse der Versuchsreihe „Windsog“ sind dem Anhang (Bild A-60 und Tabelle A-41 bis Tabelle A-43) zu entnehmen.

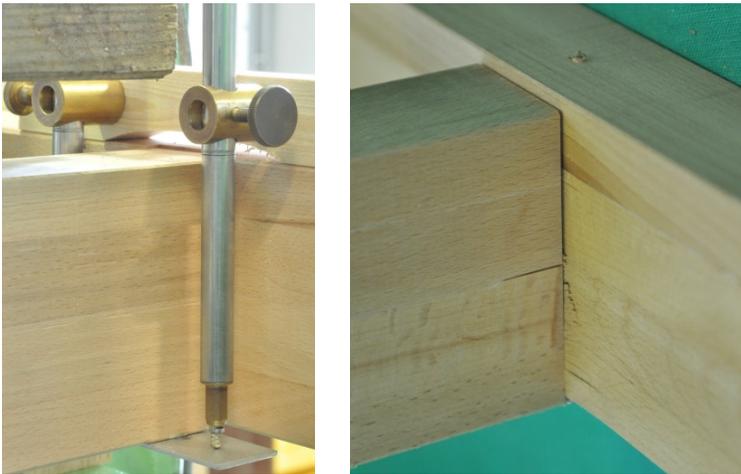


Bild 3-45 Messung der Relativverschiebung zwischen Oberkante des Hauptträgers und der Unterkante des Nebenträgers (links) und Versagensbild eines Prüfkörpers der Reihe S1 (rechts)

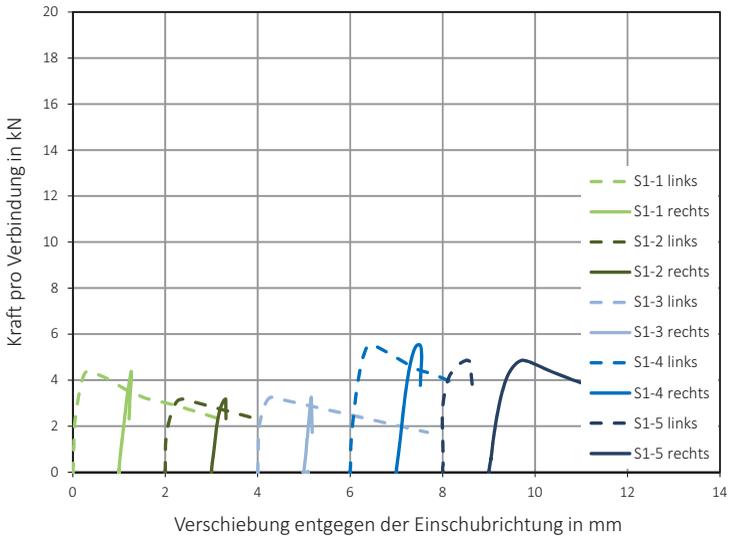


Bild 3-46 Last-Verformungs-Diagramm Reihe S1

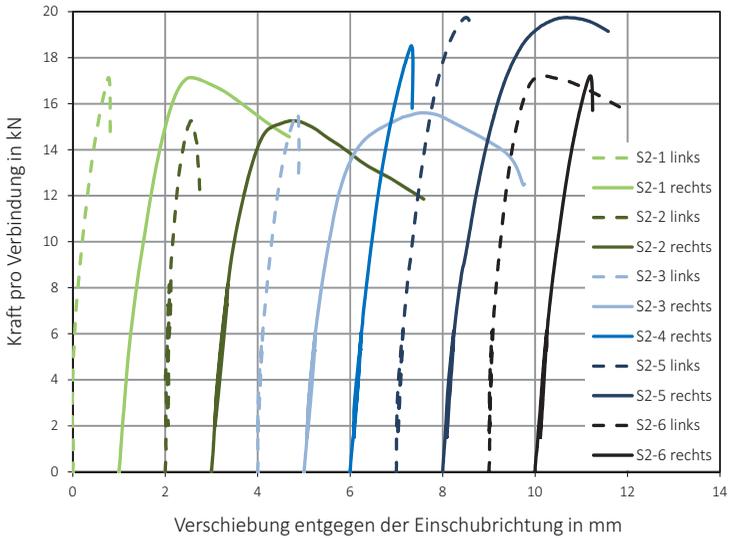


Bild 3-47 Last-Verformungs-Diagramm Reihe S2

Die relativ großen Schwankungen (Variationskoeffizient = 24 %) in Reihe S1 aufgrund der manchmal nicht in der Fuge eingebrachten V-Schrauben stellen die Zuverlässigkeit dieser Verbindungsmethode in Frage. Die Versuche haben gezeigt, dass die Windsogsicherung nicht ausschließlich von den V-Schrauben übernommen werden darf, sondern entweder das Einbringen gekreuzter Vollgewindeschrauben (hier: X-Schrauben) oder eine Sicherung entgegen der Einschubrichtung über das Grundprofil o. Ä. garantiert werden muss.

Die Bemessung der Verbindung bei einer Windsogbeanspruchung soll im Folgenden mit dem Modell zweier gekreuzter VG-Schrauben erfolgen und für den hier relevanten Fall kurz vorgestellt werden. Die Schrauben sind nach Bild 3-48 unter einem $\alpha = 30^\circ$ in das vorgebohrte Buchen-BSH eingebracht. Die Pfosten-Riegel-Verbindung wird durch die angesetzte Windsogkraft entgegen der Einschubrichtung beansprucht. Der dieser Belastung entgegenwirkende Widerstand und die dazugehörige Steifigkeit werden nachfolgend betrachtet.

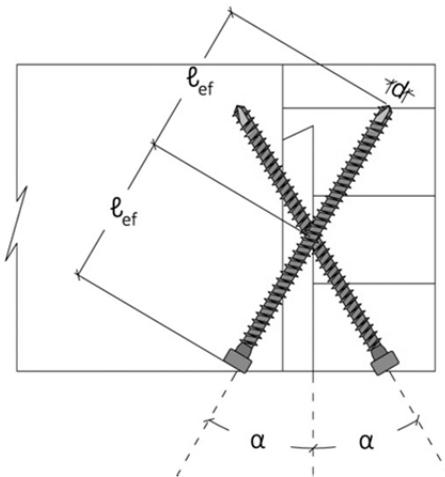


Bild 3-48 Windsogsicherung mittels X-Schrauben

Für die hier verwendeten Schrauben $\varnothing 6$ mm gilt nach der europäisch technische Zulassung ETA-11/0190:

$$\begin{aligned}
 F_{\alpha, \alpha, Rk} &= n_{ef} \cdot k_{\alpha} \cdot f_{\alpha, k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \left(\frac{\rho_k}{350} \right)^{0,8} \\
 &= 1 \cdot 1,0 \cdot 11,5 \cdot 6 \cdot 50 \cdot \left(\frac{590}{350} \right)^{0,8} = 5,24 \text{ kN}
 \end{aligned}
 \tag{71}$$

Für die gesamte Verbindung – mit gekreuzt angeordneten Holzschrauben – gilt:

$$R_k = 2 \cdot F_{\alpha, \alpha, Rk} \cdot \cos \alpha = 2 \cdot 5,24 \cdot \cos 30^\circ = 9,07 \text{ kN}
 \tag{72}$$

Der charakteristische Widerstand R_k ist als gepunktete Linie in Bild 3-49 eingefügt und mit den mittleren und charakteristischen Tragfähigkeiten der durchgeführten Versuche vergleichbar. Die rechnerisch ermittelte charakteristische Tragfähigkeit liegt auf der sicheren Seite ca. 40 % unterhalb des experimentell bestimmten Wertes $F_{max, Test, 05}$.

Für den Rechenwert des Verschiebungsmoduls K_{ser} planmäßig in Achsrichtung beanspruchter Schrauben beträgt für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit unabhängig vom Winkel zwischen Schraubennachse und Faserrichtung nach ETA-11/0190:

$$K_{ser} = 780 \cdot d^{0,2} \cdot l_{ef}^{0,4} = 780 \cdot 6^{0,2} \cdot 50^{0,4} = 5,34 \text{ kN/mm}
 \tag{73}$$

Die Gesamtsteifigkeit parallel zur Fuge eines Systems mit gleichen Gewindelängen auf beiden Seiten der Fuge kann wie folgt berechnet werden:

$$K_{ser} = K_{\alpha} \cdot \cos^2 \alpha = 5,34 \cdot \cos^2 30^\circ = 4,0 \text{ kN/mm}
 \tag{74}$$

Die ermittelte Gesamtsteifigkeit K_{sys} des hier verwendeten Systems ist den Last-Verformungs-Kurven der Versuche aus Reihe S2 in Bild 3-49 gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass die nach aktueller europäisch technischer Zulassung berechnete Steifigkeit deutlich unterhalb der Versuchswerte liegt. Der Steifigkeitsmodul k_s wurde für die Reihe S2 nach DIN EN 26891 im Mittel zu 30,4 kN/mm bestimmt, was mehr als dem 7-fachen des berechneten Wertes entspricht. Gerade für Buchenholz scheint die Annahme nach Gleichung (73) sehr konservativ zu sein. Die hier durchgeführten Versuche weisen darauf hin, dass für eine Bemessung der Schwalbenschwanzverbindung im Lastfall „Windsog“ auf der sicheren Seite liegend die Steifigkeit und Tragfähigkeit wie oben vorgestellt ermittelt werden kann. Weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen sind für eine wirtschaftliche Anwendung und Dimensionierung erforderlich.

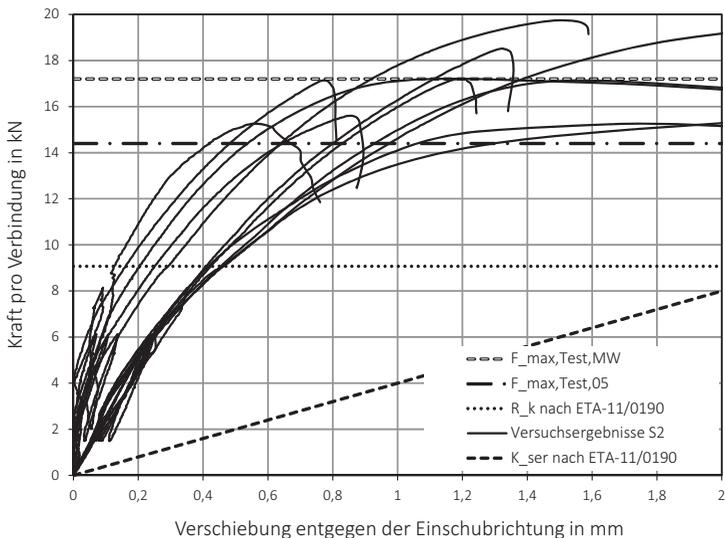


Bild 3-49 Last-Verformungs-Diagramm der Versuche aus Reihe S2 und berechnete Tragfähigkeit und Steifigkeit

3.3.3.5 Lastfall Kraft in Riegelängsachse

Horizontallasten, die rechtwinklig zur Fassadenfläche wirken, können eine Beanspruchung der Schwalbenschwanzverbindung in Riegelängsachse hervorrufen. Dieser Lastfall wurde mithilfe der in Bild 3-50 schematisch dargestellten Prüfkörper untersucht. Vier Versuchsreihen mit insgesamt 23 Versuchen, s. Tabelle 3-31, wurden berücksichtigt. Die Prüfkörper der Reihen L1 und L2 wiesen die Ausgleichsfeuchte der Nutzungsklasse 1 und die der Reihen L3 und L4 der Nutzungsklasse 2 auf. Die Mittelwerte der Holzeigenschaften sind der Tabelle 3-32 zu entnehmen. Jede Versuchsreihe berücksichtigte ein Untermaß und gekreuzt eingebrachte Vollgewindeschrauben (X-Schrauben). Die Versuchskörper der Reihe L3 und L4 wurden zusätzlich mit V-Schrauben in den Fugen versehen. Die Versuchsdurchführung wurde in Anlehnung an DIN EN 26891 durchgeführt. Die Verschiebungsmessung zwischen Riegel und Pfosten erfolgte mittels beidseitig am Riegel befestigten Wegaufnehmern, welche in Bild 3-51 dargestellt sind.

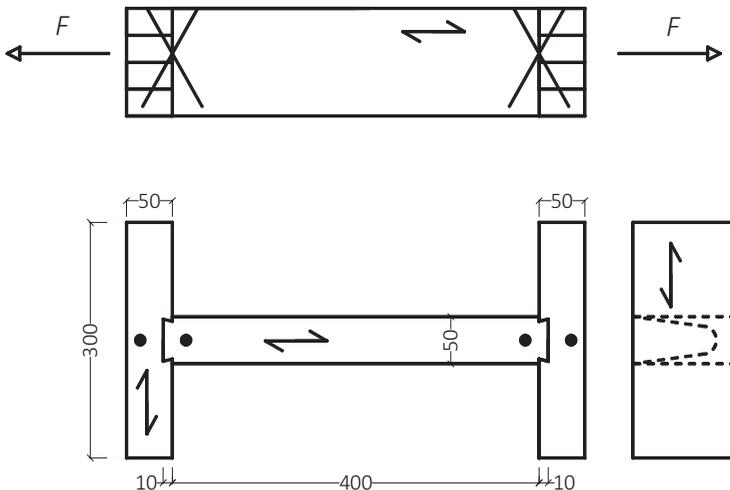


Bild 3-50 Längsschnitt (oben) und Draufsicht (unten); Maße in mm

Tabelle 3-31 Versuchsprogramm Reihe L – Kraft in Riegelängsachse

Reihe	Riegel- und Stütztiefe in mm	NKL	Untermaß	X-Sr	V-Sr	Anzahl
L1	100	1	✓	✓	–	6
L2	200	1	✓	✓	–	5
L3	100	2	✓	✓	✓	6
L4	200	2	✓	✓	✓	6

Tabelle 3-32 Holzeigenschaften (Holzfeuchte und Rohdichte) Reihe L – Kraft in Riegelängsachse; Mittelwerte

Reihe	Holzfeuchte in %		Rohdichte in kg/m ³	
	Pfosten	Riegel	Pfosten	Riegel
L1	9,8	9,7	748	704
L2	9,5	9,5	716	711
L3	15,9	15,8	770	760
L4	15,9	15,9	724	720
\bar{x}			725	

Tabelle 3-33 Versuchsergebnisse Reihe L – Kraft in Riegelängsachse

Reihe	F_{max} in kN			k_s in kN/mm			$k_{s,w}$ in kN/mm		
	\bar{x}	s	v	\bar{x}	s	v	\bar{x}	s	v
L1	14,6	0,7	5 %	11,3	3,5	31 %	13,8	3,9	28 %
L2	19,1	1,8	9 %	13,9	1,4	10 %	15,2	1,6	11 %
L3	15,9	1,5	9 %	37,2	10,6	29 %	40,7	12,8	31 %
L4	18,5	0,5	2 %	57,7	9,3	16 %	65,7	10,4	16 %

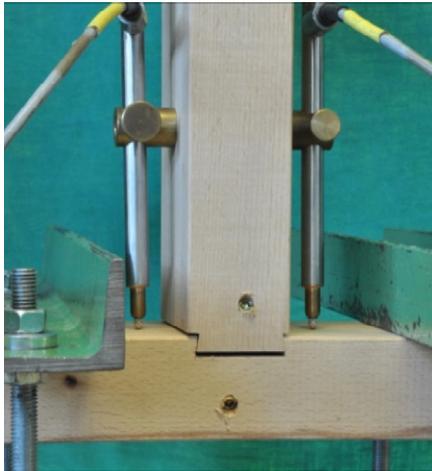


Bild 3-51 Versuchsaufbau Reihe L1 – Untere Verbindung des symmetrischen Prüfkörpers

Das Versagen im Traglastbereich war geprägt durch ein Herausziehen der Vollgewindeschrauben oder ein Kopfdurchziehen der Zylinderköpfe der hier verwendeten Würth ASSY® plus VG Schrauben. Die Mittelwerte der Versuchsergebnisse sind in Tabelle 3-33 angegeben. Die Last-Verformungs-Diagramme sind dem Anhang (Bild A-61 bis Bild A-64) zu entnehmen. Die Versuchsergebnisse der Einzelversuche sind in Tabelle A-44 bis Tabelle A-47 aufgeführt.

Die wichtigsten Ergebnisse der Versuche des Lastfalls „Kraft in Riegel-längsachse“ sind im Folgenden dargestellt:

- Durch die Klimatisierung der Prüfkörper auf eine Ausgleichsfeuchte der Nutzungsklasse 2 sind keine Tragfähigkeitseinbußen zu beobachten. Die Tragfähigkeit der Bauteile mit einer Tiefe $T = 100$ mm liegt bei ca. 15 kN und die der Bauteile einer Tiefe $T = 200$ mm bei ca. 19 kN. Dafür steigern das Quellen und das Einbringen der V-Schrauben deutlich die Steifigkeiten der Verbindung auf über 37 kN/mm.

- Die nahezu identischen Steifigkeitskennwerte k_s und $k_{s,W}$ weisen darauf hin, dass weder ein Anfangsschlupf noch große plastische Verformungen im Belastungsbereich bis 40 % der Schätzlast vorhanden sind.
- Die Variationskoeffizienten der Tragfähigkeit F_{max} sind mit maximal 9 % relativ gering. Die hohen Tragfähigkeits- und Steifigkeitswerte deuten darauf hin, dass eine X-Verschraubung zuverlässig einer Belastung in Riegellängsachse standhalten und eine Bemessung analog zu der in Kapitel 3.3.3.4 vorgestellten Möglichkeit erfolgen kann.

3.3.4 Zusammenfassung

Die experimentell geprägten Untersuchungen mit Mehrfachzapfen- und Schwalbenschwanzverbindungen haben bestätigt, dass sich aus konstruktiver Sicht sehr tragfähige und steife Haupt-Nebenträger-Verbindungen mittels Buchen-BSH realisieren lassen. Zudem stehen mit diesen Kontaktverbindungen schlanke Bauteile mit ästhetisch ansprechender Oberflächenoptik zur Verfügung, die in sichtbaren Konstruktionen vom Bauherrn immer häufiger gefordert werden. Allerdings spricht eine aufwendige Montage (vgl. 3.3.2.5) gegen die Verwendung der Mehrfachzapfenverbindungen und führte zu einer Konzentration der Forschungsarbeiten auf die Schwalbenschwanzverbindung. Hierbei wurden vier unterschiedliche Lastfälle (Glaslast, Winddruck, Windsog und Kraft in Riegellängsachse) und eine große Variation der Einflussparameter berücksichtigt und die Tragfähigkeiten und Steifigkeiten der Verbindungen experimentell untersucht. Das kritisch zu betrachtende Verhalten des Buchenholzes bei Holzfeuchteänderung wurde ansatzweise mit Prüfkörpern, welche auf die Ausgleichsfeuchte der NKL 2 klimatisiert wurden, untersucht. Weiterführende Langzeitversuche mit sich ständig ändernden Umwelteinflüssen (z. B. UV-Strahlung, Oberflächentemperatur, Raumlufttemperatur,

Luftfeuchte etc.) sind erforderlich, um auch über praxisnahe Anwendungssituationen Aussagen treffen zu können.

Insgesamt wurden 123 Haupt-Nebenträger-Versuche mit teilweise eingebrachten Verstärkungsschrauben (X- und V-Schrauben) untersucht. Lediglich zwei Versuchsreihen berücksichtigten ein Traglastverhalten mit handelsüblichen Glasauflagern. Aufgrund der zahlreichen und unterschiedlichen Befestigungssysteme zwischen Glasscheibe und Tragstruktur, die auf dem Markt erhältlich sind, haben sich die Betrachtungen hier auf den Kontaktanschluss zwischen Riegel und Pfosten beschränkt. Die Tragfähigkeit der Glasbefestigung ist entweder für das gewählte System bereits bekannt oder muss im Einzelfall separat untersucht werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, innovative Verbindungen für den Ingenieurholzbau zu erforschen, die darauf ausgelegt sind, die positiven Eigenschaften der Buche zu nutzen und somit die Anwendungsmöglichkeiten des Buchenholzes zu erweitern. Gerade in hochbeanspruchten Bereichen bei gleichzeitig hohen Anforderungen an die schlanke und ästhetische Bauweise soll eine vermehrte Verwendung von Baustoffen aus Buche angestrebt werden. Die Grundlagen der behandelten Themen wurden erarbeitet und Vergleiche mit den im Bauwesen gängigen Baumaterialien aus Nadelholz angestellt.

