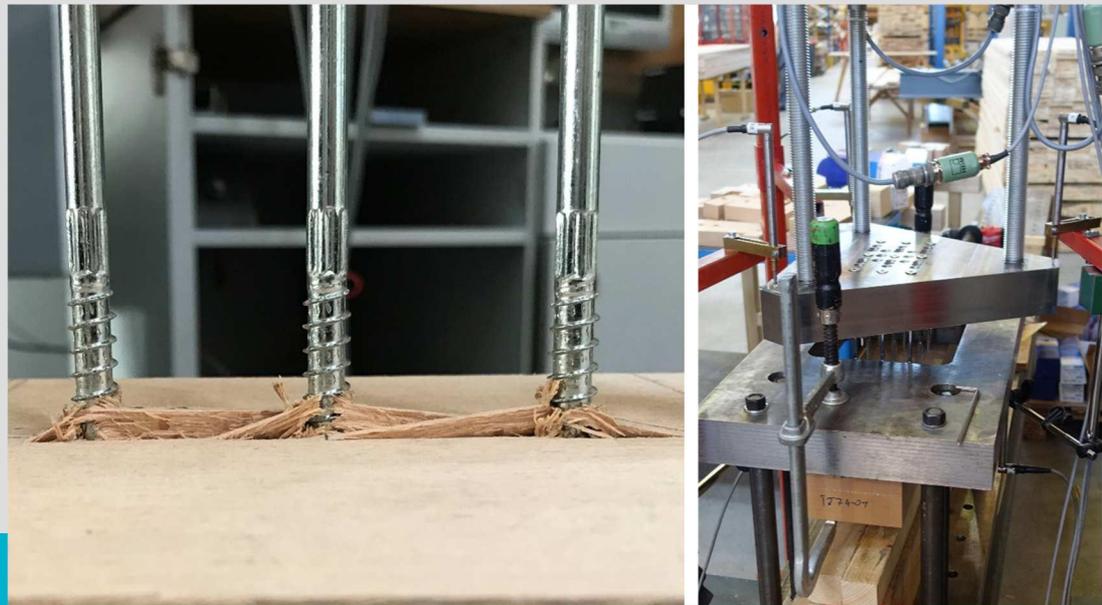


Untersuchung von rechtwinklig zur Faser eingebrachten, axial beanspruchten Schraubengruppen in Laubholz



M-4-11/2020

Matthias LUEF

Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz



Matthias Luef, BSc

Untersuchung von rechtwinklig zur Faser eingebrachten, axial beanspruchten Schraubengruppen in Laubholz

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

Eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Betreuer
Assoc.Prof. Dipl.-Ing.(FH) Dr.techn. Reinhard Brandner
Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Ringhofer
Dipl.-Ing. Ursula Mahlkecht
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, Oktober 2020

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Freunden / Freundinnen und Studienkollegen / Studienkolleginnen bedanken, die mich durch meine Studienzeit begleitet haben. Durch euch wurde diese Zeit unvergesslich.

Ein großer Dank für die gute Betreuung und die anregenden Diskussionen gilt meinem Hauptbetreuer Reinhard Brandner. Herzlichen Dank auch an Ursula Mahlknecht. Sie war eine große Stütze von Beginn bis zur Vollendung der Masterarbeit. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Andreas Ringhofer, den ich ebenfalls zu meinem Betreuungsteam zählen durfte.

Des Weiteren möchte ich mich bei den Mitarbeitern / Mitarbeiterinnen des Instituts für Holzbau und Holztechnologie sowie der holz.bau forschungs gmbh bedanken. Es herrschte immer eine angenehme Arbeitsatmosphäre und auch der Gesprächsstoff ging nie aus. Auch bedanken möchte ich bei Bernd Heissenberger für die tatkräftige Unterstützung bei der Herstellung der Prüfkörper, der Durchführung und der Nachbereitung der Prüfungen.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich immer unterstützt und mir das Studium ermöglicht haben. Eine große Stütze war meine Freundin, die mich stets motiviert hat.

Kurzfassung

Das stetig wachsende Interesse am Bauen mit Holz erfordert die Bereitstellung von genügend Ressourcen und eine große Bandbreite an Holzarten und Verbindungsmöglichkeiten. In den letzten Jahrzehnten findet eine Umstrukturierung von reinen Nadelholzbeständen zu Laub- und Mischwäldern statt. Damit ändert sich auch die Zusammenstellung des Holzvorrates in den heimischen Wäldern und somit das zur Verfügung stehende Baumaterial. Im Speziellen weist das Hartlaubholz höhere mechanische Kenngrößen als das herkömmliche Bauholz Fichte auf und ist bei effizientem Einsatz für schlanke Holzkonstruktionen prädestiniert. Um für diesen Einsatz ebenso erforderliche effiziente Verbindungen herstellen zu können, gilt es bestehende Regelwerke zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen.

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit Verbindungen aus axial beanspruchten Schraubengruppen mit einem Winkel von 90° zwischen Schraubenachse und Faserrichtung. Dazu wurden Prüfungen an Schraubengruppen mit maximal neun Schrauben sowie Reihen mit maximal drei Schrauben, appliziert in Brettschichtholzträgern aus Buche sowie Birke und Furnierschichtholzträgern aus Buche, durchgeführt. Die Lagerung der Prüfkörper in den „push-pull“ Prüfungen erfolgte quer zur Achsrichtung nahe der Schraubengruppe. Dabei wurden Parameter wie die Abstände zwischen den Schrauben in, a_1 , und quer zur Faserrichtung, a_2 , sowie die Einschraub- und Einbindetiefe variiert und die dabei beobachteten Versagensmechanismen und Tragfähigkeiten der Verbindungen vertiefend analysiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass trotz Einhaltung der Verbindungsmittelabstände $a_1 = 7d$ und $a_2 = 5d$ laut Eurocode 5 [1] neben dem erwartbaren Versagensmechanismus Herausziehen auch Blockscheren auftreten kann. Der Mittelwert des Widerstandes beider Versagensmechanismen lag dabei auf proportional vergleichbarem Niveau mit der Einzelschraube. Die Verbindungsmittelabstände wurden bis $a_1 = 5d$ oder $a_2 = 2,5d$ reduziert. Dabei wurde beobachtet, dass bei Schraubengruppen in Buche und Birke mit ausreichendem Volumen, sichergestellt durch eine entsprechende Einbindelänge l_{emb} bzw. einer größeren effektiven Einschraublänge l_{ef} , der Widerstand am Niveau des Mittelwertes ebenfalls gehalten werden konnte, dies sowohl bei Schraubenbruch als auch bei Ausziehversagen. In weiterführenden Arbeiten ist die Gegenüberstellung der Ergebnisse mit jenen aus Prüfungen an Queranschlüssen mit größeren seitlichen Auflagerabständen, im Sinne von mittig beanspruchten Einfeldträgern, geplant.

Abstract

The growing interest to build with timber requires the provision of sufficient recourses and a wide range of wood species and connection types. In the last few decades there has been a restructuring from primary softwood stocks to an increasing amount of hardwood and mixed forests. This consequence a change in the wood supply in the domestic forests and therefore also a change in the available building materials. In particular, hardwood, which usually has higher mechanical characteristics than the conventionally used construction material Norway spruce, is predestined to be used as construction material for slender timber structures. To be able to produce also similarly efficient connections for such application, existing regulations must be checked and, if necessary, adapted.

This master thesis focuses on connections with axially-loaded groups of screws with an angle between the screw axis and the grain of 90° . For this purpose, tests were executed on groups of screws with a maximum of nine screws per group and three screws in a row, applied in glued laminated timber beams made of beech and birch and laminated veneer lumber beams made of beech. The specimens were tested in a “push-pull” configuration with a near support perpendicular to the grain. In doing so, parameters such as the spacing in grain direction, a_1 , and perpendicular to the grain, a_2 , as well as the penetration and embedment depth were varied and thereby observed failure mechanisms and load carrying capacities recorded and analysed further.

The results clearly show apart from withdrawal failure also block shear as failure mechanism even when testing groups of screws with minimum spacing $a_1 = 7d$ and $a_2 = 5d$ according to Eurocode 5 [1]. The mean values of the resistances of both failure mechanisms were proportionally on a comparable level with the single screw withdrawal resistance. The spacing was further reduced to $a_1 = 5d$ or $a_2 = 2.5d$. From these tests it was observed that for groups of screws in members of beech and birch with sufficient volume, ensured by embedding the screws' thread, l_{emb} , or by realising a larger effective anchorage length, l_{ef} , the average load carrying capacities could be again maintained for both steel and withdrawal failure mechanism. In further work, it is planned to compare the test results with those from tests with larger support distances, in the sense of centrally stressed single span girders.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| KAPITEL 1: EINLEITUNG | 1 |
| 1-1 MOTIVATION..... | 1 |
| 1-1.1 Axial beanspruchte Schraubengruppen | 2 |
| 1-1.2 Fokus Queranschluss mit $\alpha = 90^\circ$ | 4 |
| 1-1.3 Einflussparameter | 4 |
| 1-2 ZIELSETZUNG | 5 |
| 1-3 GLIEDERUNG | 5 |
| KAPITEL 2: STAND DES WISSENS | 6 |
| 2-1 HARTLAUBHOLZ..... | 6 |
| 2-1.1 Neigung zum Spalten | 7 |
| 2-1.2 Wuchsmerkmale | 8 |
| 2-1.3 Quellen und Schwinden..... | 8 |
| 2-1.4 Zerlegungsgrad / Laubholzprodukte..... | 9 |
| 2-1.5 Gegenüberstellung Materialparameter von Laub- und Nadelholz..... | 10 |
| 2-2 HOLZBAUSCHRAUBEN FÜR HARTLAUBHOLZ..... | 10 |
| 2-3 QUERANSCHLÜSSE MIT SCHRAUBENGRUPPEN | 11 |
| 2-3.1 Normative Regelungen für Hartlaubholz | 11 |
| 2-3.2 Versagensmechanismen | 12 |
| 2-3.3 Allgemeine Erkenntnisse aus der Literatur | 17 |
| KAPITEL 3: MATERIAL UND METHODEN | 23 |
| 3-1 PRÜFKONZEPT | 23 |
| 3-1.1 Allgemeine Vorbemerkungen | 23 |
| 3-1.2 Nahes Auflager..... | 23 |
| 3-2 MATERIAL | 27 |
| 3-2.1 Prüfkörper..... | 27 |
| 3-2.1.1 Herstellung der Prüfkörper | 27 |
| 3-2.2 Verbindungsmittel – Holzschraube | 30 |
| 3-3 METHODEN..... | 30 |
| 3-3.1 Prüfaufbau | 30 |
| 3-3.2 Vorbemessung | 33 |
| 3-3.3 Ablauf..... | 35 |
| 3-3.4 Nachbereitung der Prüfkörper | 37 |
| 3-3.5 Messwerte und Beurteilung des Prüfverlaufes | 41 |
| 3-3.5.1 Prüfkraft..... | 41 |
| 3-3.5.2 Wegmessung und Steifigkeit..... | 42 |
| 3-3.5.3 Statistische Bewertung | 43 |
| KAPITEL 4: ERGEBNISSE UND DISKUSSION | 45 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 4-1 | HOLZFEUCHTE..... | 45 |
| 4-2 | ROHDICHTE | 48 |
| 4-3 | AUSWERTUNG EINZELSCHRAUBE | 50 |
| 4-4 | AUSWERTUNG SCHRAUBENREIHEN..... | 52 |
| 4-5 | AUSWERTUNG GRUPPE | 54 |
| 4-5.1 | Serien mit Ausziehversagen..... | 55 |
| 4-5.2 | Serien mit Blockscherversagen..... | 60 |
| 4-5.3 | Serien mit Schraubenbruch | 63 |
| 4-6 | BLOCKSCHERMODEL..... | 65 |
| 4-7 | STEIFIGKEIT | 67 |
| 4-7.1 | Steifigkeit der Verbindung – Prüfung mit nahem Auflager..... | 67 |
| 4-7.2 | Querdrucksteifigkeit am Auflager | 69 |
| KAPITEL 5: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK..... | | 72 |
| 5-1 | ZUSAMMENFASSUNG DER PRÜFUNGEN..... | 72 |
| 5-2 | WICHTIGE ERKENNTNISSE | 72 |
| 5-3 | AUSBLICK | 75 |
| ANHANG A LITERATURVERZEICHNIS..... | | 1 |
| ANHANG B ABBILDUNGSVERZEICHNIS | | 5 |
| ANHANG C PRÜFDATEN JE PRÜFKÖRPER | | 7 |
| ANHANG D PROTOKOLLE..... | | 13 |

KAPITEL 1: EINLEITUNG

1-1 MOTIVATION

In den letzten Jahrzehnten findet immer mehr eine Umstrukturierung der Wälder von reinen Nadelholzbeständen zu Laub- und Mischwäldern statt. Die Buche (*Fagus sylvatica*) ist ein Vertreter von Hartlaubholz und ihr Anteil in den Mitteleuropäischen Wäldern steigt stark an, wohingegen die Fichte (*Picea abies*) als Vertreter der Nadelhölzer abnimmt. Dies steht mit dem Klimawandel und der vermehrten Forderung nach Biodiversität in Verbindung und spiegelt sich auch beispielsweise in der österreichischen Waldinventur [2] und der deutschen Waldinventur [3] wider. Somit verändert sich auch die Struktur des Holzvorrates und es entsteht ein Interesse, ja eine Notwendigkeit in der Holzbaubranche, die Ressource Laubholz in Zukunft verstärkt zu nutzen.