Zur Übertragung hoher Zugkräfte in stabförmigen Bauteilen wurde die Verbindungsmöglichkeit mittels eingedrehter Gewindestange in Brettsperrholz wissenschaftlich untersucht. Versuche mit Prüfkörpern und variierender Einschraublänge und Querschnittsabmessungen wurden durchgeführt und ein Bemessungsvorschlag entwickelt, der eine rechnerische Bestimmung der Tragfähigkeit und insbesondere der wirkenden Spaltkräfte am Zugstabende ermöglicht.

Weiterführende Betrachtungen haben sich mit den Ausziehwiderständen von sowohl eingedrehten als auch eingeklebten Gewindestangen beschäftigt und diese gegenübergestellt.

Bei Spannungsnachweisen für tragende Holzbauteile sind nach aktuellen Bemessungsregeln Querschnittsschwächungen in druckbeanspruchten Bauteilen nur dann rechnerisch zu berücksichtigen, wenn die Querschnittsschwächung nicht satt oder nicht dauerhaft mit einem Werkstoff ausgefüllt ist, der eine mindestens so große Steifigkeit aufweist wie das geschwächte Bauteil. Diese schon seit Jahrzehnten geltende Regel, wurde durch zahlreiche Druckversuche und Ergebnis-

se eines FE-Modells widerlegt und die tatsächliche Schwächung des Querschnitts, hervorgerufen durch das Einbringen von mechanischen Verbindungsmitteln, bestimmt. Gleichzeitig zeigten die Versuche, dass die nach Normen und Zulassungen angegebenen Werte der Druckfestigkeit für die Anwendung in NKL 1 sehr konservativ sind und eine Differenzierung zwischen Bauteilen in NKL 1 und 2 aus wirtschaftlicher Sicht angestrebt werden sollte.

Ergänzende Versuche mit Zugprüfkörpern und theoretische Betrachtungen haben gezeigt, dass eine Schwächung im zugbeanspruchten Bereich eines Bauteils ebenfalls einen Einfluss auf die Tragfähigkeit hat, die Tragfähigkeit des gesamten Zugstabes aber signifikant von der Bauteillänge abhängig ist. Ist nur ein im Verhältnis zur Gesamtlänge kleiner Bereich der geprüften Bauteile durch Verbindungsmittel geschwächt, so wirkt sich diese Schwächung nur geringfügig auf die Gesamttragfähigkeit des Stabes aus.

Anhand zehn Versuchsreihen wurden die Vorteile eines neu entwickelten Versatzanschlusses (Treppenversatz) gegenüber gängigen Kontaktanschlüssen, wie z. B. Stirn- und Fersenversatz, herausgestellt. Der zur Schub- und Druckübertragung prädestinierte Treppenversatz wurde insbesondere im Hinblick auf die Verwendung von Buchenfurnierschichtholz modifiziert und ein Bemessungsvorschlag hergeleitet. Demnach lässt sich die Tragfähigkeit über einen Querdruck- und einen Schubnachweis im Bereich der Kontaktfläche bestimmen. Die neu entwickelten Ansätze für die Bemessung der druckbeanspruchten Kontaktverbindung ermöglichen eine einfache und damit wirtschaftliche Bemessung.

Im letzten Teil der Arbeit wurden Mehrfachzapfen- und Schwalbenschwanzverbindungen experimentell untersucht. Die Ergebnisse haben bestätigt, dass sich aus konstruktiver Sicht sehr tragfähige und steife Pfosten-Riegel-Verbindungen mittels Buchen-BSH realisieren lassen. Hierbei wurden verschiedenste Einflussparameter variiert und

vier in Holz-Glas-Fassaden auftretende Lastfälle (Glaslast, Windsog, Winddruck und Kraft in Riegellängsachse) überprüft. Eine aufwendige Montage der Mehrfachzapfenverbindungen hat eine vertiefende Auseinandersetzung mit der Kontaktverbindung mittels mehrerer kleiner Zapfen ausgeschlossen und die Konzentration der Forschungsbemühungen auf die Schwalbenschwanzverbindung gelenkt.

Bei all den vielversprechenden Ergebnissen der Untersuchungen mit Buchenholz ist dem ausgeprägten Schwind- und Quellverhalten Beachtung zu schenken. Ebenfalls zu beachten ist eine auf die Nutzungsklassen 1 und teilweise 2 eingeschränkte Verwendung, durch die die ausgeprägte Feuchteempfindlichkeit und die fehlende natürliche Dauerhaftigkeit von Buchenholz Berücksichtigung finden soll. Weiterführende Überlegungen sollten sich mit möglichen Schäden im Verbindungsbereich beschäftigen und die Relevanz einer holzgerechten Montage der Bauteile und Nutzung des Bauwerks hervorheben.

Literaturverzeichnis

- Aicher S, Höfflin L, Behrens W (2001) A study on tension strength of finger joints in beech wood laminations. *Otto-Graf-Journal* 12:169–186
- Aicher S, Ohnesorge D (2011) Shear strength of glued laminated timber made from European beech timber. *European Journal of Wood and Wood Products* (2011) 69:143-154
- Becker P, Ressel JB (2004) High quality beech glulam. Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering WCTE 2004. Lahti, Finland. Volume III
- Blaß HJ (2008) Fachwerkträger – Neue Ansätze bei Material und Verbindungen. *Ingenieurholzbau, Karlsruher Tage 2008*. Bruderverlag, Universität Karlsruhe
- Blaß HJ, Bejtka I, Uibel T (2006) Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde. *Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 4*. Universität Karlsruhe (TH). ISBN 3-86644-034-0
- Blaß HJ, Denzler JK, Frese M, Glos P, Linsemann P (2005a) Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche. *Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 1*. Universitätsverlag Karlsruhe (TH). ISBN 3-937300-40-6
- Blaß HJ, Ehlbeck J, Kreuzinger H, Steck G (2005b) Erläuterungen zu DIN 1052:2004-08 Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. München, Bruderverlag

- Blaß HJ, Enders-Comberg M (2012) Fachwerkträger für den industriellen Holzbau. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 22. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. ISBN 978-3-86644-854-4
- Blaß HJ, Flaig M (2012) Stabförmige Bauteile aus Brettsperrholz. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 24. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. ISBN 978-3-86644-922-0
- Blaß HJ, Frese M (2006) Biegefestigkeit von Brettschichtholz-Hybridträgern mit Randlamellen aus Buchenholz und Kernlamellen aus Nadelholz. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 6. Universität Karlsruhe (TH). ISBN 3-86644-072-3
- Blaß HJ, Uibel T (2007) Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsperrholz. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 8. Universität Karlsruhe (TH). ISBN 978-3-86644-129-3
- Bleser P (2012) Grußwort. Gülzower Fachgespräche. Stoffliche Nutzung von Laubholz. 6./7. September 2012, Würzburg. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, 2012
- Bogensperger T, Augustin M, Schickhofer G (2011) Properties of CLT-panels exposed to compression perpendicular to their plane. Alghero, Italy. CIB-W18, Paper 44-12-1, ISSN 1864-1784
- Brüninghoff H, Cyron G, Ehlbeck J, Franz J, Heimeshoff B, Milbrandt E, Möhler K, Radović B, Scheer C, Schulze H, Steck G (1989) Eine ausführliche Erläuterung zu DIN 1052 Teil 1 bis Teil 3, Ausgabe April 1988. Deutsches Institut für Normung e. V. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e. V. Berlin, Köln, Beuth Verlag. Wiesbaden, Berlin, Bauverlag
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2012) Unser Laubholz – Über die Nutzung und Verwen-

dung einheimischer Laubhölzer. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Bonn

Culmann C (1866) Die graphische Statik. Zürich Meyer & Zeller

Dröge G, Stoy KH (1981) Grundzüge des neuzeitlichen Holzbaues, Berlin [u. a.], Ernst.

Egner K, Kolb H (1955) Über den Einfluss der Querschnittsverwächung durch Drahtstifte auf die Tragfähigkeit hölzerner Bauteile. In: Fortschritte und Forschungen im Bauwesen, Reihe D – Nr. 20, Stuttgart, Franckh'sche Verlagshandlung

Egner K, Kolb H (1966) Geleimte Träger und Binder aus Buchenholz. Bauen mit Holz 68(4):147-154

Enders-Comberg M, Blaß HJ (2013) Verbindungen mit faserparallel eingeklebten Gewindestäben in Furnierschichtholz. Prüfbericht Nr. 136142. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine. Karlsruher Institut für Technologie

Enders-Comberg M, Frese M, Blaß HJ (2015) Buchenfurnierschichtholz für Fachwerträger und verstärktes Brettschichtholz. Bautechnik 92 (2015), Heft 1. Ernst & Sohn, Berlin

Frese M (2006) Die Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche – Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Laminierungseffekt. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 5. Dissertation. Universität Karlsruhe (TH). ISBN 3-86644-043-X

Frese M (2012) Buchen-BS-Holz und Buche-Hybridträger – Projekte, Erfahrungen, neue Entwicklungen und Ideen. 2. Stuttgarter Holzbau-Symposium – Neueste Entwicklungen bei geklebten Holzbauteilen, 8./9. November 2012, Materialprüfungsanstalt Universität

Stuttgart (Otto-Graf-Institut), Abteilung Holzkonstruktionen und Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB), Stuttgart

Frese, M; Chen, Y & Blaß, HJ (2010): Tensile strength of spruce glulam. European Journal of Wood and Wood Products 68(3):257-265

Frese M, Enders-Comberg M, Blaß HJ, Glos P (2011) Strength of spruce glulam subjected to longitudinal compression. Alghero, Italy. CIB-W18, Paper 44-12-2, ISSN 1864-1784

Frese M, Enders-Comberg M, Blaß HJ, Glos P (2012) Compressive strength of spruce glulam. European Journal of Wood and Wood Products 70(6):801-809

Frese M, Riedler T (2010) Untersuchung von Buchenschnittholz hinsichtlich der Eignung für Brettschichtholz. European Journal of Wood and Wood Products 68:445-453

Frühwald A, Ressel J, Bernasconi A, Becker P, Pitzner B, Wonnemann R, Mantau U, Sörgel C, Thoroë C, Dieter M, Englert H (2003) Hochwertiges Brettschichtholz aus Buchenholz. Forschungsprojekt – Abschlussbericht. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg

Frühwald K, Schickhofer G (2004) Strength grading of hardwoods. Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering WCTE 2004. Lahti, Finland. Volume III

Gattnar A, Trysna F (1961) Hölzerne Dach- und Hallenbauten. Berlin. Ernst

Gehri E (1985) Verbindungstechniken mit hoher Leistungsfähigkeit – Stand und Entwicklung. Holz als Roh- und Werkstoff 43 (1985) 83-88

- Gehri E (1998) Glued-laminated timber: Use of hardwoods. Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering WCTE 1998. Montreux, Switzerland. Vol. II
- Glos P (1987) Zur Bestimmung des Festigkeitsverhaltens von Brett-schichtholz bei Druckbeanspruchung aus Werkstoff- und Einwirkungs-kenngrößen. Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, Heft 35/78, Laboratorium für den konstruktiven Ingenieurbau, TU München
- Glos P, Lederer B (2000) Sortierung von Buchen- und Eichenschnitt-holz nach der Tragfähigkeit und Bestimmung der zugehörigen Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte. Bericht Nr. 98508. Institut für Holzforschung. TU München
- Glos P, Näher T (2005) Aufnahme der einheimischen Holzarten Buche (*Fagus sylvatica*), Eiche (*Quercus petraea*, *Quercus robur*) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) in die europäische Norm EN 1912. Bericht Nr. 05510. Holzforschung München. TU München
- Görlacher R (2004) Hintergründe und Anwendung der Querdruck-nachweise nach DIN 1052:2004. Ingenieurholzbau. Karlsruher Tage 2004. Bruderverlag. Universität Karlsruhe (TH)
- Görlacher R, Kromer M (1991) Tragfähigkeit von Versatzanschlüssen in historischen Holzkonstruktionen. Bauen mit Holz 3/1991. Bruder-verlag. Karlsruhe
- Gülzower Fachgespräche (2012) Stoffliche Nutzung von Laubholz. 6./7. September 2012, Würzburg. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, 2012
- Heimeshoff B, Köhler N (1989) Untersuchungen über das Tragverhalten von zimmermannsmäßigen Holzverbindungen. Forschungs-bericht. IRB Verlag. München

- Hübner U (2013) Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile. Institut für Holzbau und Holztechnologie. Dissertation. Technische Universität Graz
- Knorz M, van de Kuilen JW (2012) Ergebnisse der Zulassungsversuche für eine ‚allgemeine bauaufsichtliche Zulassung‘ (abZ) von Furnierschichtholz aus Buche. Prüfbericht Nr. 10511. Holzforschung München. TU München
- Knorz M, Xia Z, van de Kuilen JW (2013) Ergebnisse der Zulassungsversuche für eine Erweiterung der beantragten ‚allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung‘ (abZ) von Furnierschichtholz aus Buche. Prüfbericht Nr. 11513. Holzforschung München. TU München
- Kollmann F (1951) Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Zweite Auflage, Band 1, Springer, Göttingen
- Krackler V, Niemz P (2011) Schwierigkeiten und Chancen in der Laubholzverarbeitung. Teil 2: Verwendungsmöglichkeiten von sägefähigem Laubholz. Holztechnologie 52 (2011) 3
- Krüger O, Blaß HJ (2011) Verbindungen mit faserparallel eingeklebten Gewindestäben in Brettschichtholz. Prüfbericht Nr. 106145. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine. Karlsruher Institut für Technologie
- Mantau U (2012) Holzrohstoffbilanz Deutschland, Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung 1987 bis 2015. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, Arbeitsbereich: Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft, Hamburg
- Möhler K, Herröder W (1979) Obere und untere Reibbeiwerte von sägerauhem Fichtenholz. Holz als Roh- und Werkstoff 37 (1979) 27-32

- Mrosek T (2013) Trends in der Forst- und Holzwirtschaft mit Bezug zum Holzbau. Tagungsband der Aachener Holzbautagung 2013. FH Aachen
- Neuhaus H (2011) Ingenieurholzbau Grundlagen – Bemessung – Nachweise – Beispiele. Vieweg + Teubner. Wiesbaden
- Pasternak H, Bachmann V, Kubieniec G (2010) Leichte Fachwerkträger – Fertigungstechnologie und Tragverhalten. Bauingenieur 10/2010, Band 85
- Ringhofer A, Brandner R (2012) Einfluss der Anzahl und Orientierung der Schichten auf das Ausziehtragverhalten selbstbohrender Holzschrauben in Brettsperholz. Internationales Holzbauforum 2012. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
- Rodd P (1973) The analysis of timber joints made with circular dowel connectors. Dissertation, University of Sussex, England
- Sandhaas C, Frese M (2014) Critical discussion on properties of beech LVL. Note INTER/47-12-2. Bath, UK
- Schmidt M, Torno S, Knorz M (2012) Laubholz im Bauwesen – ein aktueller Überblick. Bauen mit Holz 12/2012. Bruderverlag.
- Sjödin J, Serrano E, Enquist B (2006) Contact-free measurements and numerical analyses of the strain distribution in the joint of steel-to-timber dowel joints. Holz als Roh- Werkstoff 64:497-506
- Sjödin J, Serrano E, Enquist B (2008) An experimental and numerical study of the effect of friction in single dowel joints. Holz als Roh- und Werkstoff 66:363-372
- Spengler R (1982) Festigkeitsverhalten von Brettschichtholz unter zweiachsiger Beanspruchung – Teil 1, Ermittlung des Festigkeits-

- verhaltens von Brettelelementen aus Fichte durch Versuche. TU München
- Steck G (2002) Einseitige Beanspruchung in Zugverbindungen. Bauen mit Holz 3/2002. Bruderverlag. Karlsruhe
- Tannert T, Lam F, Vallée T (2011) Structural performance of rounded dovetail connections: experimental and numerical investigations. European Journal of Wood and Wood Products 69(3):471-482
- Troche A (1951) Grundlagen für den Ingenieur-Holzbau: Bemessung und Konstruktion, Darmstadt [u. a.], Schroedel.
- Tucker J (1927) A study of compressive strength dispersion of material with applications. Journal of the Franklin Institute. Volume 204, Pages 751-781
- Uibel T (2012) Spaltverhalten von Holz beim Eindrehen von selbstbohrenden Holzschrauben. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 20. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. ISBN 978-3-86644-835-3
- Uibel T (2013) Tragverhalten von Verbindungen für die Brettsperrholzbauweise. Tagungsband der Aachener Holzbautagung 2013. FH Aachen
- Weibull W (1939) A statistical theory of the strength of materials. Royal Swedish Institute for Engineering Research. Proceedings, N.141, Page 45

Zitierte Normen

DIN 1052:1969-10 Holzbauwerke – Berechnung und Ausführung

DIN 1052:1988-04 Holzbauwerke – Berechnung und Ausführung

DIN 1052:2008-12 Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau

DIN 7998:1975-02 Gewinde und Schraubenenden für Holzschrauben

DIN 53804-1:2002-04 Statistische Auswertungen – Teil 1: Kontinuierliche Merkmale

DIN EN 338:2010-02 Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen

DIN EN 392:1996-04 Brettschichtholz – Scherprüfung der Leimfugen

DIN EN 408:2010-12 Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften

DIN EN 1194:1999-05 Holzbauwerke – Brettschichtholz – Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte

DIN EN 1382:2000-03 Holzbauwerke – Prüfverfahren – Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmitteln

DIN EN 1912:2007-05 Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen – Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten

DIN EN 1995-1-1:2010-12 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau

- DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- DIN EN 14358:2007-03 Holzbauwerke – Berechnung der 5%-Quantile für charakteristische Werte und Annahmekriterien für Proben
- DIN EN 26891:1991-07 Holzbauwerke – Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln

Zitierte Zulassungen

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-679 vom 16. April 2013. BS-Holz aus Buche und BS-Holz Buche-Hybridträger. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-705 vom 26. Januar 2009. 2K-EP-Klebstoff WEVO-Spezialharz EP 32 S mit WEVO-Härter B22 TS zum Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-750 vom 7. Januar 2010. WEVO-Spezialharz EP 20/VP1 mit WEVO-Härter B 20/1 zur Instandsetzung von tragenden Holzbauteilen. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-777 vom 30. November 2010. Gewindestange mit Holzgewinde als Holzverbindungs-mittel. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-837 vom 2. Dezember 2013. Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-838 vom 21. September 2013. Furnierschichtholz aus Buche zur Ausbildung stabför-miger und flächiger Tragwerke. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin

Europäische Technische Zulassung ETA-11/0190 vom 5. September 2011. Selbstbohrende Schrauben als Holzverbindungs-mittel. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin

Bezeichnungen

a	Breite des Zugstabes
A	Querschnittsfläche
a_1	Verbindungsmittelabstand in Faserrichtung der Querlage
$a_{1,c}$	Randabstand in Faserrichtung der Querlage
A_{Brutto}	Bruttoquerschnittsfläche
AbZ	Allgemein bauaufsichtliche Zulassung
A_c	Querdruckfläche
$A_{c,hybrid}$	Querdruckfläche im Hybrid-BSH-Querschnitt
A_{Gurt}	Querschnittsfläche im Bereich des Gurtes
A_{Knoten}	Querschnittsfläche im Bereich des Knotens
A_{Netto}	Nettoquerschnittsfläche
a_{Spalt}	Abstand der Spaltbewehrung zum Zugstabende
A_v	Scherfläche
b	Abstand der wirkenden Spaltkräfte
B	Breite
b	Breite der Versatzbauteile
BSH	Brettschichtholz
BSP	Brettsperrholz
Bu	Buche
c	Querdruckversagen
d	Durchmesser
D	Druckkraft
DMS	Dehnmessstreifen
e	Anschluss exzentrität
$E_{c,0}$	Elastizitätsmodul in Faserrichtung auf Druck
$E_{t,0}$	Elastizitätsmodul in Faserrichtung auf Zug
F	Kraft
f	Ausmitte im Stirnversatzanschluss

$f_{v,k}^*$	Erhöhte Schubfestigkeit
$F_{1,5mm}$	Kraft bei einer Verschiebung von 1,5 mm
F_{15mm}	Kraft bei einer Verschiebung von 15 mm
f_{ax}	Ausziehparameter
$f_{ax,Bu}$	Ausziehparameter des verwendeten Buchenholzes
$f_{ax,corr}$	Korrigierter Ausziehparameter
$f_{ax,hyb}$	Ausziehparameter des Hybrid-BSH
$f_{ax,k}$	Charakteristischer Wert des Ausziehparameters
$F_{ax,mean}$	Mittelwert des Ausziehwiderstandes
$f_{ax,mean}$	Mittelwert des Ausziehparameters
$f_{ax,mean,FE}$	Mittelwert des durch ein Finite-Elemente-Modell ermittelten Ausziehparameters
$f_{ax,mean,Test}$	Mittelwert des durch Versuche ermittelten Ausziehparameters
$f_{ax,NH}$	Ausziehparameter des verwendeten Nadelholzes
$F_{ax,Rd}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit auf Herausziehen des Verbindungsmittels
$F_{ax,Rk}$	Charakteristischer Wert der Tragfähigkeit auf Herausziehen des Verbindungsmittels
$F_{ax,\alpha,Rk}$	Charakteristischer Wert der Tragfähigkeit auf Herausziehen
$f_{c,90}$	Querdruckfestigkeit
$f_{c,90,EN408}$	Querdruckfestigkeit nach EN 408
$f_{c,90,max}$	Maximale Querdruckfestigkeit
$f_{c,Brutto}$	Druckfestigkeit des Bruttoquerschnitts
$f_{c,Brutto,Typ X}$	Druckfestigkeit des Bruttoquerschnitts des Typs X
$F_{c,GZG,est}$	Schätzlast der Querdrucktragfähigkeit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
$F_{c,GZT,est}$	Schätzlast der Querdrucktragfähigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit
$f_{c,Netto}$	Druckfestigkeit des Nettoquerschnitts
$f_{c,Netto,k}$	Charakteristische Nettodruckfestigkeit
FE	Finite Elemente
F_{est}	Geschätzte Höchstlast
Fi	Fichte
f_{k1}	Klebefugenfestigkeit

F_{max}	Höchstlast
$F_{max,mean}$	Mittelwert der Höchstlast
$F_{max,Test,05}$	5 %-Quantil der experimentell ermittelten Tragfähigkeit
$F_{max,Test,MW}$	Mittelwert der experimentell ermittelten Tragfähigkeit
$f_{R,k}$	Charakteristische Rollschubfestigkeit
$f_{R,mean}$	Mittelwert der Rollschubfestigkeit
$F_{R,Rd}$	Bemessungswert des Scherwiderstands (Rollschub)
$F_{R,Rk}$	Charakteristischer Scherwiderstand (Rollschub)
FSH	Furnierschichtholz
$F_{Spalten,L,M}$	Spalkraft rechtwinklig zur Faserrichtung der Querlage aufgrund der Anschlusszentrität
$F_{Spalten,L,V}$	Spalkraft rechtwinklig zur Faserrichtung der Querlage aufgrund der Abstützung der Gewindeflanke auf dem Holz
f_t	Zugfestigkeit
$f_{t,0,05}$	5 %-Quantil der Zugfestigkeit
$f_{t,Brutto}$	Zugfestigkeit des Bruttoquerschnitts
$f_{t,Brutto,Typ X}$	Zugfestigkeit des Bruttoquerschnitts des Typs X
$f_{t,Gurt}$	Zugfestigkeit im Bereich des Gurtes
$f_{t,k}$	Charakteristische Zugfestigkeit
$f_{t,Knoten}$	Zugfestigkeit im Bereich des Knotens
$f_{t,mean}$	Mittelwert der Zugfestigkeit
$f_{t,Netto}$	Zugfestigkeit des Nettoquerschnitts
$F_{t,Rd}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit auf Zug
$F_{t,Rk}$	Charakteristische Tragfähigkeit auf Zug
$F_{t,u,k}$	Charakteristische Stahlzugtragfähigkeit
$F_{t,u,Rd}$	Bemessungswert der Stahlzugtragfähigkeit
$f_{tens,k}$	Charakteristischer Zugwiderstand einer Schraube
f_v	Schubfestigkeit
$F_{v,est}$	Schätzlast der Schubtragfähigkeit
γ_m	Teilsicherheitsbeiwert für eine Baustoffeigenschaft
GS	Gewindestange/Gewindestab
G_X	Gurtbereich Nr. X
H	Reibungskraft parallel zur Kontaktfuge bzw. Höhe
h	Höhe des Gesamtquerschnitts

h_{Bu}	Höhe des Buchenholzanteils
h_{NH}	Höhe des Nadelholzanteils
h_S	Strebenhöhe
i	Anzahl
I	Flächenmoment zweiten Grades
k_{ax}	Faktor, der den Winkel zwischen Schraubenachse und Faser- richtung berücksichtigt
$k_{c,90}$	Querdruckbeiwert
k_{cr}	Rissfaktor für die Beanspruchbarkeit auf Schub
K_{Gesamt}	Gesamtsteifigkeit
K_{Holz}	Steifigkeit des Holzes
$K_{Kalibrierung}$	Steifigkeit der Kalibriermessung
k_l	Faktor zur Berücksichtigung des Längeneffekts
$k_{l,mean}$	Faktor zur Berücksichtigung des Längeneffekts in Bezug auf den Mittelwert
K_{mean}	Gemittelte Steifigkeit
k_{mod}	Modifikationsbeiwert für Lasteinwirkungsdauer und Feuch- tegehalt
K_{oben}	Steifigkeit oben
k_s	Verschiebungsmodul nach DIN EN 26891
$k_{s,Anfang}$	Verschiebungsmodul im Anfangslastbereich
$k_{s,W}$	Verschiebungsmodul nach Wiederbelastung
$k_{s,Wiederbelastung}$	Verschiebungsmodul nach Wiederbelastung
$k_{s,\beta,Anfang}$	Verdrehsteifigkeit im Anfangslastbereich
$k_{s,\beta,Wiederbel.}$	Verdrehsteifigkeit nach Wiederbelastung
K_{ser}	Verschiebungsmodul
K_{Stahl}	Steifigkeit des Stahls
K_{sys}	Verschiebungsmodul des betrachteten Systems
K_{unten}	Steifigkeit unten
K_X	Knoten Nr. X
L	Länge des Prüfkörpers
L_{ad}	Einklebelänge eines Gewindestabes
L_c	Länge der angenommenen Querdruckfläche

$L_{c,hybrid}$	Länge der angenommenen Querdruckfläche im Hybrid-BSH-Querschnitt
L_{ef}	Einschraublänge
ℓ_{ef}	Verankerungslänge
L_S	Strebenlänge
L_V	Zurückversetztes Klebefugenende bzw. Länge der Scherfläche
M	Moment
M_{actio}	Wirkendes Moment infolge einer Exzentrizität
$M_{reactio}$	Entgegenwirkendes Moment
N	Kraft rechtwinklig zur Kontaktfuge bzw. Anzahl der Versuche
n	Anzahl der Werte aus einer Grundgesamtheit
N_d	Bemessungswert der in der Strebe wirkenden Normalkraft
n_{ef}	Wirksame Anzahl von Verbindungsmitteln
n_F	Anzahl der Fersenversätze
NH	Nadelholz
NKL	Nutzungsklasse
n_Q	Anzahl der Querlagen
n_S	Anzahl der Stirnversätze
n_{VM}	Anzahl der Verbindungsmittel
$P(\text{Versagen})$	Versagenswahrscheinlichkeit
$P_i(N-V)$	Wahrscheinlichkeit, dass das Bauteil i nicht versagt
PK	Prüfkörper
R	Korrelationskoeffizient
$R_{v,k}^*$	Charakteristische Schubtragfähigkeit mit erhöhter Schubfestigkeit
R^2	Bestimmtheitsmaß
R_c	Querdrucktragfähigkeit
$R_{c,90,k}$	Charakteristische Querdrucktragfähigkeit
R_d	Bemessungswert der Beanspruchbarkeit
R_k	Charakteristischer Widerstand
$R_{MW,geschwächt}$	Mittlere Tragfähigkeit des geschwächten Prüfkörpers
$R_{MW,ungeschwächt}$	Mittlere Tragfähigkeit des ungeschwächten Prüfkörpers

$R_{S,Xm,k}$	Charakteristische Tragfähigkeit einer X m langen Strebe nach dem Ersatzstabverfahren
R_{Strebe}	Tragfähigkeit der Strebe im Bereich der Kontaktverbindung
$R_{Strebe,k}$	Charakteristische Tragfähigkeit der Strebe im Bereich der Kontaktverbindung
$R_{t,u,mean}$	Mittelwert der Stahlzugtragfähigkeit
R_v	Schubtragfähigkeit
$R_{v,k}$	Charakteristische Schubtragfähigkeit
$R_{Versatz,k}$	Charakteristische Tragfähigkeit des Versatzes
s	Standardabweichung
S	Versagen der Strebe
t	Dicke des Zugstabes
T	Bauteiltiefe
t_L	Dicke der Längslage
t_Q	Dicke der Querlage
t_V	Einschnitttiefe
u	Holzfeuchte
u_{hinten}	Vertikalverschiebung der Riegelhinterkante
u_{mean}	mittlere Holzfeuchte
u_{vorne}	Vertikalverschiebung der Riegelvorderkante
v	Variationskoeffizient bzw. Schubversagen
V	Auflagerkraft
VG	Vollgewinde
VH	Vollholz
VIS	Visuelle Sortierklasse
$V-Sr$	In die Flankenfuge eingebrachte Schrauben
X	Gesamtpalkkraft
x	Spannungskomponente rechtwinklig zur Stablängsachse, Abstand zweier Fersentäler bzw. Ausmitte im Lastfall "Glaslast"
$x_{ }$	Spannungskomponente parallel zur Faserrichtung
x_{\perp}	Spannungskomponente rechtwinklig zur Faserrichtung
$x_{0,05}$	5 %-Quantil
x_1	Lastpfad parallel zur Faserrichtung

x_2	Lastpfad rechtwinklig zur Faserrichtung
\bar{x}	Arithmetischer Mittelwert
X-Sr	Gekreuzt eingebrachte Schrauben
z	Tiefe des FE-Modells
Z	Zapfenlänge
α	Flankenwinkel der Gewindestange, Winkel zwischen der Verbindungsmittellängsachse und der Holzfaserrichtung, Anschlusswinkel bzw. Signifikanzniveau
β	Verdrehung des Riegels
γ	Winkel des Stirnversatzes
δ	Faktor zur Skalierung der Zugkräfte
Δ	Differenz
Δ_i bzw. $\Delta \ell$	Verschiebung
Δ_{max}	Verschiebung beim Erreichen der Tragfähigkeit
Δ_{oben}	Verschiebung des Stahlrahmens oben
Δ_{unten}	Absenkung der Riegelvorderkante
ε	Stauchung
ε_0	Stauchung in Faserrichtung
η	Verhältnisswert
μ_0	Reibbeiwert
ρ_{darr}	Darrrohdichte
ρ_k	Charakteristische Rohdichte
ρ_{mean}	Mittlere Rohdichte
$\sigma_{parallel}$	Spannung parallel zur Faserrichtung
$\sigma_{senkrecht}$	Spannung rechtwinklig zur Faserrichtung
σ_x	Spannung in x-Richtung (Hier: Querspannung)
σ_y	Spannung in y-Richtung (Hier: Längsspannung)
$\sigma_{y,min}$	Kleinste Längsspannung
τ	Schubfestigkeit nach Spengler (1982)
\parallel	parallel zur Faser
\perp	rechtwinklig zur Faser
\emptyset	Durchmesser
\emptyset_{Bohr}	Vorbohrdurchmesser

Anhang

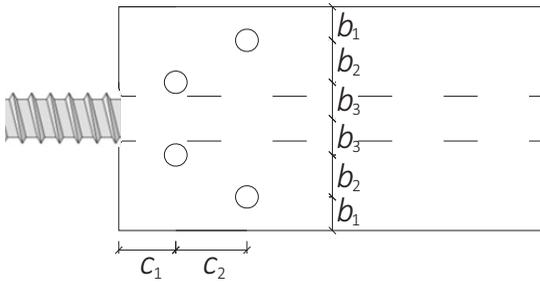


Bild A-1 Definition der Quersugbewehrungsmaße der Prüfkörper mit einer Gewindestange

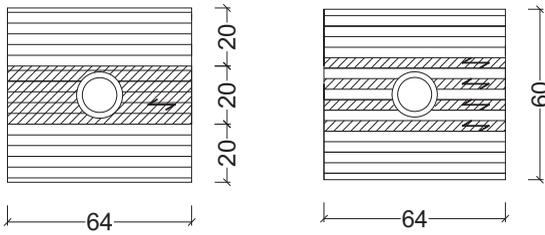


Bild A-2 Querschnitt Reihe 13 und 14 (links) und Reihe 15 (rechts) aus Buchenfuernerschichtholz

Tabelle A-1 Maße der Querkugbewehrung in mm

Reihe	b_1	b_2	b_3	c_1	c_2
1	20	10	18		
2	15	7	18		
3	15	0	17		
4 & 5	20	20	20	30	30
6 & 7	20	10	20		
8	15	5	20		
13 - 15	15	0	17		

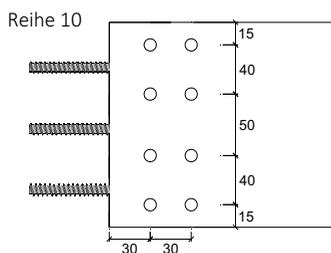
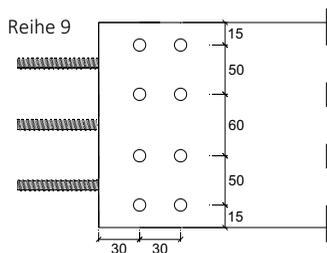
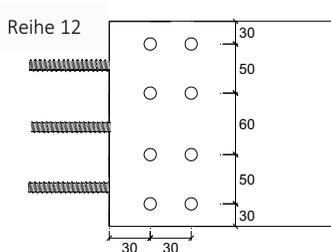
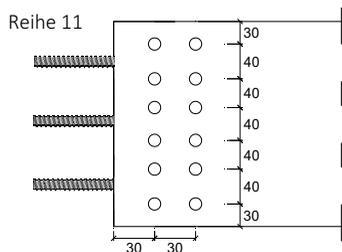


Tabelle A-2 Versuchsergebnisse Reihe 1

L_{ad}	Nr.	F_{max} kN	f_{ax} N/mm ²	K_{oben} kN/mm	K_{unten} kN/mm	Versagen
500 mm	1	99,1	12,4	66,7	65,3	S
	2	102	12,8	64,0	63,4	S
	3	99,5	12,4	61,4	69,0	S
	4	102	12,8	-	65,7	S
	5	101	12,6	63,6	51,9	S
Mittelwert		101	12,6	63,4		
Variationskoeffizient		1,2 %		7,6 %		
S	Fließen des Stahls					
	Grau markierte Felder zeigen das Versagen (oben oder unten)					

Tabelle A-3 Versuchsergebnisse Reihe 2

L_{ad}	Nr.	F_{max} kN	f_{ax} N/mm ²	K_{oben} kN/mm	K_{unten} kN/mm	Versagen
500 mm	1	101	12,6	62,7	64,0	S
	2	98,4	12,3	-	60,2	S
	3	97,6	12,2	63,7	60,7	S
	4	100	12,5	-	62,9	S
	5	97,8	12,2	58,5	61,2	S
Mittelwert		99,0	12,4	61,7		
Variationskoeffizient		1,5 %		3,1 %		
S	Fließen des Stahls					
	Grau markierte Felder zeigen das Versagen (oben oder unten)					

Tabelle A-4 Versuchsergebnisse Reihe 3

L_{ad}	Nr.	F_{max} kN	f_{ax} N/mm ²	K_{oben} kN/mm	K_{unten} kN/mm	Versagen
500 mm	1	97,3	12,2	70,3	71,1	S
	2	98,1	12,3	68,9	67,4	S
	3	97,9	12,2	65,1	68,5	S
	4	98,8	12,4	63,9	54,4	S
	5	98,7	12,3	71,2	60,7	S
Mittelwert		98,2	12,3	66,1		
Variationskoeffizient		0,6 %		8,1 %		
S	Fließen des Stahls					
	Grau markierte Felder zeigen das Versagen (oben oder unten)					

Tabelle A-5 Versuchsergebnisse Reihe 4

L_{ad}	Nr.	F_{max} kN	f_{ax} N/mm ²	K_{oben} kN/mm	K_{unten} kN/mm	Versagen
600 mm	1	163	13,6	84,6	91,0	H
	2	163	13,6	110	108	H
	3	171	14,2	104	109	H
	4*	154*	12,9*	101	111	H
	5	163	13,5	103	98,5	H
Mittelwert		165	13,7	102		
Variationskoeffizient		2,5 %		8,5 %		
H	Holzversagen (Rollschub)					
*	Versagen der Haltevorrichtung, danach Wiederbelastung (Der Versuch wurde in der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt)					
	Grau markierte Felder zeigen das Versagen (oben oder unten)					

Tabelle A-6 Versuchsergebnisse Reihe 5

L_{ad}	Nr.	F_{max} kN	f_{ax} N/mm ²	K_{oben} kN/mm	K_{unten} kN/mm	Versagen
700 mm	1	172	12,3	105	106	S
	2	173	12,3	102	116	H
	3	172	12,3	104	102	S
	4	162	11,6	105	113	H
	5	153	10,9	102	109	H
Mittelwert		166	11,9	106		
Variationskoeffizient		5,2 %		4,6 %		
S	Fließen des Stahls					
H	Holzversagen (Rollschub)					
	Grau markierte Felder zeigen das Versagen (oben oder unten)					

Tabelle A-7 Versuchsergebnisse Reihe 6

L_{ad}	Nr.	F_{max} kN	f_{ax} N/mm ²	K_{oben} kN/mm	K_{unten} kN/mm	Versagen
600 mm	1	127	10,6	104	119	H
	2	122	10,2	78,5	86,6	H
	3	153	12,8	74,5	76,7	H
	4	120	10,0	88,2	92,7	H
	5	156	13,0	97,4	84,8	H
Mittelwert		136	11,3	90,3		
Variationskoeffizient		12,9 %		15,1 %		
H	Holzversagen (Rollschub)					
	Grau markierte Felder zeigen das Versagen (oben oder unten)					

Tabelle A-8 Versuchsergebnisse Reihe 7

L_{ad}	Nr.	F_{max} kN	f_{ax} N/mm ²	K_{oben} kN/mm	K_{unten} kN/mm	Versagen
700 mm	1	160	11,5	98,1	83,9	H
	2	171	12,2	92,9	101,0	S
	3	172	12,3	92,2	95,5	H
	4	159	11,3	94,2	106,6	H
	5	167	11,9	84,2	91,9	H
Mittelwert		166	11,8	94,1		
Variationskoeffizient		3,6 %		7,4 %		
S	Fließen des Stahls					
H	Holzversagen (Rollschub)					
	Grau markierte Felder zeigen das Versagen (oben oder unten)					

Tabelle A-9 Versuchsergebnisse Reihe 8

L_{ad}	Nr.	F_{max} kN	f_{ax} N/mm ²	K_{oben} kN/mm	K_{unten} kN/mm	Versagen
800 mm	1	173	10,8	104,8	93,8	H
	2	163	10,2	92,0	81,9	H
	3	157	9,8	85,9	99,8	H
	4	173	10,8	86,1	93,0	S
	5	149	9,3	92,2	91,3	H
Mittelwert		163	10,2	92,1		
Variationskoeffizient		6,5 %		7,3 %		
S	Fließen des Stahls					
H	Holzversagen (Rollschub)					
	Grau markierte Felder zeigen das Versagen (oben oder unten)					

Tabelle A-10 Versuchsergebnisse Reihe 9

L_{od}	Nr.	F_{max} kN	f_{ax} N/mm ²	K_{oben} kN/mm	K_{unten} kN/mm	Versagen
500 mm	1	267	11,1	160	148	H
	2	270	11,2	260	176	H
	3	283	11,8	127	233	H
	4	286	11,9	139	227	H
	5	270	11,3	160	333	H
Mittelwert		275	11,5	196		
Variationskoeffizient		3,1 %		33,4 %		
H	Holzversagen (Rollschub)					
	Grau markierte Felder zeigen das Versagen (oben oder unten)					

Tabelle A-11 Versuchsergebnisse Reihe 10

L_{od}	Nr.	F_{max} kN	f_{ax} N/mm ²	K_{oben} kN/mm	K_{unten} kN/mm	Versagen
500 mm	1	258	10,7	155	128	H
	2	254	10,6	178	150	H
	3	263	10,9	269	188	H
	4	266	11,1	145	119	H
	5	264	11,0	149	175	H
Mittelwert		261	10,9	166		
Variationskoeffizient		1,9 %		25,4 %		
H	Holzversagen (Rollschub)					
	Grau markierte Felder zeigen das Versagen (oben oder unten)					