Dieses Interesse ist auch damit verbunden, dass sich aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften insbesondere Hartlaubholzprodukte im Besonderen für schlanke Bauteile und Bauteile mit hoher Beanspruchbarkeit eignen. Folglich sind in den letzten Jahren auch einige Produkte aus Hartlaubholz entwickelt worden, z. B. Brettschichtholz, Brettsperrholz, Furnierschichtholz und Hybridprodukte, in Mitteleuropa vorwiegend aus Buche und Birke. In diesen Produkten wird das zuvor eingesetzte Nadelholz durch die genannten Laubholzarten substituiert. Aktuell werden diese Produkte aber noch nicht in der breiten Masse verbaut, sondern primär aus architektonischen Gesichtspunkten heraus sowie allgemein für die Innenraumgestaltung eingesetzt. Ein im Vergleich zu Produkten aus Fichte höherer Kostenaufwand für das Ausgangsmaterial und / oder die Produktion kann z. T. mit geringerem Materialbedarf aufgrund der schlankeren Bauteile ausgeglichen werden. Ein weiterer Grund, warum der Einsatz von Laubholzprodukten im Baubereich noch sehr beschränkt ist, ist, dass noch wenige mechanische Verbindungsmittel für Laubholz zugelassen sind oder entsprechende konstruktive Vorgaben (noch) fehlen. Im Eurocode 5 [1], dem aktuellen Regelwerk für die Bemessung und Konstruktion von Holzbauten, sind derzeit für Laubholz (noch) nicht alle Parameter und Bemessungsmodelle für die verschiedenen Versagensmechanismen verfügbar, welche für die Einschätzung und Abklärung der allgemeinen Anforderungen an Verbindungen, wie Duktilität, Widerstand und Steifigkeit, benötigt werden.

Bis vor Kurzem waren keine selbstbohrenden Holzbauschrauben für den Einsatz in Hartlaubholzprodukten am Markt verfügbar. Die Schraubenlöcher mussten stets vorgebohrt werden. Dies führte zu einem erhöhten Aufwand und Kosten bei der Herstellung im Vergleich zu Fichtenholz. Durch die mit der höheren Rohdichte des Laubholzes zusammenhängenden Eigenschaften ergeben sich einerseits höhere Anforderungen an die Schrauben, insofern man das Leistungspotential von Hartlaubholzprodukten entsprechend auch im Anschluss nutzen möchte, und andererseits an die Bearbeitungs- und Montagehilfen. Im Vergleich zu Fichtenholzprodukten wird bereits bei einer geringen Einschraublänge im Holz eine hohe axiale Beanspruchung erreicht, wodurch die an Hartlaubholz adaptierte Verbindungstechnik zur Ausschöpfung des Potentials eine höhere Steifigkeit und einen höheren Widerstand aufweisen muss.

In Zukunft wird die Notwendigkeit, Hartholz verstärkt einzusetzen, weiter steigen, da die Forderung nach nachhaltigen Gebäuden und somit der Bedarf an Holzbauprodukten immer größer wird. In Bezug darauf ist es möglich, dass traditionelle Baumaterialien, welche große Mengen an Treibhausgasen verursachen, auch durch Hartlaubholz ersetzt werden.

Diese Masterarbeit leistet einen Beitrag zum Forschungsprojekt `hardwood_joint` - Innovative Verbindungslösungen für Bauteile aus Hartholz, das ein Teil des von der Europäischen Union initiierten Forschungs- und Innovationsprogramms ForestValue im Rahmenprogramm Horizon 2020 ist. Das Projekt `hardwood_joint` beschäftigt sich mit der Entwicklung von hocheffizienten und innovativen Verbindungen in Hartlaubholz. Ziel ist eine breite Anwendung von Laubholzkonstruktionen zu ermöglichen und die

bereits vielfach in Verwendung befindlichen Holzbauverbindungs-Modelle und Bemessungsgleichungen auch für die Herausforderungen in Laubholz zu adaptieren.

An diesem Projekt forschen mehrere in Europa führende Universitäten im Bereich Holzbau und entwickeln und überprüfen Verbindungssysteme aus Hartlaubholz. Unter Absprache mit den Projektpartnern / Projektpartnerinnen und unter Berücksichtigung, dass die Rotbuche (*Fagus sylvatica*) die häufigste Laubholzart in Mitteleuropa ist, finden die Hauptuntersuchungen für diese Holzart statt. Die Erkenntnisse daraus werden zudem an Birken- und Furnierschichtholz aus Buche überprüft. An der Forschungsgruppe sind Universitäten und Industriepartner aus Deutschland, Frankreich, Schweden und Österreich beteiligt. Die Themenbereiche wurden aufgeteilt und die daraus gewonnenen Ergebnisse werden an Fachkonferenzen vorgestellt und diskutiert. Während sich alle weiteren Universitäten vorwiegend mit lateral beanspruchten Verbindungsmitteln befassen, betrachtet das Institut für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz axial beanspruchte Schraubenverbindungen in Hartlaubholz.

Die aktuellen Untersuchungen am Institut für Holzbau und Holztechnologie erfassen u.a. den Widerstand und die Steifigkeit von axial beanspruchten Schraubengruppen appliziert in Birke und Buche. Die Untersuchungen wurden in die Teilbereiche 0° , 45° und 90° zur Faser gegliedert. In der vorliegenden Masterarbeit werden die Prüfungen 90° zur Faser beschrieben und analysiert. Bei der Unterscheidung von Einschraub- bzw. Last-Faserwinkel spielt die Art der Kraftübertragung, die Lage der Schraubenspitze relativ zur Probenhöhe, die geometrische Anordnung der Gruppe im Sinne des Einschraubbildes relativ bezogen auf die jeweils relevanten Probenabmessungen und gegebenenfalls die Art der Lagerung eine besondere Rolle.

1-1.1 AXIAL BEANSPRUCHTE SCHRAUBENGRUPPEN

Dieser Abschnitt soll einen Überblick über die Einsatzmöglichkeiten von axial beanspruchten Schraubengruppen geben. Anschlüsse bestehend aus axial-beanspruchten Schraubengruppen sind zunächst in ihrem Potential und Verhalten nach dem Achs-Faserwinkel α zu unterscheiden. Ein Winkel $\alpha = 0^\circ$ entspricht hierbei einem Hirnholzanschluss, welcher mit einem Winkel von 0° zwischen Faserrichtung und Schraubenachse ausgeführt wird, wie in Abbildung 1-1 dargestellt.