Tabelle A-12 Versuchsergebnisse Reihe 11

L_{ad}	Nr.	F_{max} kN	f_{ax} N/mm ²	K_{oben} kN/mm	K_{unten} kN/mm	Versagen
400 mm	1	260	10,8	155	359	S
	2	291	12,1	171	138	H
	3	302	12,6	196	235	H
	4	266	11,1	204	293	H
	5	255	10,6	169	303	H
Mittelwert		275	11,4	222		
Variationskoeffizient		7,5 %		33,0 %		
S	Fließen des Stahls					
H	Holzversagen (Rollschub)					
	Grau markierte Felder zeigen das Versagen (oben oder unten)					

Tabelle A-13 Versuchsergebnisse Reihe 12

L_{ad}	Nr.	F_{max} kN	f_{ax} N/mm ²	K_{oben} kN/mm	K_{unten} kN/mm	Versagen
400 mm	1	255	10,6	231	123	H
	2	254	10,6	186	173	H
	3	263	10,9	-	166	H
	4	246	10,3	172	195	H
	5	251	10,4	135	297	H
Mittelwert		254	10,6	187		
Variationskoeffizient		2,4 %		27,9 %		
H	Holzversagen (Rollschub)					
	Grau markierte Felder zeigen das Versagen (oben oder unten)					

Tabelle A-14 Versuchsergebnisse Reihe 13

L_{ad}	Nr.	ρ kg/m ³	F_{max} kN	f_{ax} N/mm ²	K_{mean} kN/mm	Versagen
200 mm	1	823	86,6	27,1	-	R
	2	766	97,7	30,5	-	S
	3	806	93,3	29,2	-	R/S
	4	770	98,1	30,6	99	R
	5	758	98,5	30,8	114	S
Mittelwert		785	94,8	29,6		
Variationskoeffizient		3,6%	5,3 %			
R	Rollschubversagen im Übergang von Quer- zur Längslage					
S	Fließen des Stahls					



Bild A-3 Versagensbild der maßgebenden Verbindung der Reihe 13

Tabelle A-15 Versuchsergebnisse Reihe 14

L_{ad}	Nr.	ρ kg/m ³	F_{max} kN	f_{ax} N/mm ²	K_{mean} kN/mm	Versagen
300 mm	1	836	104,5	21,8	-	S/Z
	2	792	98,5	20,5	-	S
	3	781	97,9	20,4	-	S
	4	750	96,9	20,2	120	S
	5	775	96,2	20,0	123	S
Mittelwert		787	98,8	20,6		
Variationskoeffizient		4,0 %	3,3 %			
S	Fließen des Stahls/Versagen im Gewindestabquerschnitt					
Z	Zugversagen der Längslage infolge großer Stahldehnungen					



Bild A-4 Versagensbild der maßgebenden Verbindung der Reihe 14

Tabelle A-16 Versuchsergebnisse Reihe 15

L_{od}	Nr.	ρ kg/m ³	F_{max} kN	f_{ax} N/mm ²	K_{mean} kN/mm	Versagen
200 mm	1	766	89,7	28,0	-	H
	2	753	93,2	29,1	-	H
	3	751	94,8	29,6	-	H
	4	749	91,8	28,7	114	H
	5	748	90,8	28,4	118	H
Mittelwert		753	92,0	28,8		
Variationskoeffizient		1,0 %	2,2 %			

H Herausziehen der Gewindestange/Holzversagen in der Mantelfläche und zusätzliches Aufspalten (vgl. Bild A-5)



Bild A-5 Versagensbild der maßgebenden Verbindung der Reihe 15



Bild A-6 Mangelhafte Verklebung – aufgetrennter Prüfkörper der Reihe 6

Tabelle A-17 Versuchsergebnisse eingeklebte GS in Buchen-FSH ohne Querbewehrung ($d = 16 \text{ mm}$ und $L_{ad} = 160 \text{ mm}$)

L_{ad}	Nr.	ρ kg/m ³	F_{max} kN	K_{mean} kN/mm	Versagen
160 mm	1	765	75,8	-	A*
	2	755	71,2	-	A*
	3	765	78,9	-	A*
	4	749	65,6	250	A*
	5	765	64,3	225	A*
Mittelwert		760	71,2		
Variationskoeffizient		1,0 %	8,9 %		

* A Aufspalten des Holzes (vgl. Bild A-7)



Bild A-7 Versagensbild der maßgebenden Verbindung der eingeklebten GS in Buchen-FSH ohne Querbewehrung

Tabelle A-18 Versuchsergebnisse eingeklebte GS in Buchen-FSH mit Querbewehrung ($d = 16 \text{ mm}$ und $L_{ad} = 160 \text{ mm}$)

L_{ad}	Nr.	ρ kg/m ³	F_{max} kN	K_{mean} kN/mm	Versagen
160 mm	1	743	97,0	-	A & S*
	2	760	95,8	-	A & S*
	3	746	96,8	-	A & S*
	4	754	101,3	253	A & S*
	5	764	100,3	286	A & S*
Mittelwert		753	98,2		
Variationskoeffizient		1,2 %	2,5 %		

* A & S Aufspalten des Holzes und Scherversagen im Bereich der Verklebung entlang des Stabes (vgl. Bild A-8)



Bild A-8 Versagensbild der maßgebenden Verbindung der eingeklebten GS in Buchen-FSH mit Querbewehrung

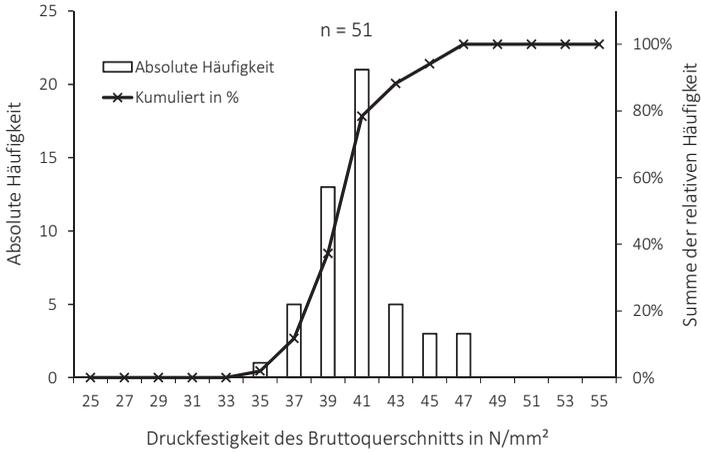


Bild A-9 Histogramm und Summenlinie für Reihe A2

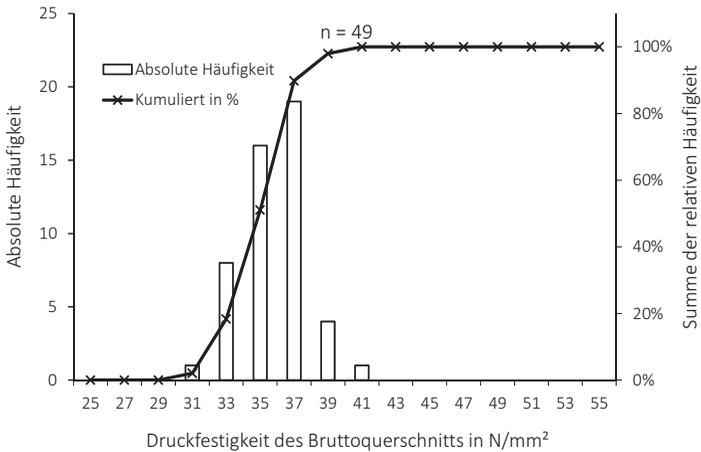


Bild A-10 Histogramm und Summenlinie für Reihe A3

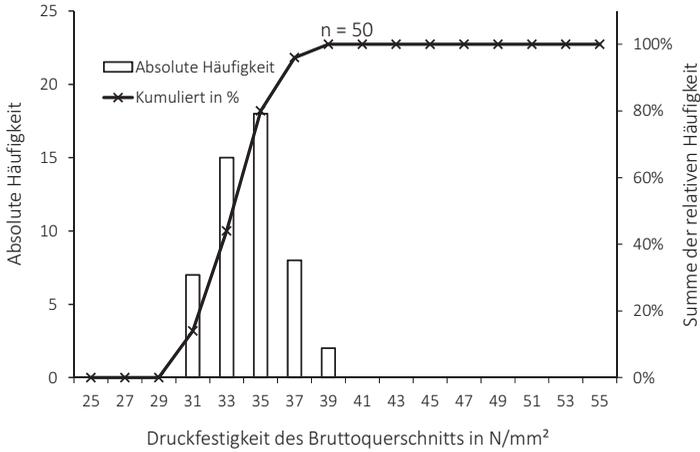


Bild A-11 Histogramm und Summenlinie für Reihe B

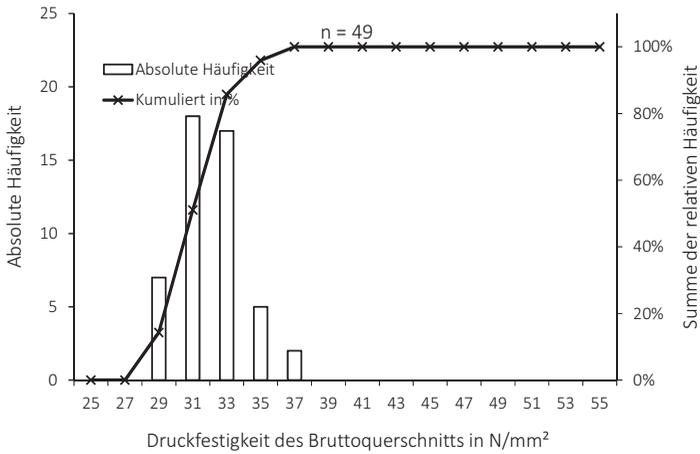


Bild A-12 Histogramm und Summenlinie für Reihe C

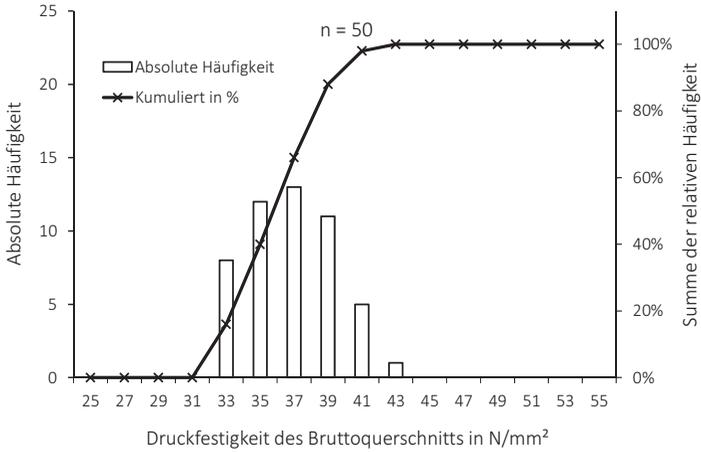


Bild A-13 Histogramm und Summenlinie für Reihe D

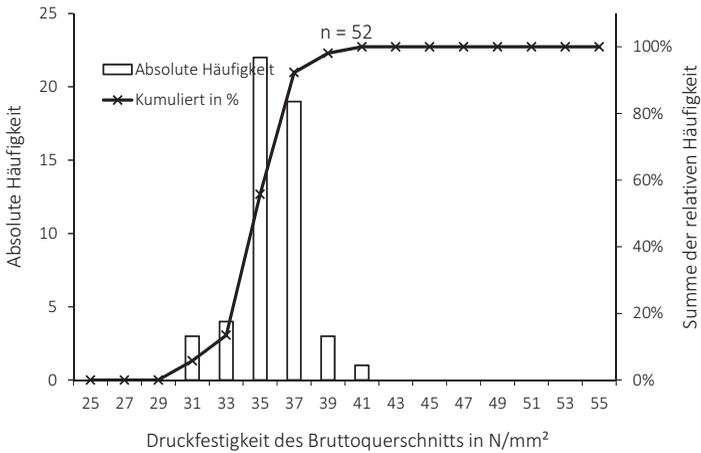


Bild A-14 Histogramm und Summenlinie für Reihe E

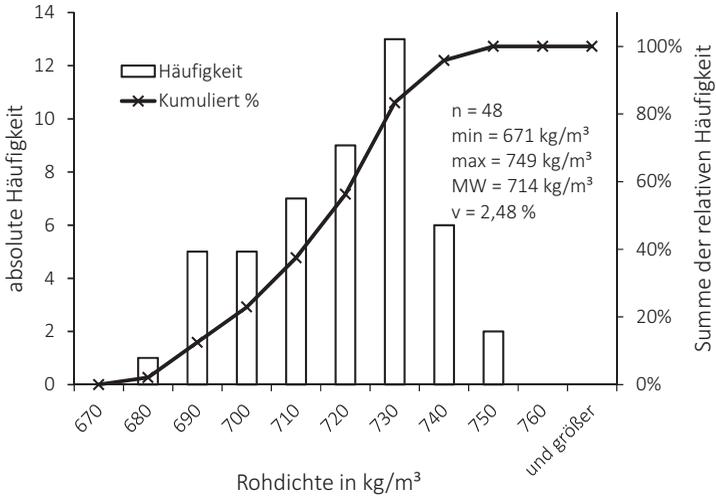


Bild A-15 Histogramm und Summenlinie für Buche-BSH ungeschwächt

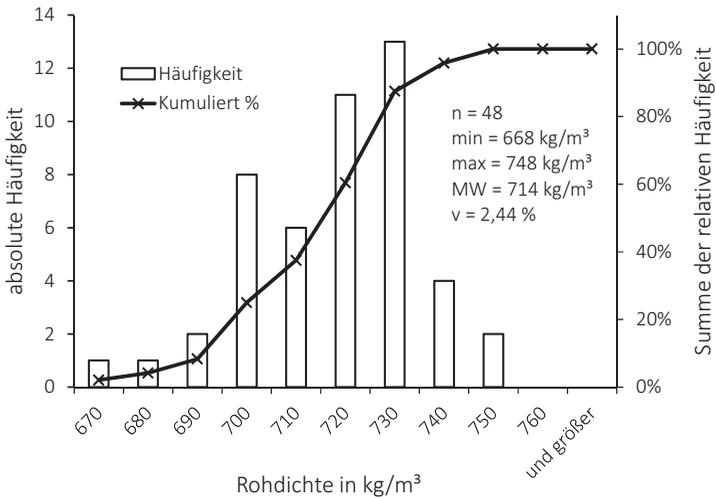


Bild A-16 Histogramm und Summenlinie für Buche-BSH geschwächt

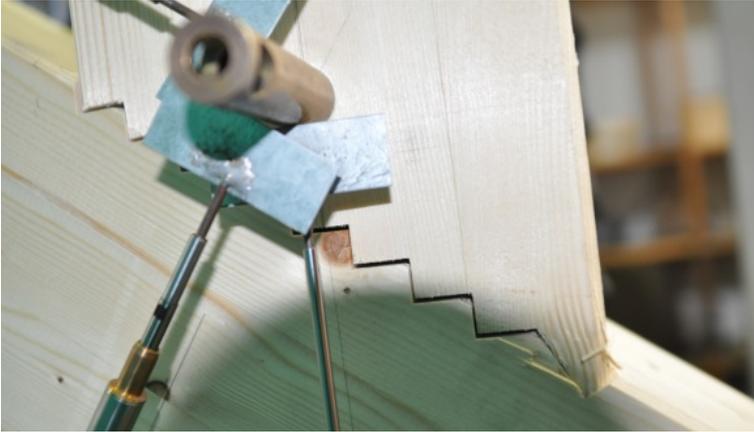


Bild A-17 Nicht passgenauer Abbund (Versuch 2 der Reihe 8)



Bild A-18 Scherversagen im Gurtbauteil des Fichten-BSH; Reihe 5

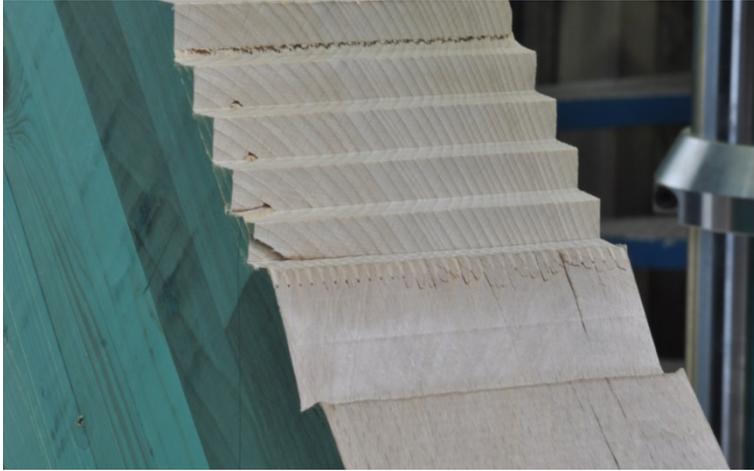


Bild A-19 Scherversagen im Gurtbauteil des Hybrid-BSH; Reihe 6



Bild A-20 Versagen der Strebe; Reihe 6

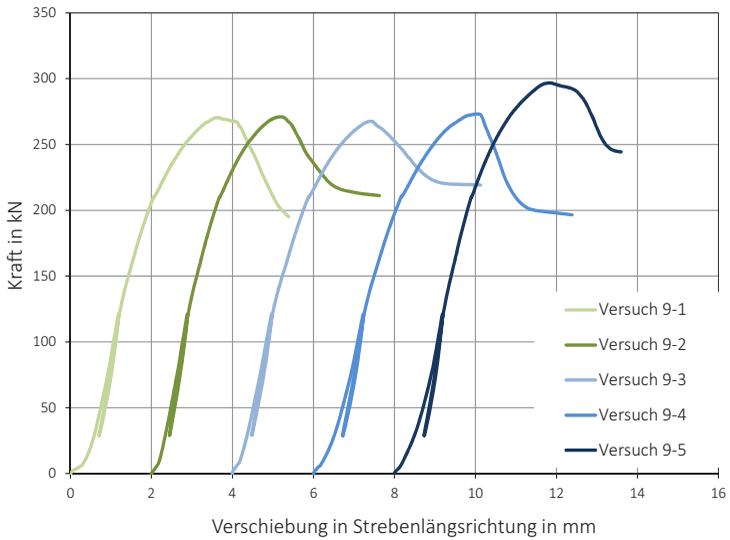


Bild A-21 Last-Verformungs-Diagramm Reihe 9

Tabelle A-19 Versuchsergebnisse Reihe 9

Nr.	F_{max} in kN	$F_{1,5 mm}$ in kN		v_{max} in mm	k_s in kN/mm	
		Mit Schlupf	Ohne Schlupf		Anfang	Nach Vorlast
1	271	159	210	3,6	156	192
2	271	195	216	3,2	169	203
3	268	178	205	3,4	154	183
4	273	151	202	4,0	131	174
5	297	165	225	3,8	136	199
Mittelwert	276	170	212	3,6	149	190
Variations- koeffizient	4,3 %	10,1 %	4,3 %	9,4 %	10,4 %	6,2 %

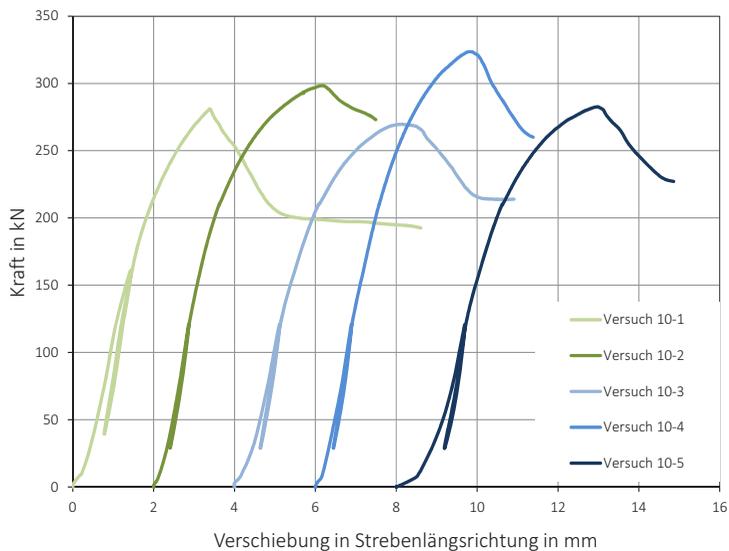


Bild A-22 Last-Verformungs-Diagramm Reihe 10

Tabelle A-20 Versuchsergebnisse Reihe 10

Nr.	F_{max} in kN	$F_{1,5\,mm}$ in kN		v_{max} in mm	k_s in kN/mm	
		Mit Schlupf	Ohne Schlupf		Anfang	Nach Vorlast
1	281	168	218	3,4	135	176
2	299	201	220	4,2	173	196
3	270	163	204	4,1	142	189
4	324	203	233	3,8	166	202
5	283	93	205	5,0	115	174
Mittelwert	291	166	216	4,1	146	187
Variations- koeffizient	7,2 %	26,9 %	5,6 %	14,3 %	16,1 %	6,4 %

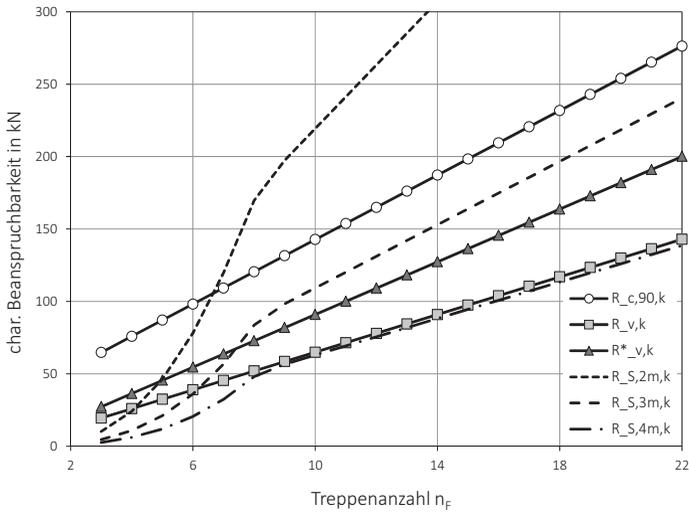


Bild A-23 Char. Beanspruchbarkeiten für Druckstrebe mit Treppenversatz aus NH-BSH der Breite $b = 100 \text{ mm}$; $\alpha = 35^\circ$ und $t_v = 10 \text{ mm}$

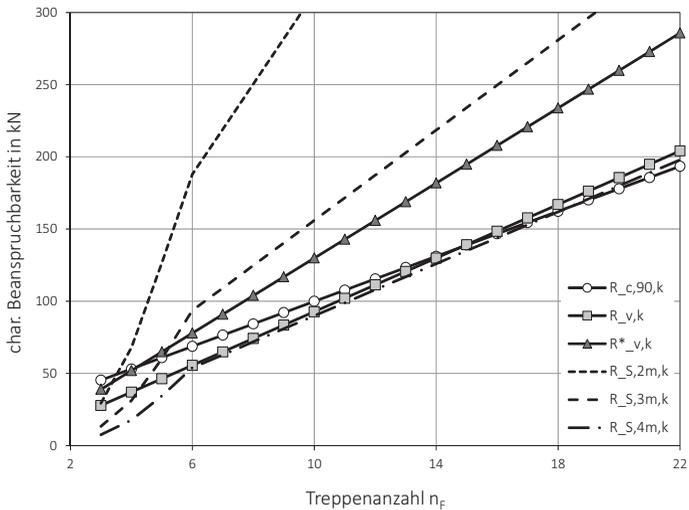


Bild A-24 Char. Beanspruchbarkeiten für Druckstrebe mit Treppenversatz aus NH-BSH der Breite $b = 100 \text{ mm}$; $\alpha = 55^\circ$ und $t_v = 10 \text{ mm}$

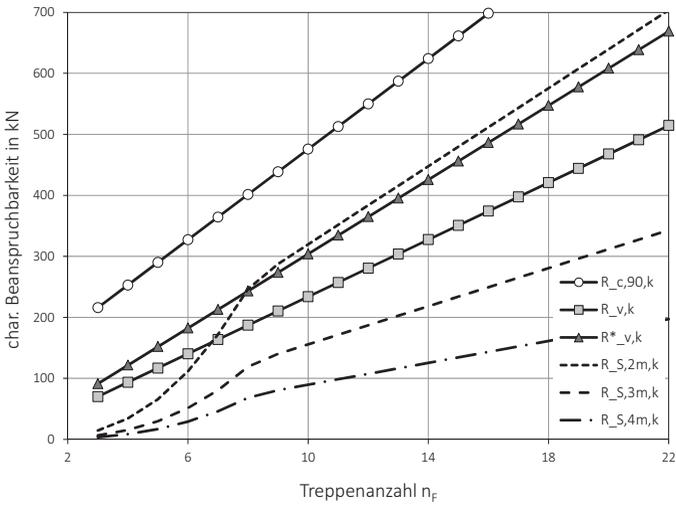


Bild A-25 Char. Beanspruchbarkeiten für Druckstrebe mit Treppenversatz aus Bu-FSH der Breite $b = 100$ mm; $\alpha = 35^\circ$ und $t_v = 10$ mm

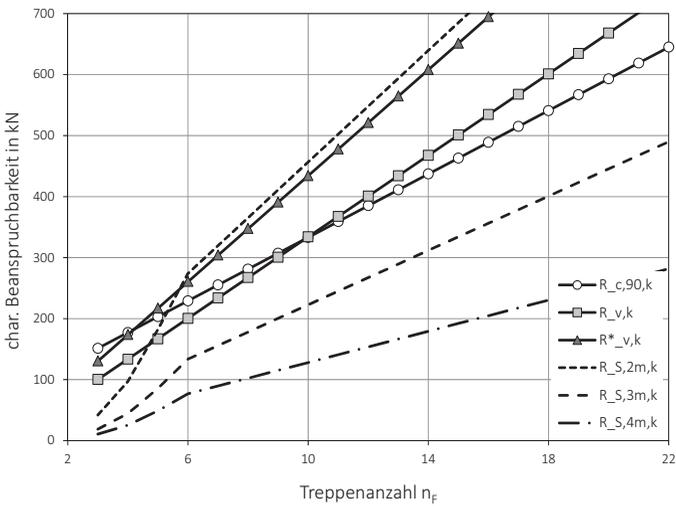


Bild A-26 Char. Beanspruchbarkeiten für Druckstrebe mit Treppenversatz aus Bu-FSH der Breite $b = 100$ mm; $\alpha = 55^\circ$ und $t_v = 10$ mm

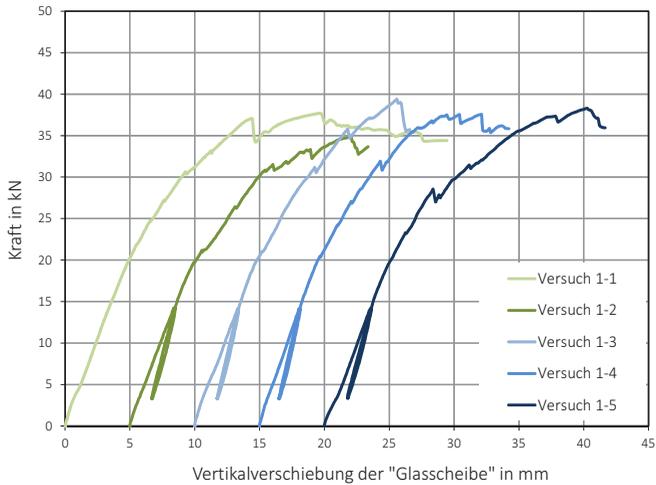


Bild A-27 Last-Verformungs-Diagramm Variante 1; Gesamtkraft auf den Riegel (zwei Verbindungen) in kN über gemittelter Verschiebung „oben“ in mm

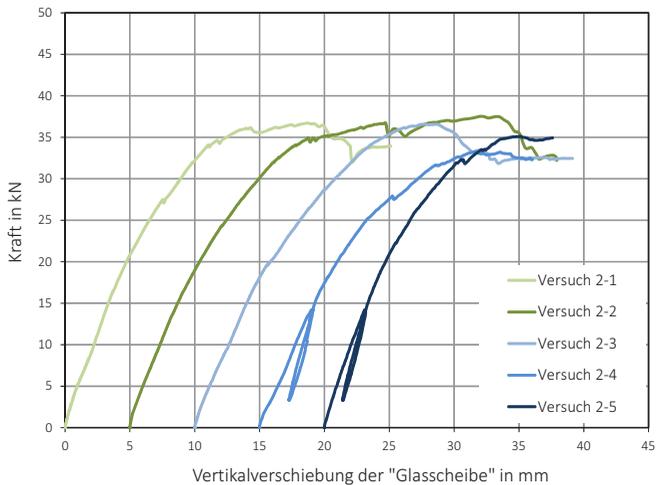


Bild A-28 Last-Verformungs-Diagramm Variante 2; Gesamtkraft auf den Riegel (zwei Verbindungen) in kN über gemittelter Verschiebung „oben“ in mm

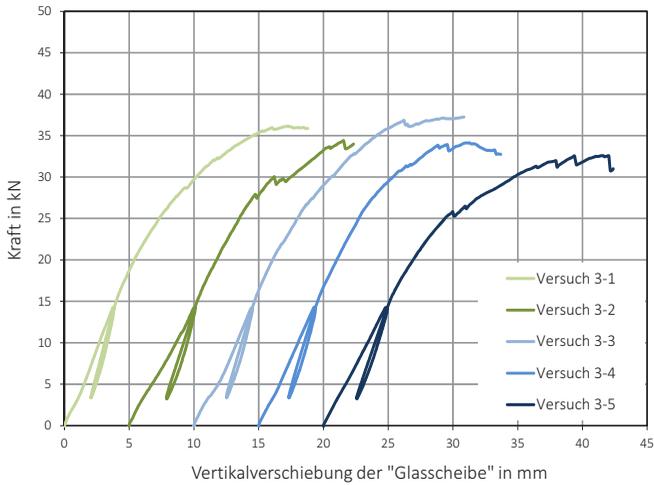


Bild A-29 Last-Verformungs-Diagramm Variante 3; Gesamtkraft auf den Riegel (zwei Verbindungen) in kN über gemittelter Verschiebung „oben“ in mm

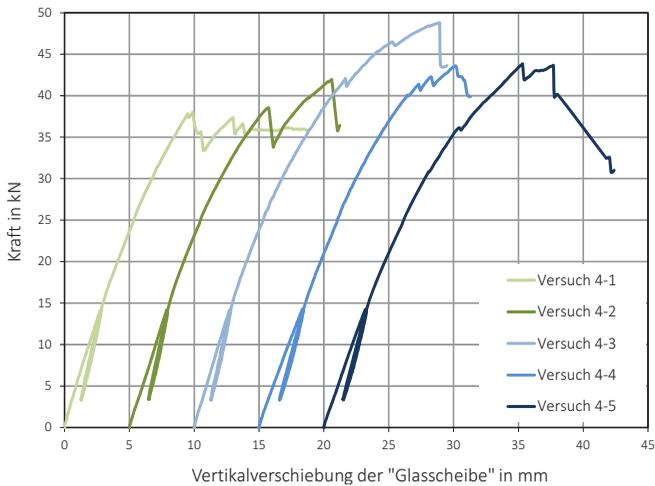


Bild A-30 Last-Verformungs-Diagramm Variante 4; Gesamtkraft auf den Riegel (zwei Verbindungen) in kN über gemittelter Verschiebung „oben“ in mm