Des Weiteren wird der Last-Faserwinkel γ eingeführt. Somit werden bei Verbindungen, bei denen $\alpha = \gamma$ ist, die Schrauben rein axial belastet und bei Verbindungen, bei denen $\alpha \neq \gamma$ ist, die Schrauben axial und / oder lateral beansprucht. Verbindungsvarianten welche $\alpha \neq \gamma$ aufweisen, werden in Abbildung 1-4 dargestellt.

Die Verbindung kann als Holz-Holz oder Stahlblech-Holz mit außenliegendem Stahlblech ausgeführt werden, wobei sich diese Masterarbeit auf letztere Verbindung beschränkt. Mit Bezug auf die Oberflächenverformung wird weiters zwischen „freier Oberfläche“ und „gesperrter Oberfläche“ unterschieden. Bei der gesperrten Oberfläche wird durch das Aufbringen der Last die außen liegende Stahlplatte an die Oberfläche gepresst und somit die Verformung der Oberfläche behindert. Durch das Anpressen kommt es zudem zwischen dem Holz und der Stahlplatte zur Aktivierung von Reibungskräften, welche zudem die Tragfähigkeit derart beanspruchter Anschlüsse erhöhen. Hingegen sind bei der freien Oberfläche die Verformungen der Holzoberfläche nicht eingeschränkt und die Aktivierung von Reibungskräften entfällt. Bei den Prüfungen dieser Masterarbeit wird ein Aufbau mit einer freien Oberfläche geprüft.

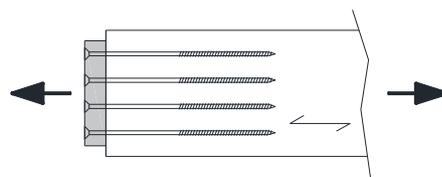


Abbildung 1-1 Hirnholzanschluss, $\alpha = 0^\circ$, $\gamma = \alpha$, freie Oberfläche

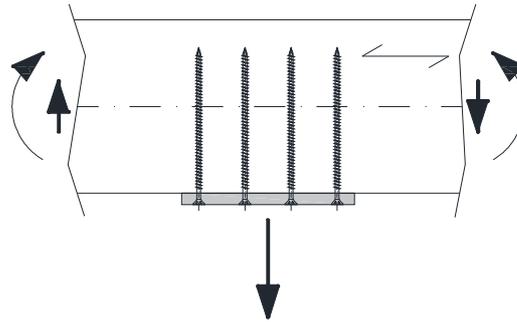


Abbildung 1-2 *Queranschluss, $\alpha = 90^\circ$, $\gamma = \alpha$, freie Oberfläche*

In Abbildung 1-2 ist eine Schraubengruppe mit einem Winkel von 90° zur Faserrichtung angeordnet. Diese Konfiguration wird im Rahmen dieser Masterarbeit eingehender untersucht.

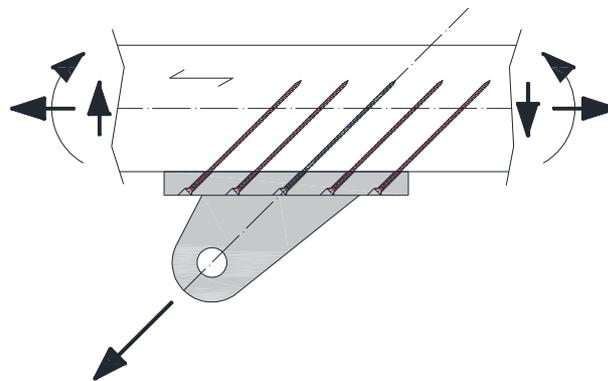


Abbildung 1-3 *Anschluss mit geneigt angeordneten Schrauben und freier Oberflächenverformung, $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, $\gamma = \alpha$*

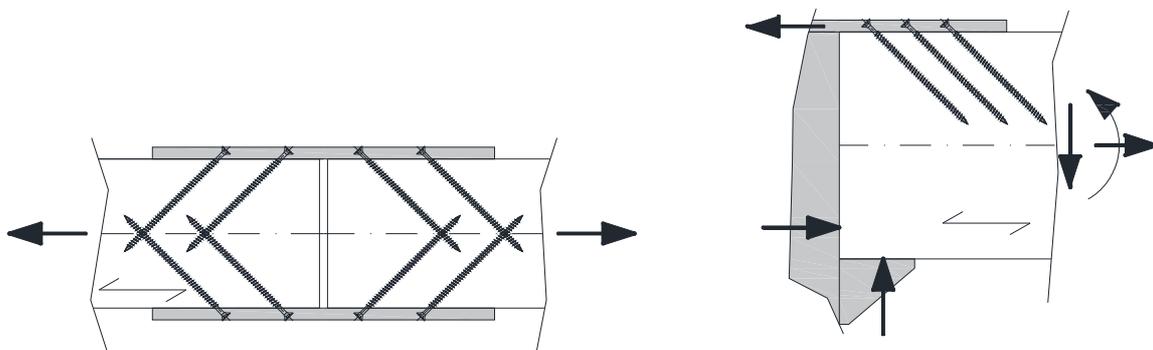


Abbildung 1-4 *Anschlüsse mit geneigt angeordneten Schrauben und gesperrter Oberflächenverformung, $\gamma \neq \alpha$*

Die in Abbildung 1-1 und Abbildung 1-3 dargestellten Verbindungen werden im Zuge der Masterarbeit von Schweiger [4] am Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz untersucht.

Aufgrund der orthotropen Materialeigenschaften von Holz ist eine getrennte Betrachtung der zuvor beschriebenen Anwendungen notwendig. Je nach Verbindungstyp kann eine unterschiedliche Beanspruchungssituation entstehen. Dabei wird der unterschiedliche Kraftfluss nachverfolgt und der mögliche maßgebende Versagensmechanismus eruiert und bemessen.

Einheitliche Vorgaben von geometrischen Parametern oder Bemessungsregeln für den gesamten Bereich der axial beanspruchten Schraubengruppen ist sinnvoll, aber nicht für alle Parameter möglich. So sind Versagensmechanismen wie beispielsweise Ausziehversagen bei allen Anwendungen möglich, aber die

Voraussetzungen für das Erreichen dieses Versagensmechanismus können sich unterscheiden. In Bezug darauf ist es sinnvoll, eine getrennte Betrachtung der Anwendungsfälle vorzunehmen.