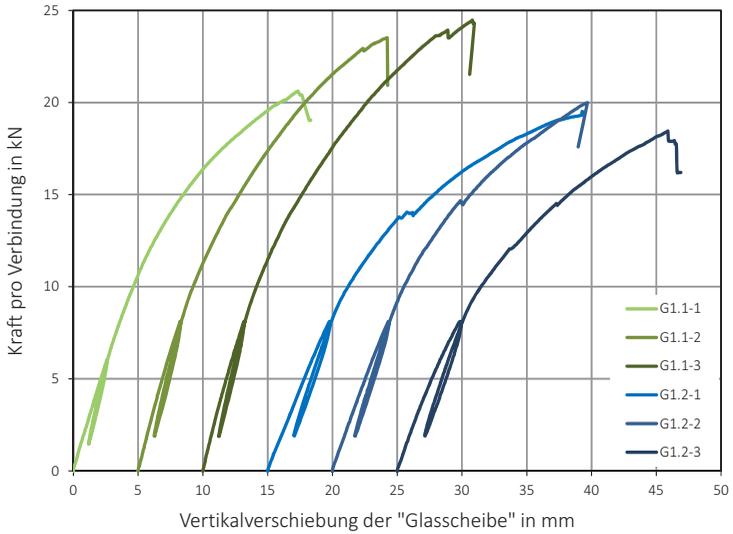


Bild A-31 Last-Verformungs-Diagramm Reihe G1 – Glaslast

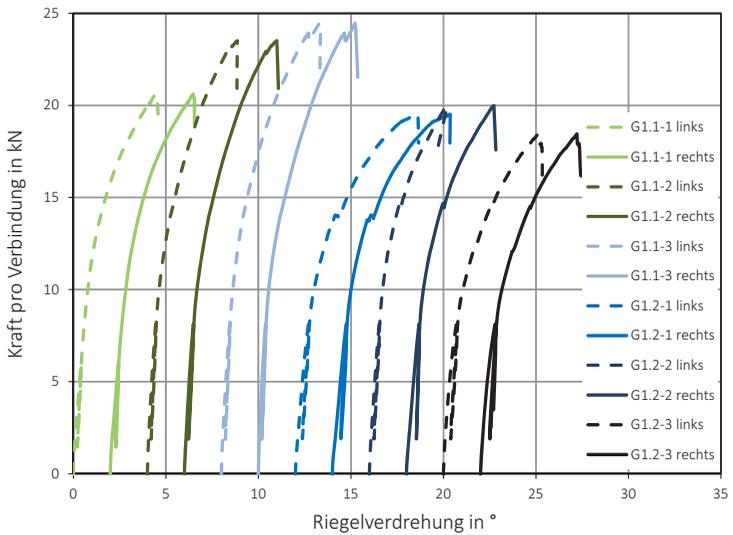


Bild A-32 Last-Verdrehungs-Diagramm Reihe G1 – Glaslast

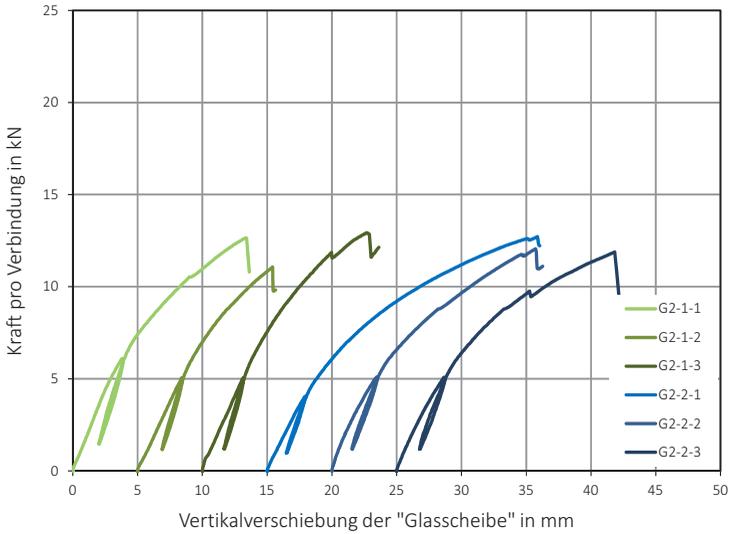


Bild A-33 Last-Verformungs-Diagramm Reihe G2 – Glaslast

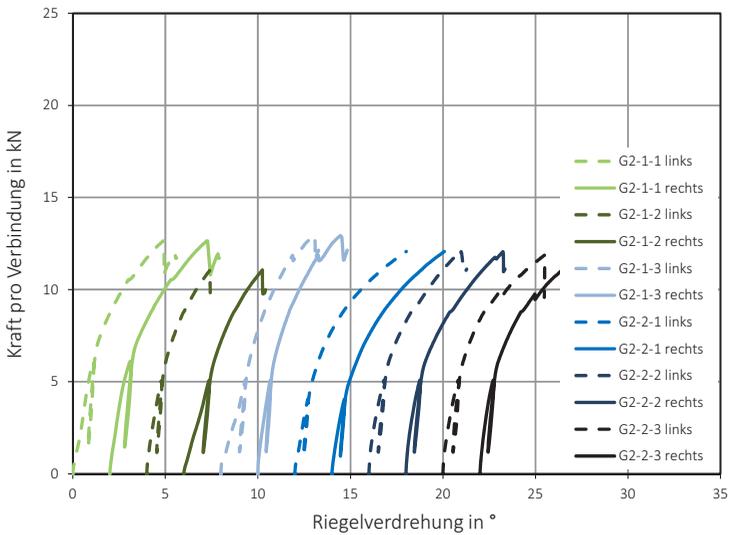


Bild A-34 Last-Verdrehungs-Diagramm Reihe G2 – Glaslast

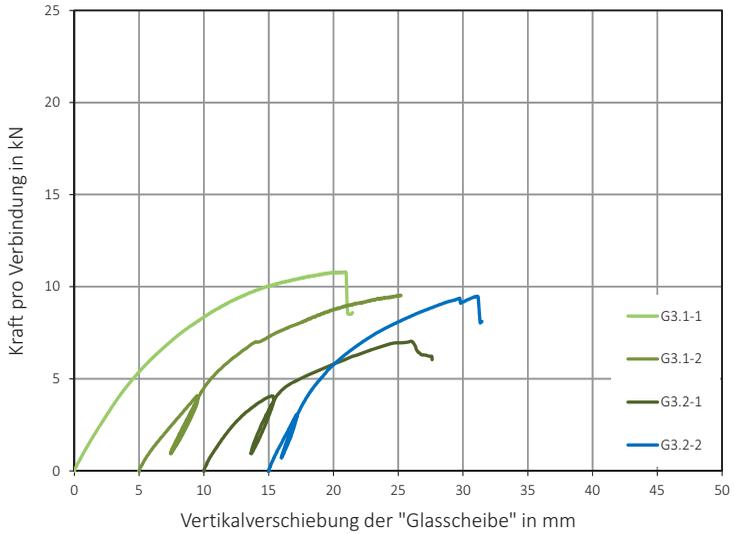


Bild A-35 Last-Verformungs-Diagramm Reihe G3 – Glaslast

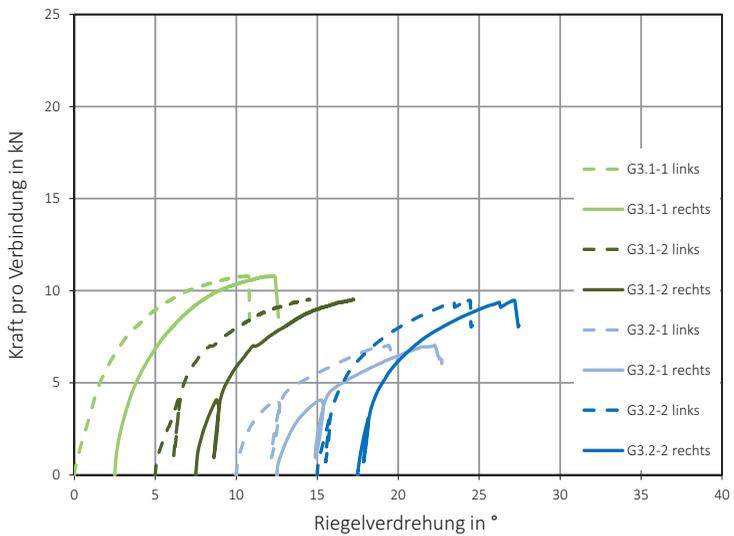


Bild A-36 Last-Verdrehungs-Diagramm Reihe G3 – Glaslast

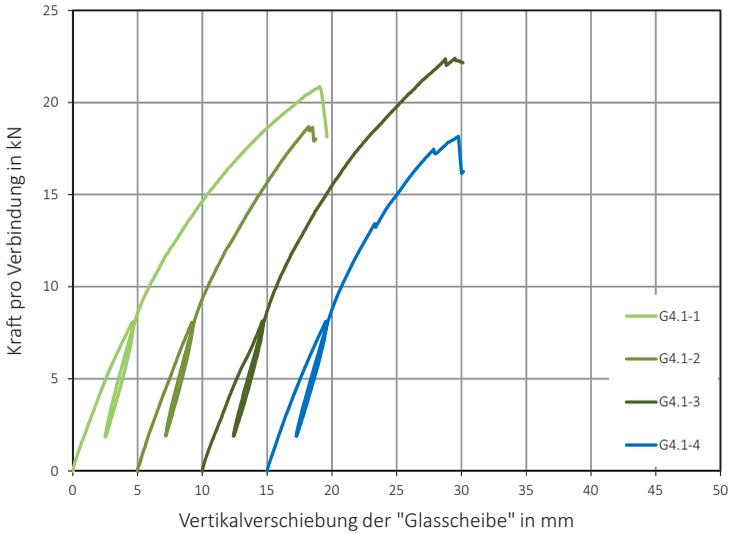


Bild A-37 Last-Verformungs-Diagramm Reihe G4.1 – Glaslast

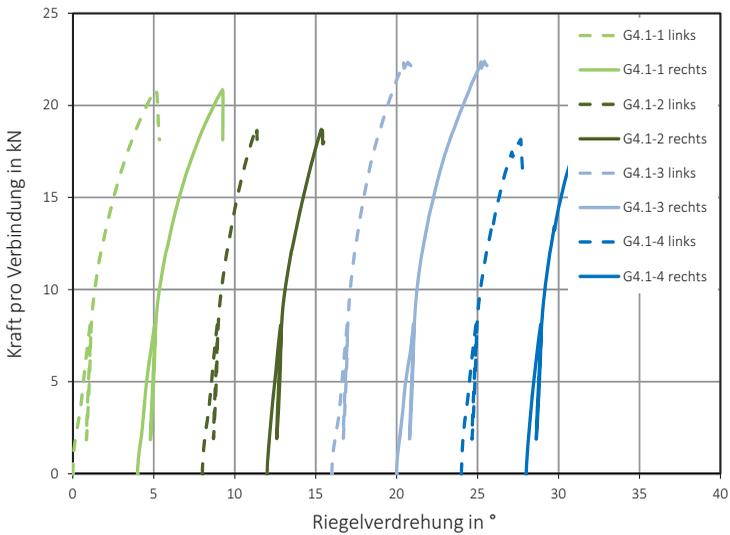


Bild A-38 Last-Verdrehungs-Diagramm Reihe G4.1 – Glaslast

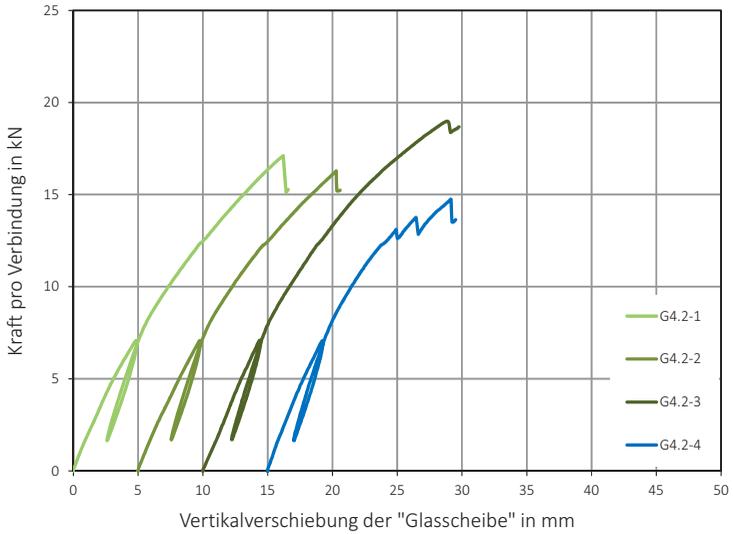


Bild A-39 Last-Verformungs-Diagramm Reihe G4.2 – Glaslast

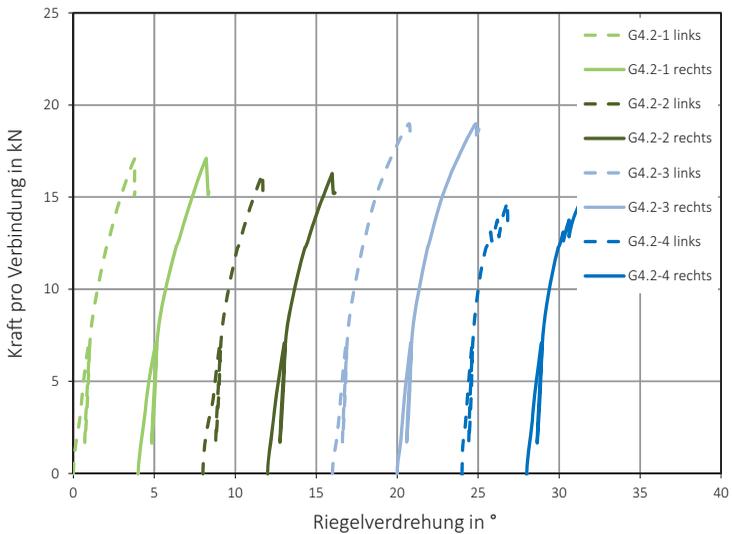


Bild A-40 Last-Verdrehungs-Diagramm Reihe G4.2 – Glaslast

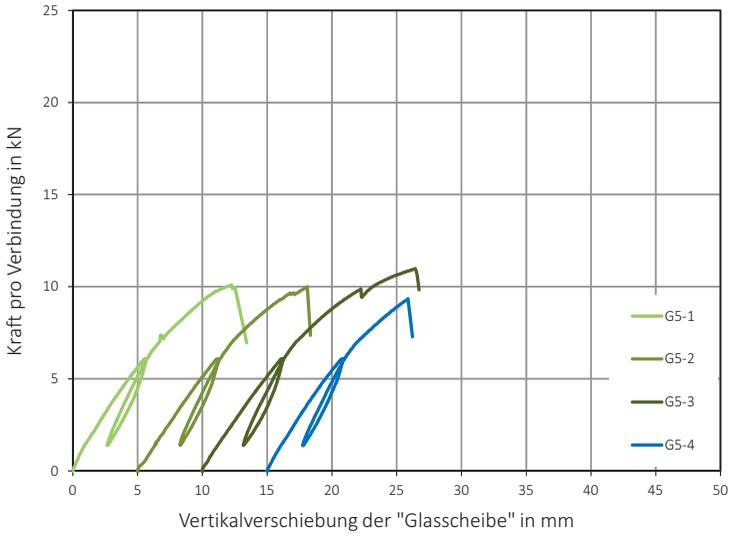


Bild A-41 Last-Verformungs-Diagramm Reihe G5 – Glaslast

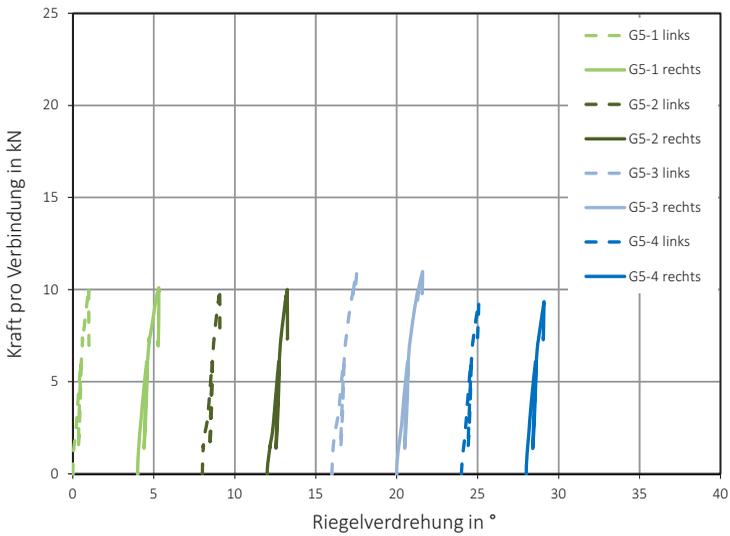


Bild A-42 Last-Verdrehungs-Diagramm Reihe G5 – Glaslast

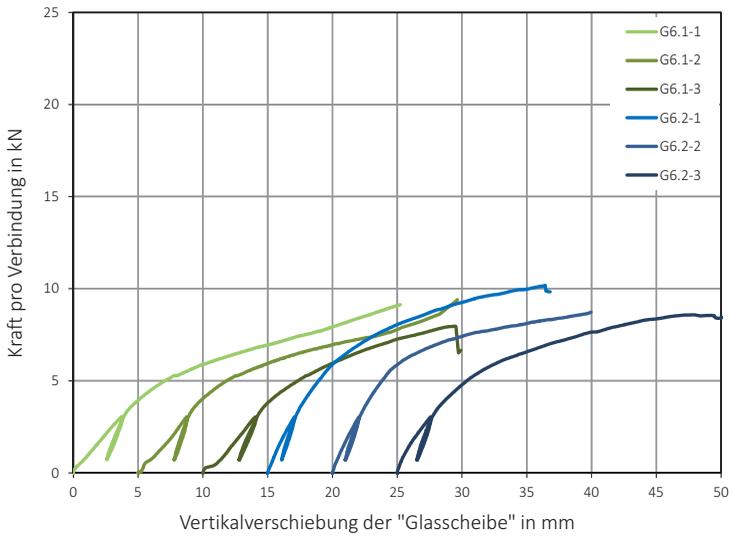


Bild A-43 Last-Verformungs-Diagramm Reihe G6.1 und G6.2 – Glaslast

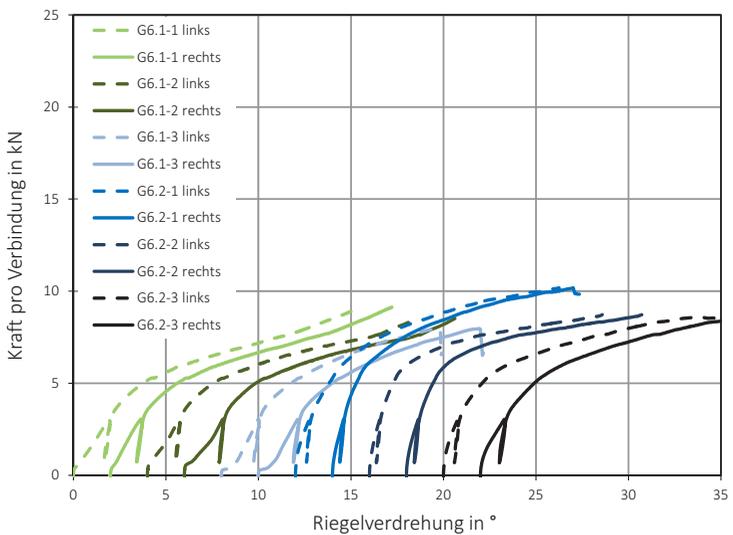


Bild A-44 Last-Verdrehs-Diagramm Reihe G6.1 und G6.2 – Glaslast

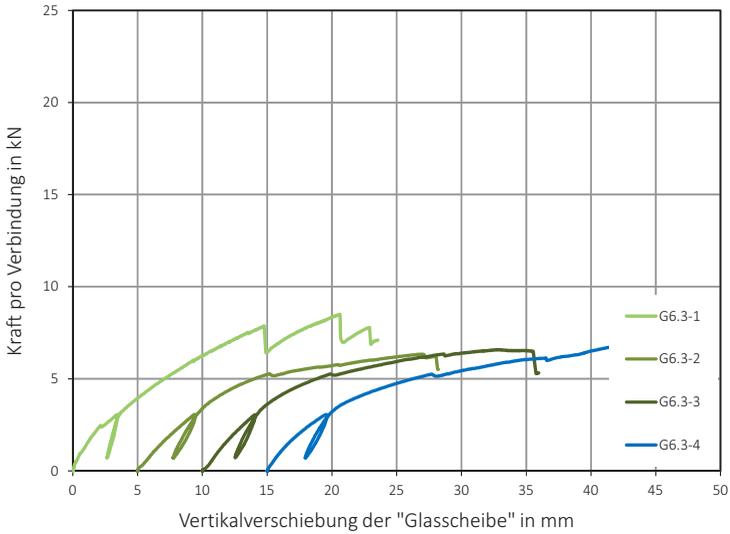


Bild A-45 Last-Verformungs-Diagramm Reihe G6.3 – Glaslast

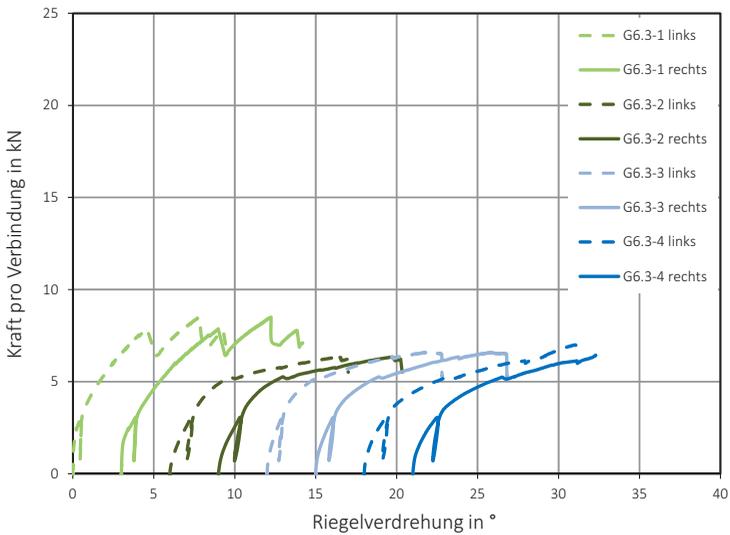


Bild A-46 Last-Verdrehungs-Diagramm Reihe G6.3 – Glaslast

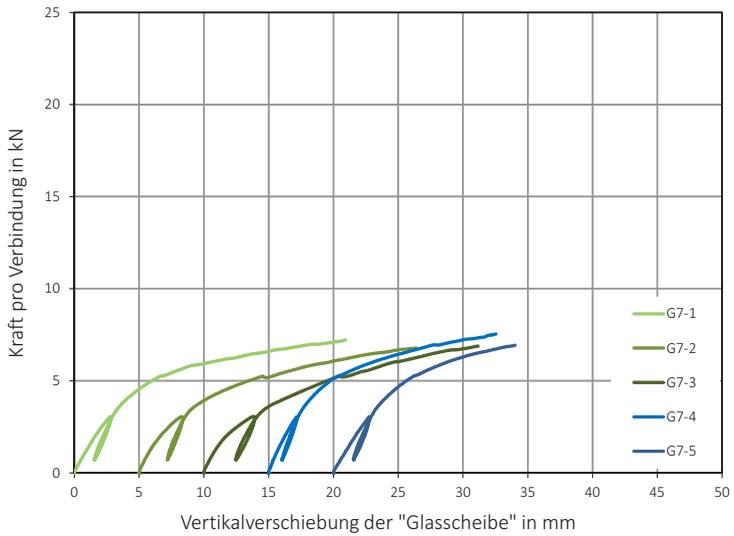


Bild A-47 Last-Verformungs-Diagramm Reihe G7 – Glaslast

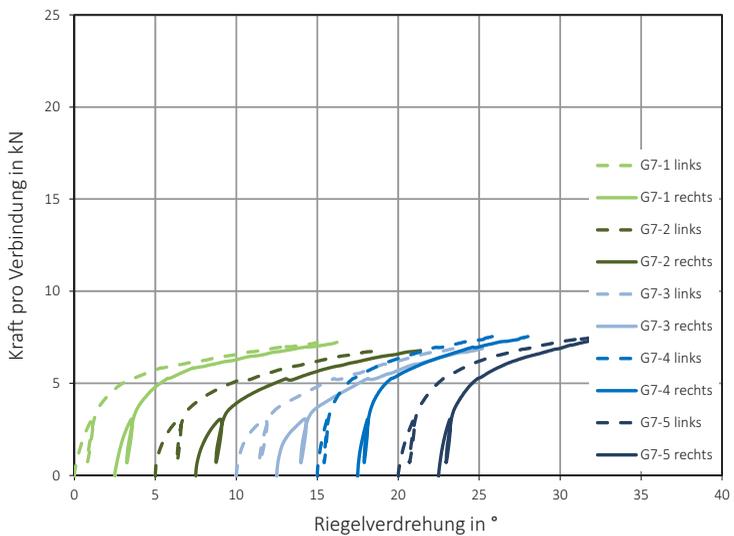


Bild A-48 Last-Verdrehungs-Diagramm Reihe G7 – Glaslast

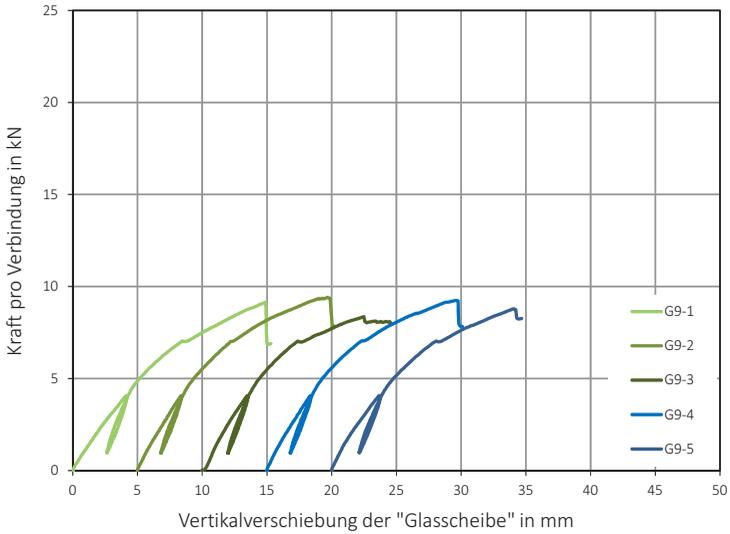


Bild A-49 Last-Verformungs-Diagramm Reihe G9 – Glaslast

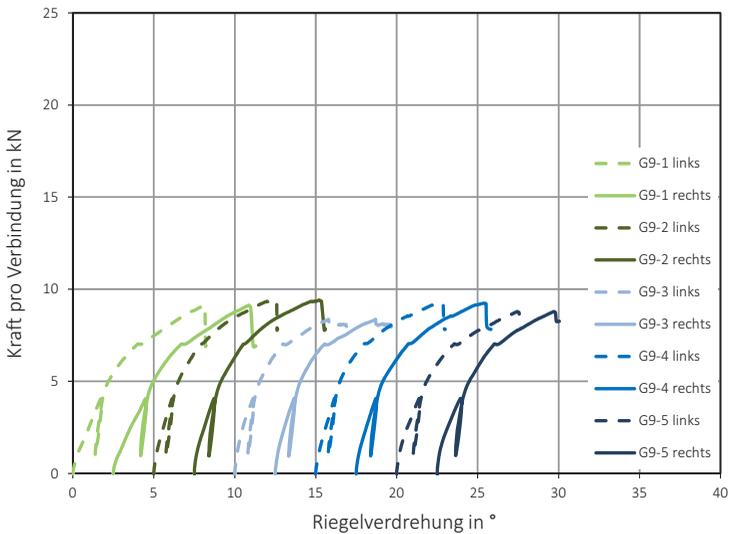


Bild A-50 Last-Verdreungs-Diagramm Reihe G9 – Glaslast

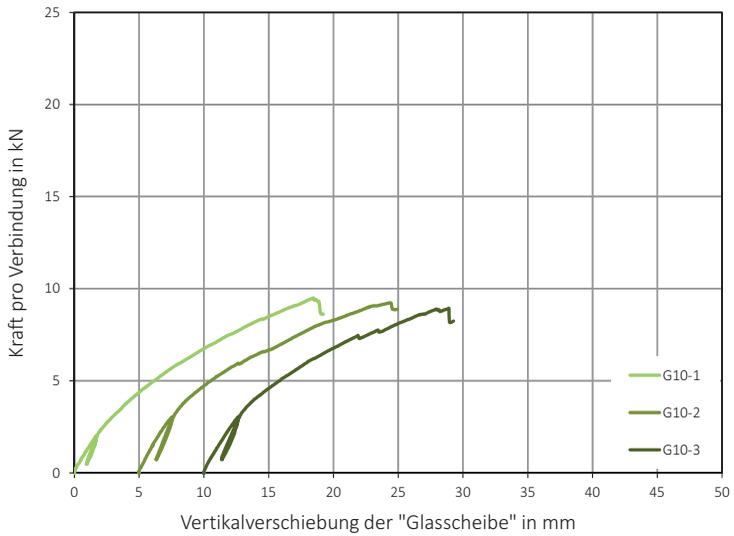


Bild A-51 Last-Verformungs-Diagramm Reihe G10 – Glaslast

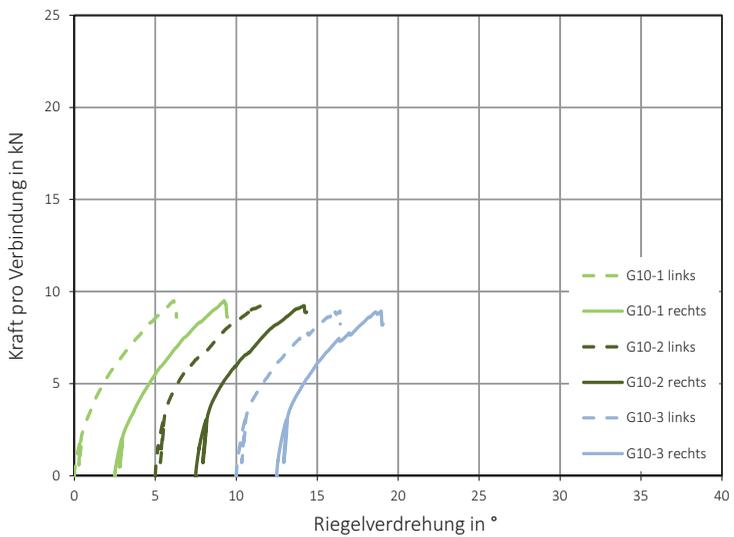


Bild A-52 Last-Verdrehungs-Diagramm Reihe G10 – Glaslast

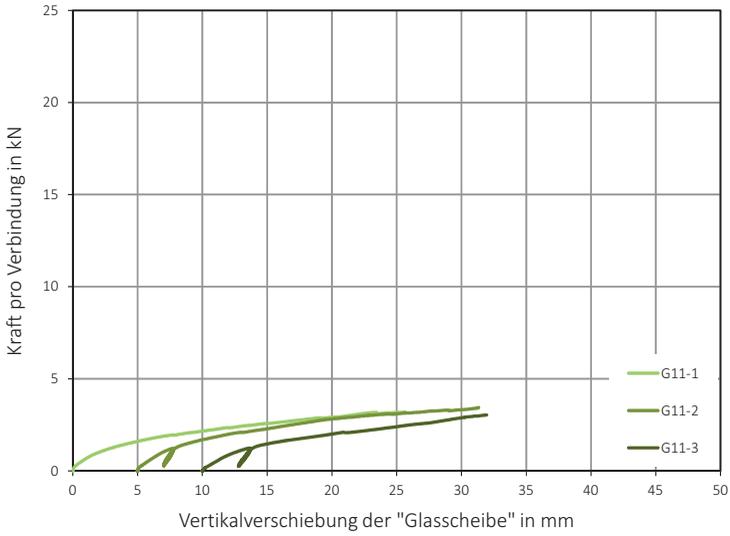


Bild A-53 Last-Verformungs-Diagramm Reihe G11 – Glaslast

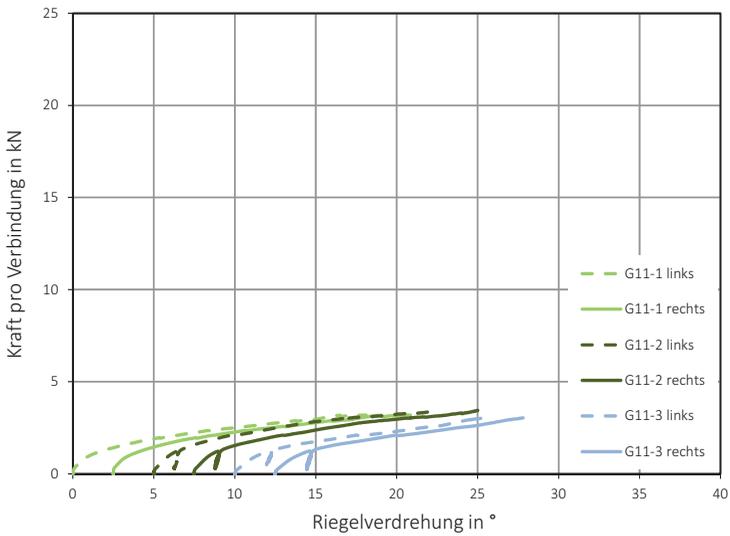


Bild A-54 Last-Verdrehungs-Diagramm Reihe G11 – Glaslast

Tabelle A-21 Versuchsergebnisse Reihe G1.1 – Glaslast

Versuch	F_{max} in kN	F_{15mm} in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{4,0mm}$ in kN	β_{max} in °
G1.1-1	20,6	19,6	2,3	3,2	links	2,3	8,8	4,4
					rechts	2,4	8,9	4,5
G1.1-2	23,5	21,5	2,5	3,0	links	2,6	9,5	4,9
					rechts	2,9	9,6	5,0
G1.1-3	24,5	21,7	2,5	3,1	links	2,7	9,4	5,3
					rechts	3,2	10,0	5,2
\bar{X}	22,9	20,9	2,4	3,1		2,7	9,4	4,9
s	2,0	1,2	0,1	0,1		0,3	0,4	0,4
v	9 %	6 %	5 %	3 %		11 %	5 %	8 %

Tabelle A-22 Versuchsergebnisse Reihe G1.2 – Glaslast

Versuch	F_{max} in kN	F_{15mm} in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{4,0mm}$ in kN	β_{max} in °
G1.2-1	19,5	16,2	1,7	2,2	links	1,8	6,9	6,6
					rechts	1,8	7,0	6,4
G1.2-2	20,0	17,8	1,8	2,4	links	2,0	7,6	4,2
					rechts	2,0	7,7	4,7
G1.2-3	18,4	16,0	1,6	2,2	links	2,0	7,0	5,1
					rechts	2,0	7,0	5,2
\bar{X}	19,3	16,7	1,7	2,3		1,9	7,2	5,4
s	0,8	1,0	0,1	0,1		0,1	0,3	0,9
v	4 %	6 %	6 %	5 %		7 %	5 %	17 %

Tabelle A-23 Versuchsergebnisse Reihe G2.1 – Glaslast

Versuch	F_{max} in kN	F_{15mm} in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{4,0mm}$ in kN	β_{max} in °
G2.1-1	12,6	12,6	1,6	2,4	links	1,5	6,1	4,9
					rechts	1,9	6,1	5,2
G2.1-2	11,1	11,1	1,5	2,4	links	1,8	6,3	3,4
					rechts	1,2	5,2	4,2
G2.1-3	12,9	12,9	1,6	2,6	links	1,5	5,9	5,0
					rechts	2,0	6,7	4,5
\bar{x}	12,2	12,2	1,5	2,5		1,6	6,0	4,5
s	1,0	1,0	0,0	0,1		0,3	0,5	0,7
v	8 %	8 %	3 %	4 %		19 %	8 %	15 %

Tabelle A-24 Versuchsergebnisse Reihe G2.2 – Glaslast

Versuch	F_{max} in kN	F_{15mm} in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{4,0mm}$ in kN	β_{max} in °
G2.2-1	12,7	11,2	1,3	2,1	links	1,5	5,2	7,2
					rechts	1,5	5,1	7,2
G2.2-2	12,1	11,8	1,4	2,0	links	1,8	5,5	5,0
					rechts	2,0	5,7	5,2
G2.2-3	11,9	11,3	1,3	2,0	links	1,7	5,3	5,5
					rechts	1,8	5,4	5,5
\bar{x}	12,2	11,4	1,3	2,0		1,7	5,4	5,9
s	0,4	0,3	0,0	0,1		0,2	0,2	1,0
v	4 %	3 %	2 %	3 %		13 %	4 %	17 %

Tabelle A-25 Versuchsergebnisse Reihe G3.1 – Glaslast

Versuch	F_{max} in kN	F_{15mm} in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{4,0mm}$ in kN	β_{max} in °
G3.1-1	10,8	10,0	1,1	-	links	1,3	4,6	10,7
					rechts	1,3	4,5	9,9
G3.1-2	9,5	8,8	0,8	1,5	links	1,2	3,7	9,5
					rechts	1,2	3,7	9,7
\bar{X}	10,2	9,4	1,0	1,5		1,2	4,1	9,9
s	0,9	0,9	0,2	-		0,1	0,5	0,5
v	9 %	10 %	20 %	-		7 %	12 %	5 %

Tabelle A-26 Versuchsergebnisse Reihe G3.2 – Glaslast

Versuch	F_{max} in kN	F_{15mm} in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{4,0mm}$ in kN	β_{max} in °
G3.2-1	7,0	7,0	0,7	1,6	links	1,3	3,6	9,4
					rechts	1,2	3,5	9,8
G3.2-2	9,5	9,4	1,4	1,9	links	1,5	5,0	9,4
					rechts	1,5	4,9	9,7
\bar{X}	8,3	8,2	1,0	1,8		1,4	4,3	9,6
s	1,7	1,7	0,5	0,2		0,1	0,8	0,2
v	21 %	21 %	44 %	13 %		10 %	19 %	2 %

Tabelle A-27 Versuchsergebnisse Reihe G4.1 – Glaslast