1-1.2 FOKUS QUERANSCHLUSS MIT $\alpha = 90^\circ$

Axial beanspruchte Schraubengruppen mit einem Winkel von $\alpha = 90^\circ$ zur Faserrichtung wie in Abbildung 1-2 dargestellt wurden bezüglich der Tragfähigkeit auf Zug bereits mehrfach bei Fichtenholzprodukten untersucht, unter anderem von Carradine 2009 [5], Schoenmakers 2010 [6], Plieschoung 2010 [7], Mahlknecht 2011 [8], Mahlknecht et al. 2013 [9], 2019 [10], Blaß und Flaig 2019 [11]. Da für Hartlaubholz erst wenige Untersuchungen vorliegen, ist es von Interesse, die Tragfähigkeit und weitere wesentliche Eigenschaften derartiger Anschlüsse zu kennen und in Folge zuverlässig berechnen zu können.

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen können auch als Basis für Modelle und Betrachtungen für den Winkel zur Faserrichtung von $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ verwendet werden. Beispielsweise wird bei der Ausziehfestigkeit mit $\alpha = 90^\circ$ keine Abminderung vorgenommen, jedoch bei $\alpha = 0^\circ$ nach Eurocode [1] mit dem Faktor 1,2 dividiert. Dazwischen wird eine Abminderung in Abhängigkeit des Winkels vorgegeben. Weiters gibt es viele Parallelen zwischen den Anschlüssen mit 90° zur Faser und geneigten Anschlüssen, wie z. B. die Versagensmechanismen und ähnliche Anordnungsparameter bei gleichem Verbindungstypen. Des Weiteren ist die Umsetzbarkeit von Untersuchungen mit geneigten Verbindungen wesentlich aufwendiger.

1-1.3 EINFLUSSPARAMETER

Dabei stellt sich die Herausforderung, die umfangreichen Anwendungsmöglichkeiten auf einen repräsentativen Fall zu reduzieren, bei dem alle ausschlaggebenden Einflussparameter variiert und betrachtet werden können.

Bei dem Design von geschraubten Verbindungen ist es unerlässlich auf die **geometrischen Parameter** einzugehen, denn sie wirken sich auf die Herstellbarkeit der Verbindung und die maßgebenden Versagensmechanismen in Bezug auf den Widerstand bei der Beanspruchung aus.

Um die **Herstellung** einer intakten Verbindung zu ermöglichen, soll darauf geachtet werden lokale Risse in der Nähe des Schraubengewindes, welche durch Applizieren der Schrauben entstehen, so klein wie möglich zu halten. Werden Schrauben ohne vorzubohren eingedreht, wird das Holz verdrängt, wodurch eine lokale Rissbildung zu erwarten ist und das Holz im Verankerungsbereich stark verdichtet wird. Wenn beim Eindrehen bereits eine Rissbildung vorhanden ist, kann davon ausgegangen werden, dass sich diese Risse in Bezug auf die Langzeitbetrachtung vergrößern. Um Risse bei der Applizierung der Schrauben zu vermeiden und weniger Einschraubwiderstand und somit weniger Torsionsbeanspruchung der Schraube zu erreichen, muss die Verbindung nach den Angaben lt. Eurocode 5 [1] bzw. diversen ETAs auch vorgebohrt werden, siehe dazu auch Abschnitt 2-2. Das Vorbohren bedeutet jedoch mehr Aufwand und es stellt sich die Frage nach der Wirtschaftlichkeit der Ausführung. Aus diesem Einschraubprozess können geometrische Mindestgrößen bestimmt werden mit dem Ziel, die Rissbildung durch das Eindrehen von selbstbohrenden Holzbauschrauben minimal zu halten. Auch die Reihenfolge der Schrauben beim Eindrehen bzw. Anziehen ist relevant und sollte so durchgeführt werden, dass alle Schrauben eine gleichmäßige Vorspannung erfahren. Das ist bei axial beanspruchten Schraubengruppen relevant, um sicherzustellen, dass der Schwerpunkt des Widerstandes mit dem Schwerpunkt der Belastung übereinstimmt. Weiters weisen axial belastete Schraubengruppen im Vergleich zu z.B. lateral beanspruchten Dübeln eine sehr geringe Duktilität und ein sehr geringes Potential zur Kraftumlagerung auf, weshalb die gleichmäßige Vorspannung essenziell ist.

Bei der Bemessung der Verbindung müssen alle möglichen **Versagensmechanismen** nachgewiesen werden, welche in Abschnitt 2-3.1 aufgelistet sind. Um die Bemessung zu erleichtern, wird durch die Angabe geometrischer Parameter angestrebt, ein wünschenswertes Zielversagen zu erreichen, z.B. Ausziehversagen. Dadurch können die Nachweise vereinfacht und nur das Zielversagen nachgewiesen werden. Durch diese Verkürzung der Nachweisführung kann auch eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit sichergestellt werden.

Weiters gibt es eine große Bandbreite an **Materialeigenschaften**. Die Herausforderung besteht darin, für verschiedene Holzarten und -produkte und Schrauben einheitliche Regelungen und Modelle zu finden. Beispielsweise sind für die Abgrenzung zwischen einzelnen Versagensmechanismen in Holz u.a. auch die Verhältnisse zwischen den Eigenschaften längs und quer zur Faser relevant. Diese sollen idealerweise in numerischen Modellen für die einzelne Holzart oder Festigkeitsklasse angepasst und an experimentellen Untersuchungen überprüft werden.

Es wurde für die untersuchten Serien eine Prüfkfiguration mit nahem Auflager festgelegt. Dies geschah aus mehreren Gründen, die nachfolgend erläutert werden. Bei der Durchführung einer umfangreichen Parametervariation an Einfeldträgern entsteht ein sehr hoher Material-, Kosten-, und Zeitaufwand. Eine wesentliche Rolle spielen die Biegespannungen, welche sich bei einem Einfeldträger auf die Verbindung auswirken. Um die Grundsätzliche funktionsweise einer axial beanspruchten Verbindung in Hartlaubholz verstehen zu können, wurden somit die Biegespannungen ausgeschlossen. Weitere Rahmenbedingungen sind das verfügbare Material (Eigenschaften), die Dimensionen der Prüfkörper, die maximale Kraft der Prüfmaschine und der vorhandene Prüfaufbau. Die Ergebnisse dieser Prüfungen werden in einer weiterführenden Arbeit an Einfeldträgern überprüft.

1-2 ZIELSETZUNG

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung von axial belasteten selbstbohrenden Schraubengruppen appliziert in Hartlaubholz, wobei Brettschichtholzträger aus Buche und Birke und Furnierschichtholzträger aus BauBuche im Fokus stehen.

Es werden geometrischen Parameter, wie der Abstand der Schrauben in und quer zur Faserrichtung, der Abstand der Schrauben zum Rand, die Einschraubtiefe, die Prüfkörperbreite und die Schraubenanzahl je Gruppe, variiert und deren Einfluss auf den Widerstand der Verbindung und die Versagensmechanismen betrachtet. Dabei wird versucht den Abstand zwischen den Schrauben zu optimieren und somit die Tragfähigkeit der Einzelschraube auch in einer Schraubengruppe zu erreichen. In Bezug darauf werden Modelle mit den Ergebnissen bezogen auf die Ausziehtragfähigkeit der Einzelschraube bzw., zur Gruppenwirkung von Schrauben überprüft.

Bei der Prüfung werden Wergmesser am Prüfkörper und am Prüfaufbau angebracht, um die Verformungen später analysieren zu können. Dabei wird untersucht, ob eine Bestimmung der Steifigkeit der Verbindung mit dem vorhanden Blockschermodell nach Mahlknecht und Brandner [10] möglich ist und mit den Ergebnissen übereinstimmt. Des Weiteren wird auch die Querdrucksteifigkeit am Auflager näher gemessen und mit einer RFEM [12] Simulation überprüft.

1-3 GLIEDERUNG

In Kapitel 1 werden Möglichkeiten für die Verwendung von axial beanspruchten Schraubengruppen und die für die Verbindung grundsätzlich und im allgemeinen relevanten Parameter erläutert. Auch die Motivation und das Ziel dieser Arbeit sind darin enthalten.

In Kapitel 2 wird auf den Werkstoff Holz, im speziellen auf Hartlaubholz, eingegangen. Dabei werden Erkenntnisse aus der Forschung, die sich auch mit axial beanspruchten Schraubengruppen oder mit Schrauben in Hartlaubholz beschäftigen beschrieben. Ebenfalls Eingang finden die Anwendung von Schrauben im Hartlaubholz und die jeweiligen technischen und normativen Möglichkeiten werden erläutert. Im weiteren Verlauf kommt es auch zur Beschreibung entsprechender Versagensmechanismen.

Schließlich werden in Kapitel 3 die Prüfungen näher ausgeführt sowie alle Schritte von der Vorbemessung über die Prüfplanung bis zu der Prüfauswertung genau beschrieben.

Die Ergebnisdarstellung und Diskussion erfolgt in Kapitel 4.

In Kapitel 5 soll Eine Zusammenfassung der durchgeführten Prüfungen und daraus gewonnenen Erkenntnisse erfolgen und einen Ausblick auf weitere Forschungsaufgaben beinhalten.

KAPITEL 2: STAND DES WISSENS

2-1 HARTLAUBHOLZ

Es gibt eine große Vielfalt an Laubholzarten und damit verbunden auch eine hohe Bandbreite an Eigenschaften. Die Verarbeitung verschiedener Laubholzarten stellt die Säge- und Holzindustrie vor eine große Herausforderung. Bezogen auf Bauholz spielen Eigenschaften wie Rohdichte, Festigkeitskennwerte, Steifigkeitseigenschaften, Quell- und Schwindverhalten und weitere anatomische Eigenschaften, wie zum Beispiel der Porenaufbau sowie Dauerhaftigkeit, eine wichtige Rolle.

Das Holz der Laub- und Nadelhölzer lässt sich je nach Betrachtungsweise in verschiedene Gruppen unterscheiden: Gemäß der Rohdichte werden Hölzer in Hart- und Weichholzarten eingeteilt. Dabei ist die Grenze nach Mombächer, 1988 [13] durch die Darrdichte bei 550 kg/m^3 gegeben. Gemäß der Holz Anatomie unterscheidet man zudem zwischen Nadel- und Laubholzarten. Der Großteil der heimischen Laubhölzer wird zum Hartholz gezählt.

Eine Unterscheidung innerhalb der Laubhölzer kann aufgrund der Gefäßgröße und -anordnung getroffen werden. Dabei werden ringporige und zerstreutporige Hölzer unterschieden. Hölzer, bei denen die Gefäße gleichmäßig über den Querschnitt verteilt sind, werden als zerstreutporig bezeichnet. Wenn die Gefäße ringförmig konzentriert im Frühholz angeordnet sind, spricht man von ringporigen Hölzern, siehe Holzfachkunde [14].

In dieser Arbeit werden die Laubholzarten Buche und Birke behandelt. Diese Holzarten wurden von den Projektpartnern / Projektpartnerinnen für Mitteleuropa als relevant befunden. Laut der aktuellen Bundeswaldinventur Deutschland [3] ist die Holzart Buche mit $58 \text{ m}^3 / \text{ha}$ im Vergleich zu Fichte mit $111 \text{ m}^3 / \text{ha}$ mit einem hohen Anteil anzutreffen, wodurch Verfügbarkeit gegeben ist. Des Weiteren weisen Hartlaubhölzer im Vergleich zu Nadelhölzern ein höheres mechanisches Potential auf, siehe dazu auch Abschnitt 2-1.5.

Die Rotbuche (*Fagus sylvatica*) zählt mit einer mittleren Rohdichte von 720 kg/m^3 zu den zerstreutporigen Hartlaubhölzern, genauso wie die Birke (*Betula pendula*) mit einer Rohdichte von 650 kg/m^3 , siehe Wagenführ [15].

Beide Holzarten, die Buche sowie die Birke, zählen zu den Kernholzbäumen mit unregelmäßiger Farbkernbildung bzw. mit fakultativer Farbkernbildung. Dabei bildet sich dieser Farbkern bei der Buche mit einer Färbung des Kernholzes mit teils intensiver, unregelmäßiger, auf der Hirnfläche mehrzoniger oder wolkiger, rotbräunlicher Form (Buchenrotkern) ab. Diese Färbung setzt erst ab einem Baumalter von etwa 80 Jahren ein. Es ist ein rein physiologischer Vorgang und eine normale Alterserscheinung, siehe Holz als konstruktiver Baustoff [16]. Bei der Birke ist die Färbung gelblich-weiß, rötlich-weiß bis hellbräunlich mit einem fakultativen Kern, der im Alter entsteht, siehe Wagenführ [15]. Beispielhaft wird in Abbildung 2-1 ein fakultativer Farbkern gezeigt, der sich bei dem verwendeten Birkenholz ausgebildet hat.

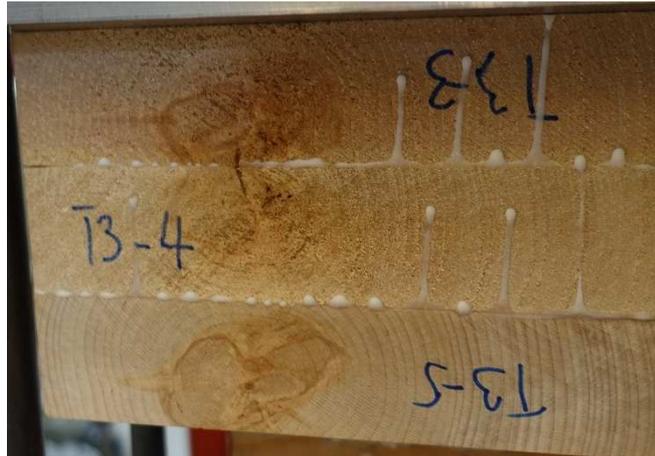


Abbildung 2-1 Darstellung fakultativer Farbkern des verwendeten Birkenholzes

Hübner [17] untersuchte Buchenbretter mit fakultativem Farbkern und stellte dabei keine Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften (Querdruck- und Querkzugfestigkeit) fest. Aicher und Ohnesorge [18] stellten bei ihren 4-Punkt-Biegeprüfungen ebenfalls keinen Einfluss des fakultativen Farbkerns auf die Schubfestigkeit von Buchenbrettschichtholz Biegeträgern fest.