Versuch	F_{max} in kN	F_{15mm} in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{4,0mm}$ in kN	β_{max} in °
G4.1-1	20,8	18,6	1,7	2,8	links	2,1	7,3	5,1
					rechts	2,1	7,1	5,2
G4.1-2	18,7	18,7	1,8	2,9	links	2,2	7,7	3,3
					rechts	2,3	7,7	3,3
G4.1-3	22,4	19,7	1,7	2,7	links	2,0	7,3	4,7
					rechts	2,1	6,8	5,4
G4.1-4	18,2	18,2	1,7	2,6	links	2,2	7,5	3,7
					rechts	2,0	7,1	3,4
\bar{x}	20,0	18,8	1,7	2,7		2,1	7,3	4,3
s	2,0	0,7	0,1	0,1		0,1	0,3	0,9
v	10 %	4 %	5 %	4 %		4 %	5 %	22 %

Tabelle A-28 Versuchsergebnisse Reihe G4.2 – Glaslast

Versuch	F_{max} in kN	F_{15mm} in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{4,0mm}$ in kN	β_{max} in °
G4.2-1	17,1	16,3	1,4	2,3	links	1,7	6,3	3,8
					rechts	1,8	6,0	4,2
G4.2-2	16,3	16,1	1,4	2,3	links	1,7	6,2	3,7
					rechts	1,8	6,0	4,0
G4.2-3	19,0	17,0	1,7	2,4	links	1,5	6,6	4,7
					rechts	1,7	6,5	4,8
G4.2-4	14,7	14,7	1,6	2,3	links	2,0	7,1	2,8
					rechts	1,9	6,5	3,3
\bar{x}	16,8	16,0	1,5	2,3		1,8	6,4	3,9
s	1,8	0,9	0,1	0,1		0,2	0,3	0,7
v	11 %	6 %	9 %	3 %		9 %	5 %	18 %

Tabelle A-29 Versuchsergebnisse Reihe G5 – Glaslast

Versuch	F_{max} in kN	F_{15mm} in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{4,0mm}$ in kN	β_{max} in °
G5-1	10,1	10,1	1,0	1,6	links	1,5	4,8	1,0
					rechts	1,4	4,6	1,3
G5-2	10,0	10,0	1,0	1,5	links	0,9	4,1	1,1
					rechts	1,1	4,1	1,2
G5-3	11,0	10,6	1,0	1,5	links	1,1	4,2	1,5
					rechts	1,3	4,2	1,6
G5-4	9,3	9,3	1,0	1,5	links	1,4	4,7	1,1
					rechts	1,2	4,3	1,1
\bar{X}	10,1	10,0	1,0	1,5		1,2	4,4	1,2
s	0,7	0,5	0,0	0,0		0,2	0,3	0,2
v	7 %	5 %	3 %	2 %		16 %	6 %	18 %

Tabelle A-30 Versuchsergebnisse Reihe G6.1 – Glaslast

Versuch	F_{max} in kN	F_{15mm} in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{4,0mm}$ in kN	β_{max} in °
G6.1-1	9,1	6,9	0,8	1,8	links	0,8	3,1	15,6
					rechts	0,9	3,3	15,2
G6.1-2	9,4	7,0	0,8	2,2	links	1,0	3,6	14,5
					rechts	0,6	2,9	14,7
G6.1-3	8,0	7,3	0,9	1,7	links	0,4	3,0	11,8
					rechts	0,4	3,0	11,9
\bar{X}	8,8	7,0	0,8	1,9		0,7	3,2	14,0
s	0,8	0,2	0,0	0,2		0,2	0,2	1,7
v	9 %	3 %	3 %	13 %		34 %	8 %	12 %

Tabelle A-31 Versuchsergebnisse Reihe G6.2 – Glaslast

Versuch	F_{max} in kN	F_{15mm} in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{4,0mm}$ in kN	β_{max} in °
G6.2-1	10,2	9,3	1,4	2,2	links	1,6	4,8	14,2
					rechts	1,8	5,4	13,0
G6.2-2	8,7	8,1	1,4	2,2	links	1,7	5,2	12,6
					rechts	1,7	5,1	12,7
G6.2-3	8,6	7,6	1,1	2,0	links	1,6	4,4	13,9
					rechts	1,4	3,9	14,9
\bar{x}	9,2	8,3	1,3	2,1		1,6	4,8	13,6
s	0,9	0,8	0,2	0,1		0,1	0,6	0,9
v	10 %	10 %	15 %	5 %		7 %	12 %	7 %

Tabelle A-32 Versuchsergebnisse Reihe G6.3 – Glaslast

Versuch	F_{max} in kN	F_{15mm} in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{4,0mm}$ in kN	β_{max} in °
G6.3-1	8,5	7,9	0,8	-	links	1,5	3,5	7,8
					rechts	1,2	3,2	9,2
G6.3-2	6,3	5,7	0,7	1,3	links	0,7	2,7	10,4
					rechts	0,9	2,9	10,7
G6.3-3	6,6	5,9	0,8	1,4	links	1,0	3,2	9,7
					rechts	0,6	2,8	10,8
G6.3-4	7,0	5,4	0,6	1,3	links	1,0	2,8	13,2
					rechts	1,0	2,8	-
\bar{x}	7,1	6,2	0,7	1,4		1,0	3,0	10,3
s	1,0	1,1	0,1	0,1		0,3	0,3	1,6
v	14 %	18 %	11 %	5 %		29 %	9 %	16 %

Tabelle A-33 Versuchsergebnisse Reihe G7 – Glaslast

Versuch	F_{max} in kN	F_{15mm} in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{4,0mm}$ in kN	β_{max} in °
G7-1	7,2	6,6	1,1	1,8	links	1,2	4,0	15,0
					rechts	1,4	4,0	13,7
G7-2	6,8	6,1	0,9	1,7	links	1,4	3,5	13,8
					rechts	1,4	3,4	13,9
G7-3	6,9	6,0	0,7	1,5	links	1,4	3,1	13,4
					rechts	1,4	3,1	12,7
G7-4	7,5	7,2	1,3	2,0	links	1,5	4,4	10,8
					rechts	1,8	4,6	10,5
G7-5	7,7	7,1	1,1	1,8	links	1,2	3,9	13,2
					rechts	1,3	4,1	11,6
\bar{X}	7,2	6,6	1,0	1,8		1,4	3,8	12,9
s	0,4	0,5	0,2	0,2		0,2	0,5	1,5
v	5 %	8 %	22 %	10 %		13 %	14 %	11 %

Tabelle A-34 Versuchsergebnisse Reihe G9 – Glaslast

Versuch	F_{max} in kN	F_{15mm} in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{4,0mm}$ in kN	β_{max} in °
G9-1	9,1	9,1	0,9	2,0	links	1,1	4,0	8,1
					rechts	1,1	3,9	8,4
G9-2	9,4	9,4	1,2	1,9	links	1,3	4,7	7,5
					rechts	1,5	4,7	7,7
G9-3	8,4	8,4	1,2	2,0	links	1,5	4,9	5,8
					rechts	1,0	4,2	6,2
G9-4	9,2	9,2	1,1	1,9	links	1,4	4,8	7,7
					rechts	1,5	4,6	7,9
G9-5	8,8	8,8	1,0	1,9	links	1,4	4,3	7,5
					rechts	1,5	4,2	7,2
\bar{x}	9,0	9,0	1,1	1,9		1,3	4,4	7,4
s	0,4	0,4	0,1	0,1		0,2	0,3	0,8
v	5 %	5 %	9 %	3 %		14 %	8 %	11 %

Tabelle A-35 Versuchsergebnisse Reihe G10 – Glaslast

Versuch	F_{max} in kN	F_{15mm} in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{4,0mm}$ in kN	β_{max} in °
G10-1	9,5	8,5	1,1	2,0	links	1,3	3,9	6,1
					rechts	1,3	3,6	6,8
G10-2	9,2	8,3	1,1	1,8	links	1,5	4,2	6,5
					rechts	1,4	4,1	6,7
G10-3	8,9	8,1	1,1	1,8	links	1,4	4,1	6,4
					rechts	1,3	4,0	6,5
\bar{x}	9,2	8,3	1,1	1,8		1,4	4,0	6,5
s	0,3	0,2	0,0	0,1		0,1	0,2	0,2
v	3 %	2 %	2 %	8 %		6 %	5 %	3 %

Tabelle A-36 Versuchsergebnisse Reihe G11 – Glaslast

Versuch	F_{max} in kN	F_{15mm} in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{4,0mm}$ in kN	β_{max} in °
G11-1	3,2	2,6	0,4	-	links	0,6	1,4	18,0
					rechts	0,7	1,4	18,3
G11-2	3,4	2,8	0,4	1,1	links	0,6	1,5	17,6
					rechts	0,6	1,5	17,5
G11-3	3,0	2,4	0,3	0,9	links	0,5	1,3	15,4
					rechts	0,5	1,3	15,3
\bar{X}	3,2	2,6	0,4	1,0		0,6	1,4	17,0
s	0,2	0,2	0,0	0,1		0,1	0,1	1,3
v	6 %	8 %	12 %	11 %		15 %	8 %	8 %