2-1.1 NEIGUNG ZUM SPALTEN

Das Aufspalten von Holz passiert in der Regel zu zwei Zeitpunkten: entweder bei der **Applizierung** der Schraube oder bei der **Belastung**.

Um relevante Kriterien in Bezug auf die Neigung zum Spalten im Zuge des Eindrehvorganges von Schrauben in Holz definieren zu können, werden Untersuchungen von Nägeln zur Ermittlung des erforderlichen Hirnholzabstandes beim Einschlagen unter einem Winkel von 90° zur Faserrichtung herangezogen. Marten (1953) [19], Egner (1953) [20], Ehlbeck und Siebert (1988) [21], Blaß und Schmid (2002) [22] und Schmid (2002) [23] nennen hierzu folgende Einflussfaktoren, welche als wesentlich für die Spaltneigung von Nägeln in Nadelholz gesehen werden:

- Rohdichte und Feuchtigkeit,
- Verbindungsmittelabstände, definiert als Vielfaches des Verbindungsmitteldurchmessers,
- Form der Verbindungsmittelspitze,
- Oberflächenbeschaffenheit und Querschnitt des Verbindungsmittels
- Lage der Nägel zu den Jahringlagen.

Zwar wurden solche Untersuchungen für Laubholzarten nur vereinzelt durchgeführt, jedoch werden die genannten Einflussfaktoren im Wesentlichen auch für Laubholzarten als relevant angesehen.. Dies gilt insbesondere für die Rohdichte: Je höher diese, desto höher die Spaltneigung des Holzes. Diese Erkenntnis ist beim Einbringen der Verbindungsmittel relevant. So wird beispielsweise bei der Ermittlung von Mindestabständen für die jeweiligen ETAs der selbstbohrenden Holzbauschrauben nach EAD 130118-00-0603 [24] eine Mindestrohndichte der Prüfkörper gefordert, die im oberen Bereich der für die Holzart typischen Rohdichtebandbreite liegt.

Um eine effiziente und wirtschaftliche Verbindung herzustellen, ist es von Vorteil, wenn durch Verwendung von selbstbohrenden Schrauben das Holz nicht vorgebohrt werden muss. Bei der Applizierung dieser in Holz entstehen durch den Eindrehvorgang Spaltkräfte, welche aus der Verdrängung des Holzvolumens normal zur Einschraubrichtung von dem Schraubenkern und den Gewindeflanken resultieren. Infolge dieser kommt es zu einer unvermeidbaren lokalen Rissbildung im Bereich des Gewindes, wodurch eine Reduktion des Widerstandes der Verbindung stattfinden kann. Auch wenn nur feine Risse auftreten, können diese unter Belastung zum zusätzlichen Aufspalten des Prüfkörpers führen. Die Rissbildung zwischen den Schrauben kann durch ausreichende Abstände zwischen diesen in Grenzen gehalten werden,

Infolge der Belastung der Schraube kann es ebenso zu einem Aufspalten des Holzes kommen. Enders-Comberg [25] hat im Bezug auf die Krafteinleitung über die Gewindeflanken eine Überlegung angestellt, siehe Abbildung 2-2. Darin wird die Kraft, welche über den Schraubenkopf in den Schaft eingeleitet wird, mittels den Gewindeflanken der Schraube als Druckkraft an das Holz übergeben. Durch die Kraftumlenkung im Holz entstehen Querkraftkräfte. Falls diese die maximal aufnehmbare Querkraftspannung im Holz überschreiten, entstehen Risse entlang der Schraubenreihen in Faserrichtung.

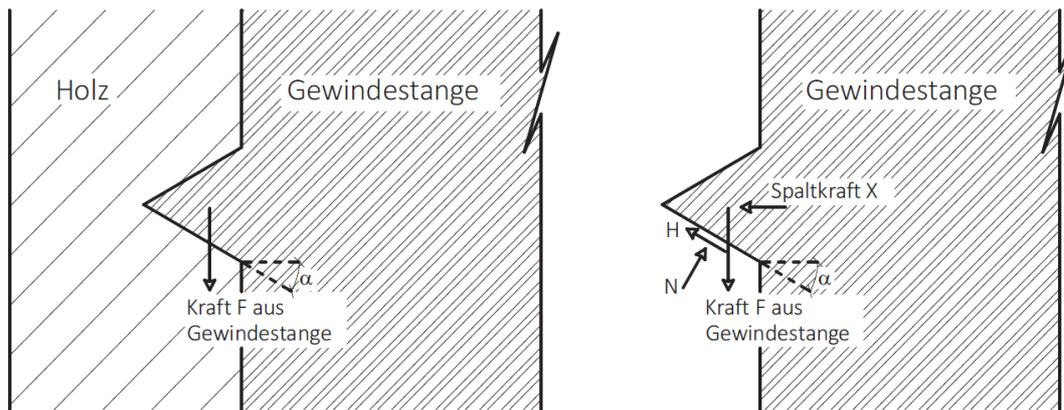


Abbildung 2-2 Zweidimensionale Modellannahme mit den auf die Gewindeflanke wirkenden Kräften (Enders-Comberg [25])

Eine Unterscheidung der Holzarten bezüglich der Spaltneigung kann mittels der Holzstrahlen bzw. der Jahrring- und Zellstruktur getroffen werden. So ist bei Nadelholz vor allem die Jahrring- und Zellstruktur ausschlaggebend, wohingegen bei Laubholz ein maßgebender Einfluss von Holzstrahlen auf die mechanischen Eigenschaften (Steifigkeit, Festigkeit) hinsichtlich der Spaltneigung ausgeht, siehe Burgert et al. [26]. Hartlaubholz weist einen höheren Volumenanteil an Holzstrahlen und eine geringere Homogenität der Holzstruktur im Vergleich zu Nadelholz auf. Dadurch werden die radialen Eigenschaften von den Holzstrahlen beeinflusst. Ein weiterer Einflussfaktor laut Burgert et al. [26] sind innere Wuchsspannungen, die sich durch eine Beanspruchung während des Wachstumsprozesses aufbauen. Dadurch steigert das übermäßig querzugbeanspruchte Holz den Holzstrahlenanteil und es wird diskutiert, dass der Holzstrahlenanteil am stehenden Baum die radiale Festigkeit des Holzes steuert.