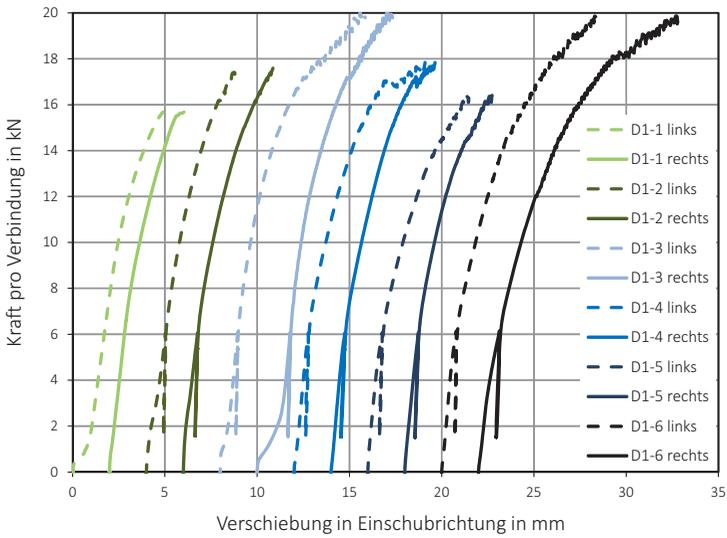


Bild A-55 Last-Verformungs-Diagramm Reihe D1 – Winddruck

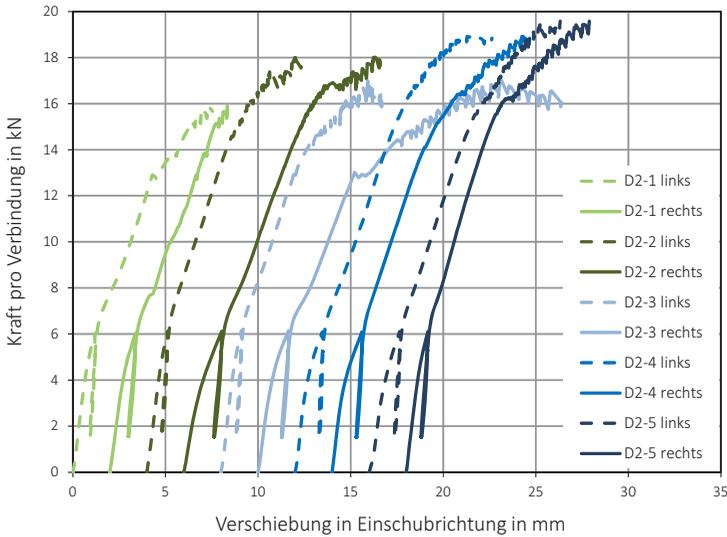


Bild A-56 Last-Verformungs-Diagramm Reihe D2 – Winddruck

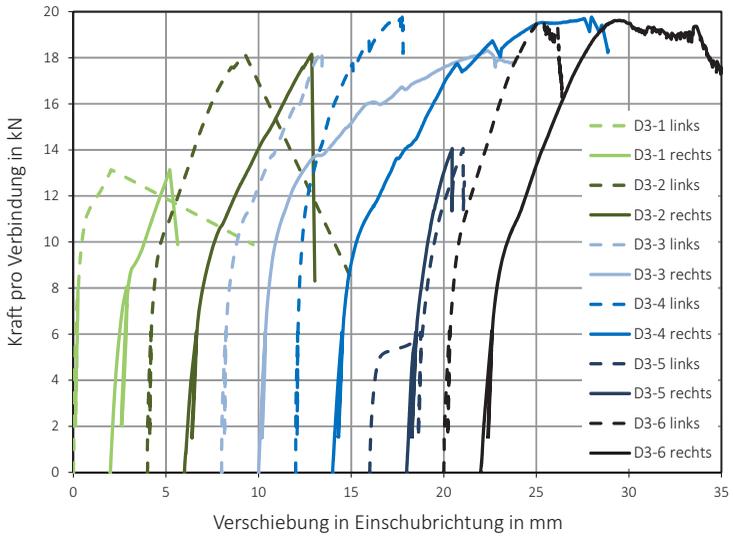


Bild A-57 Last-Verformungs-Diagramm Reihe D3 – Winddruck

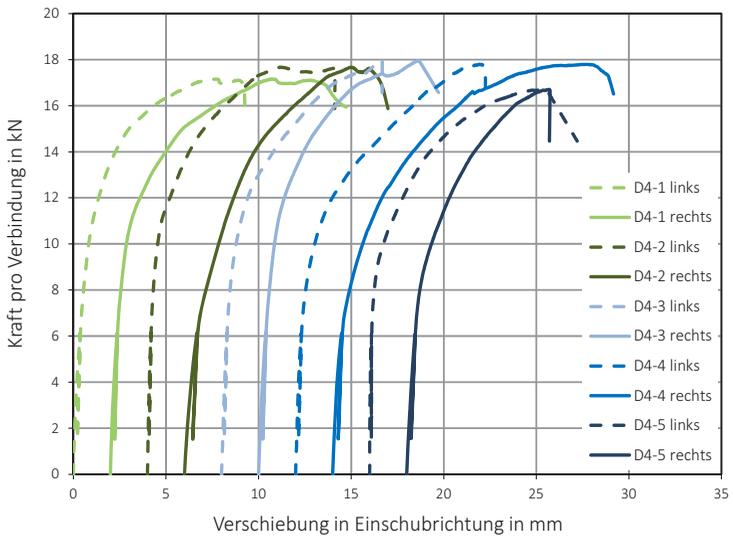


Bild A-58 Last-Verformungs-Diagramm Reihe D4 – Winddruck

Tabelle A-37 Versuchsergebnisse Reihe D1 – Winddruck

Versuch	F_{max} in kN	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{2,0mm}$ in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm
D1-1	15,7	links	1,8	14,3	5,7	5,9
		rechts	7,2	11,3	7,2	7,4
D1-2	17,6	links	5,8	16,2	5,2	34,8
		rechts	7,4	11,4	6,6	27,9
D1-3	20,0	links	6,3	16,4	7,1	35,4
		rechts	1,8	7,7	4,6	29,6
D1-4	17,8	links	7,2	15,7	8,2	24,6
		rechts	7,4	11,2	8,1	18,5
D1-5	16,4	links	7,0	14,5	7,1	22,4
		rechts	7,5	11,3	7,8	20,5
D1-6	19,9	links	7,0	15,2	7,9	36,1
		rechts	5,6	9,1	5,1	20,1
\bar{x}	17,9		6,0	12,9	6,7	23,6
s	1,8		2,1	2,9	1,3	10,0
v	10 %		34 %	23 %	19 %	42 %

Tabelle A-38 Versuchsergebnisse Reihe D2 – Winddruck

Versuch	F_{max} in kN	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{2,0mm}$ in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm
D2-1	15,9	links	5,4	12,1	5,0	12,7
		rechts	5,1	7,4	4,2	9,9
D2-2	18,0	links	5,7	13,3	5,4	12,1
		rechts	3,9	6,0	2,7	9,1
D2-3	17,0	links	5,8	13,0	5,6	13,7
		rechts	4,7	6,8	3,5	10,0
D2-4	18,9	links	5,0	11,8	3,9	17,0
		rechts	4,8	7,1	3,4	12,0
D2-5	19,6	links	4,4	11,8	3,7	12,7
		rechts	5,6	8,2	5,0	11,2
\bar{x}	17,9		5,0	9,8	4,2	12,1
s	1,5		0,6	2,9	1,0	2,3
v	8 %		12 %	29 %	23 %	19 %

Tabelle A-39 Versuchsergebnisse Reihe D3 – Winddruck

Versuch	F_{max} in kN	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{2,0mm}$ in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm
D3-1*	13,1	links	11,6	13,1	27,6	39,5
		rechts	8,3	10,3	8,3	17,3
D3-2	18,1	links	10,6	16,9	24,8	50,8
		rechts	8,0	10,7	9,0	17,2
D3-3	18,3	links	10,5	16,0	21,5	52,2
		rechts	10,3	12,5	16,0	25,6
D3-4	19,8	links	13,1	18,7	-	-
		rechts	9,1	11,3	11,4	19,4
D3-5*	14,0	links	5,2	11,7	-	21,4
		rechts	9,2	13,0	11,7	19,6
D3-6	19,6	links	10,7	18,0	16,7	34,3
		rechts	8,6	11,0	9,8	21,6
\bar{x}	17,2 (19,0)		9,6	13,6	15,7	29,0
s	2,9		2,0	3,0	6,9	13,2
v	17 %		21 %	22 %	44 %	45 %

* Versuche mit Keilzinkenversagen in Nebenträgermitte

Tabelle A-40 Versuchsergebnisse Reihe D4 – Winddruck

Versuch	F_{max} in kN	links/rechts	$F_{1,0mm}$ in kN	$F_{2,0mm}$ in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm
D4-1	17,2	links	10,8	15,7	15,2	28,5
		rechts	10,6	12,7	15,4	30,1
D4-2	17,7	links	11,5	15,9	29,7	45,3
		rechts	7,5	10,4	8,3	17,2
D4-3	18,0	links	10,8	15,2	20,5	29,5
		rechts	10,7	13,2	15,0	25,7
D4-4	17,8	links	9,9	14,1	19,2	29,1
		rechts	8,2	10,8	11,5	21,5
D4-5	16,7	links	10,6	14,6	50,0	228,2
		rechts	9,1	11,4	12,7	19,7
\bar{x}	17,5		10,0	13,4	19,8	47,5
s	0,5		1,3	2,0	12,1	64,0
v	3 %		13 %	15 %	61 %	135 %



Bild A-59 Fehlerhafte Verklebung der Keilzinkung – Unterseite des Riegels

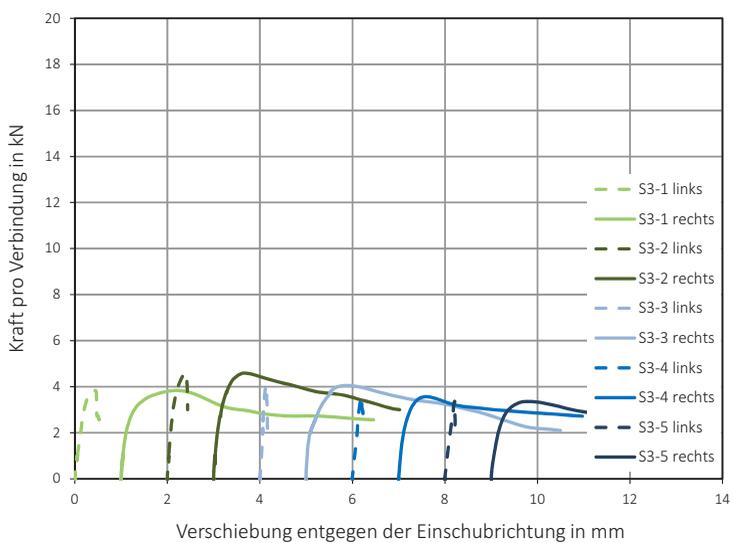


Bild A-60 Last-Verformungs-Diagramm Reihe S3 – Windsog

Tabelle A-41 Versuchsergebnisse Reihe S1 – Windsog

Versuch	F_{max} in kN
S1-1	4,4
S1-2	3,2
S1-3	3,3
S1-4	5,5
S1-5	4,9
\bar{x}	4,2
s	1,0
v	24 %

Tabelle A-42 Versuchsergebnisse Reihe S2 – Windsog

Versuch	F_{max} in kN	Verbindung	$F_{0,5mm}$ in kN	$F_{1,0mm}$ in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm
S2-1	17,1	links	14,6	-	51,6	-
		rechts	9,6	14,9	20,0	-
S2-2	15,3	links	15,0	-	-	-
		rechts	10,1	14,0	22,0	22,1
S2-3	15,6	links	12,9	-	43,9	42,2
		rechts	9,5	13,5	25,2	25,0
S2-4	18,5	links	-	-	-	-
		rechts	10,5	16,3	25,9	27,6
S2-5	19,7	links	12,5	17,8	35,7	43,2
		rechts	9,4	14,6	25,4	28,4
S2-6	17,2	links	13,9	17,1	-	-
		rechts	10,1	15,9	23,9	31,8
\bar{x}	17,2		11,6	15,5	30,4	31,5
s	1,7		2,2	1,5	10,9	8,2
v	10 %		19 %	10 %	36 %	26 %

Tabelle A-43 Versuchsergebnisse Reihe S3 – Windsog

Versuch	F_{max} in kN	k_s in kN/mm
S3-1	3,8	15,4
S3-2	4,6	22,9
S3-3	4,1	28,7
S3-4	3,6	18,3
S3-5	3,4	14,1
\bar{x}	3,9	19,9
s	0,5	7,0
v	12 %	35 %

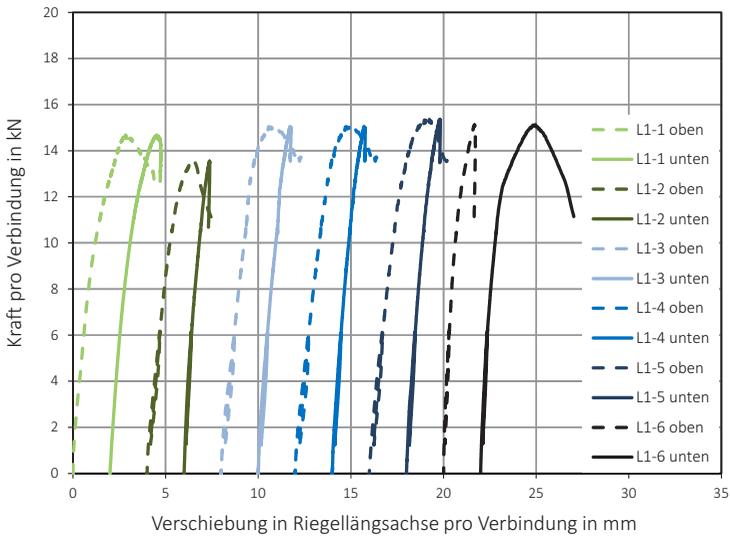


Bild A-61 Last-Verformungs-Diagramm Reihe L1 – Kraft in Längsrichtung

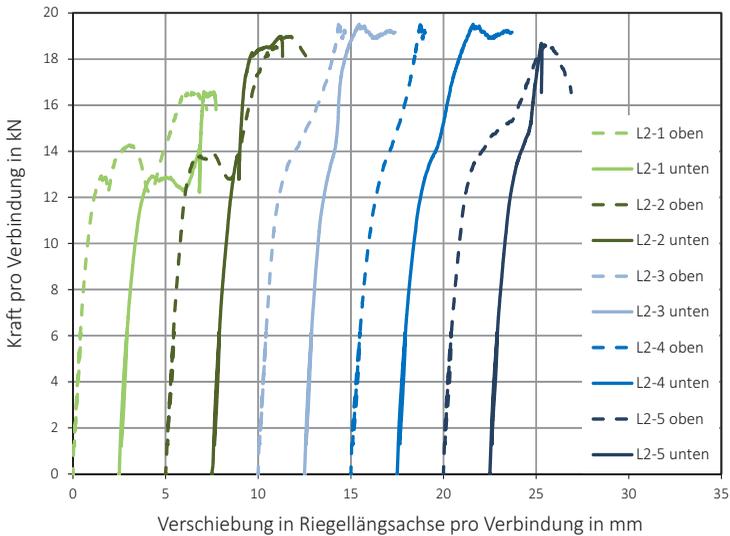


Bild A-62 Last-Verformungs-Diagramm Reihe L2 – Kraft in Längsrichtung

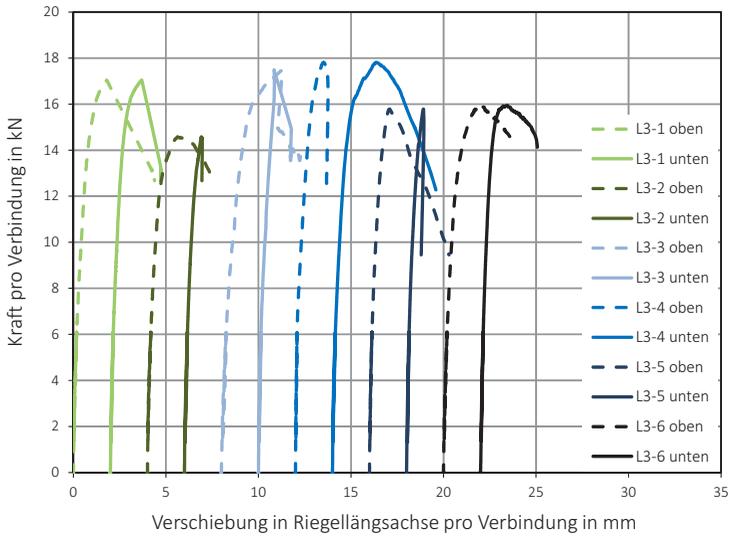


Bild A-63 Last-Verformungs-Diagramm Reihe L3 – Kraft in Längsrichtung

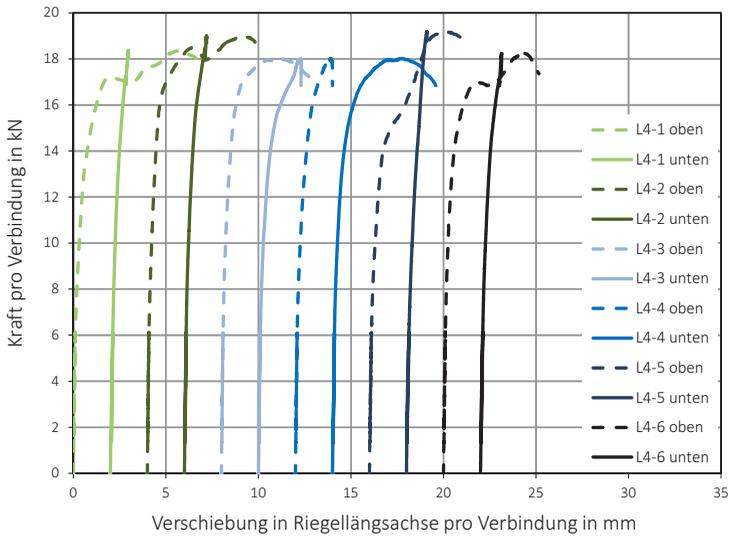


Bild A-64 Last-Verformungs-Diagramm Reihe L4 – Kraft in Längsrichtung

Tabelle A-44 Ergebnisse Reihe L1 – Kraft in Riegellängsachse

Ver- such	F_{max} in mm	oben/ unten	u_{max} in mm	$F_{0,5mm}$ in kN	$F_{2,0mm}$ in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm
L1-1	14,7	oben	2,8	5,2	14,7	8,9	-
		unten	2,5	5,7	13,7	10,8	10,6
L1-2	13,5	oben	2,5	4,7	13,5	8,0	10,0
		unten	1,4	7,2	-	14,6	16,2
L1-3	14,0	oben	2,8	4,6	14,0	7,6	9,7
		unten	1,8	6,2	-	11,1	13,8
L1-4	15,0	oben	2,7	4,5	15,0	7,5	10,6
		unten	1,7	6,4	-	11,8	14,5
L1-5	15,4	oben	3,2	4,8	15,4	8,3	10,6
		unten	1,8	6,4	-	12,6	15,4
L1-6	15,1	oben	1,7	8,6	-	18,0	21,1
		unten	3,0	7,5	14,0	16,0	19,1
\bar{x}	14,6		2,3	6,0	14,3	11,3	13,8
s	0,7		0,6	1,3	0,7	3,5	3,9
v	5 %		27 %	22 %	5 %	31 %	28 %

Tabelle A-45 Ergebnisse Reihe L2 – Kraft in Riegellängsachse

Ver- such	F_{max} in mm	oben/ unten	u_{max} in mm	$F_{0,5mm}$ in kN	$F_{2,0mm}$ in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm
L2-1	16,6	oben	6,0	7,3	14,3	13,7	14,3
		unten	4,6	7,0	12,9	13,8	16,3
L2-2	19,0	oben	6,6	7,1	14,0	14,2	13,7
		unten	3,7	7,4	17,9	16,4	18,2
L2-3	21,6	oben	4,6	7,1	19,5	13,1	14,3
		unten	4,5	7,7	18,7	15,4	17,0
L2-4	19,5	oben	3,7	6,2	19,5	11,1	12,8
		unten	4,1	6,7	13,9	13,0	15,7
L2-5	18,7	oben	5,6	6,9	15,8	13,4	14,3
		unten	2,8	7,2	14,6	14,6	15,5
\bar{x}	19,1		4,6	7,0	16,1	13,9	15,2
s	1,8		1,2	0,4	2,5	1,4	1,6
v	9 %		25 %	6 %	16 %	10 %	11 %

Tabelle A-46 Ergebnisse Reihe L3 – Kraft in Riegellängsachse

Ver- such	F_{max} in mm	oben/ unten	u_{max} in mm	$F_{0,5mm}$ in kN	$F_{2,0mm}$ in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm
L3-1	17,2	oben	2,1	10,9	17,2	31,2	33,7
		unten	1,9	12,1	-	35,5	38,5
L3-2	14,6	oben	1,6	10,6	-	30,4	30,7
		unten	0,9	11,7	-	33,3	36,1
L3-3	13,9	oben	1,6	9,0	-	20,8	24,6
		unten	0,8	11,5	-	38,9	45,2
L3-4	17,8	oben	1,5	12,4	-	63,5	73,3
		unten	2,4	11,5	17,4	36,1	36,3
L3-5	15,8	oben	1,1	12,1	-	42,6	43,2
		unten	0,9	12,6	-	44,0	51,9
L3-6	15,9	oben	2,1	10,6	15,9	28,4	30,4
		unten	1,4	12,8	-	42,0	44,8
\bar{x}	15,9		1,5	11,5	16,8	37,2	40,7
s	1,5		0,5	1,1	0,8	10,6	12,8
v	9 %		34 %	9 %	5 %	29 %	31 %

Tabelle A-47 Ergebnisse Reihe L4 – Kraft in Riegellängsachse

Ver- such	F_{max} in mm	oben/ unten	u_{max} in mm	$F_{0,5mm}$ in kN	$F_{2,0mm}$ in kN	k_s in kN/mm	$k_{s,w}$ in kN/mm
L4-1	18,4	oben	5,7	12,2	17,7	52,2	57,8
		unten	1,0	14,2	-	45,7	65,4
L4-2	19,0	oben	5,3	14,3	18,5	67,8	79,8
		unten	1,2	14,5	-	66,9	73,6
L4-3	18,4	oben	3,4	14,7	18,4	71,1	82,9
		unten	2,3	13,3	17,4	65,2	67,9
L4-4	18,0	oben	1,9	13,0	-	62,2	68,3
		unten	3,7	13,0	17,3	54,1	64,6
L4-5	19,2	oben	4,1	12,2	19,2	54,3	61,3
		unten	1,1	13,1	-	41,9	44,3
L4-6	18,2	oben	4,4	13,3	18,1	60,9	66,3
		unten	1,1	13,6	-	50,3	56,5
\bar{x}	18,5		2,9	13,5	18,1	57,7	65,7
s	0,5		1,7	0,8	0,7	9,3	10,4
v	2 %		58 %	6 %	4 %	16 %	16 %