Durch Feuchtigkeitsunterschiede können zu inneren Spannungen entstehen. Wenn diese zu groß werden, sind zuerst Entlastungsrisse und auch ein Aufspalten des Holzes möglich.

2-1.2 WUCHSMERKMALE

Wuchsmerkmale sind jene Merkmale, welche die Holznutzung beeinträchtigen können und den Wert des Holzes in den meisten Fällen mindern. Darunter fallen beispielsweise Krümmenschaftigkeit, Abholzigkeit, Drehwuchs, Zwiselwuchs und viele mehr. Diese Merkmale sind besonders für das im Bau verwendete Holz interessant, da mit Grundlage dieser eine Einteilung in Festigkeitsklassen erfolgt.

Beispielsweise können bezogen auf die Ausziehfestigkeit von Schrauben Wuchsmerkmale diese steigern und abschwächen. Beide Fälle sind für axial belastete Schraubengruppen in Hartlaubholz ungünstig. Ein Ast beispielsweise würde die Ausziehfestigkeit erhöhen, wohingegen eine Markröhre im Schraubenkanal die Ausziehfestigkeit mindern würde. Wie bereits in Abschnitt 1-1.3 diskutiert, wirkt sich eine Verschiebung des Widerstandsschwerpunktes negativ auf die Tragfähigkeit aus.

2-1.3 QUELLEN UND SCHWINDEN

Wird dem Holz Feuchtigkeit entzogen, dann schwindet es. Dabei diffundieren Wassermoleküle, die in den Zellwänden eingelagert sind, aus dem Holz heraus und das Holzvolumen verkleinert sich. Bei Befeuchtung des Holzes findet der umgekehrte Prozess statt. Es werden Wassermoleküle in die Zellwände eingelagert. Dadurch vergrößert sich das Volumen der Zellwände und das Holz quillt. Bei zu großem Feuchtegefälle,

z.B. bei der Trocknung, können innere Spannungen erzeugt werden, welche zu Schwindrissen führen können. Die Änderung des Holzvolumens, die durch das Schwinden und Quellen hervorgerufen wird, unterteilt sich aufgrund der orthogonalen Materialstruktur wie bei den mechanischen Kenngrößen auch hier in axiale, radiale und tangential Richtung. Dabei gelten grob die folgenden Verhältnisse für das Schwind- und Quellmaß in axialer (β_a) / radialer (β_r) / tangentialer (β_t) Richtung wie 1/10/20, siehe Holz als Konstruktiver Baustoff [16]. Die Werte für Buche $\beta_a / \beta_r / \beta_t$ sind 0,3 / 5,8 / 11,8 %. Die Werte für Birke $\beta_a / \beta_r / \beta_t$ sind 0,6 / 7,8 / 13,7...14,2 % [15].

2-1.4 ZERLEGUNGSGRAD / LAUBHOLZPRODUKTE

Bei den Untersuchungen dieser Masterarbeit sind unidirektional verklebte Holzbauprodukte von Interesse. Als Ausgangsmaterial dieser Produkte dienen Stämme, aus welchen in weiterer Folge Schnittholz oder Furnier gewonnen wird. Dabei ist die Beschaffenheit, die Dimension des Stammes und die Jahrringlage für die Qualität des Produktes ausschlaggebend.

Festigkeitsklassensysteme und zugeordnete Klassen für Bauholz (Vollholz; für tragende Zwecke) sind in der ON EN 338 [27] für Nadel- und Laubhölzer festgelegt. Dabei werden charakteristische Werte für Festigkeit, Elastizitätskenngrößen und Rohdichte angegeben. Für Laubholz werden die Festigkeitsklassen D18 bis D80 unterschieden.

Der Vorteil in der Herstellung von Brettschichtholz (BSH) und Furnierschichtholz (FSH) im Gegensatz zu Vollholz (VH) liegt darin, dass das Ausgangsmaterial homogenisiert wird. Die Homogenisierung ist bei FSH (viele Lagen) deutlich höher als bei BSH (mehrere Lagen) und umfasst die Rohdichte, die mechanischen Eigenschaften und die Verteilung von Wuchsmerkmalen innerhalb der Produkte. Es findet auch eine Reduktion der inneren Spannungen des Endproduktes statt.

Brettschichtholz (BSH) aus Buche und Buchen-Hybridträger können nach Z-9.1-679 [28] hergestellt werden. Bei der Herstellung von BSH aus Buche werden mindestens drei Lamellen flachseitig miteinander verklebt. Bei der Herstellung der Buchen-Hybridträger bestehen die Decklamellen aus Buchenholz und die Kernlamellen aus Nadelholz. In beiden Fällen sind die Buchenlamellen visuell nach ON Din 4074-5 [29] zu sortieren, wobei die verwendeten Lamellen mindestens aus Sortierklassen LS 10 bzw. LS 13 stammen müssen und zusätzliche Anforderungen an die Ästigkeit und an den Elastizitätsmodul angegeben werden.

Durch die gezielte Anordnung der Bretter im Querschnitt können feuchteabhängige Querspannungen reduziert werden. Dabei zeigen die rechten Seiten der Bretter in dieselbe Richtung, siehe Geklebte Vollholzprodukte [30].

In dieser Masterarbeit wird zudem das Produkt BauBuche von der Firma Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG geprüft. Beispielhaft für die Herstellung von Furnierschichtholz aus Buche wird das technologisierte und wirtschaftliche Herstellverfahren des Produktes Pollmeier BauBuche vorgestellt. Zunächst werden die heißwasserbehandelten Stämme entrindet und geschält, wobei der Stamm während der Bearbeitung rotiert wird und so ein Furnier mittels Schälmaschine mit einer Dicke von 3,5 mm hergestellt wird. Nach Herstellung der Zielfeuchte mittels eines Durchlauftrockners durchlaufen die Furniere eine Furnierlegeanlage. Darin erfolgt der Klebstoffauftrag und das Legen der Furniere in faserparalleler Richtung zu einer Endlosplatte. Anschließend werden die Furniere auf 70 °C vorgewärmt, um danach in einer kontinuierlichen Presse in 30 Minuten mit beizheizten Flächen und unter einem Pressdruck von bis zu 5 N/mm² verklebt zu werden. Die Herstellung der BauBuche GL 75 Träger erfolgt im Anschluss daran. Es werden die 40 mm starken Platten auf Trägerlänge gekappt und auf die benötigte Breite aufgetrennt. Danach werden die Lamellen beidseitig geschliffen und bei einer Temperatur von ca. 45 °C für das Verkleben der Lamellen vorgewärmt. Auf die vorgewärmten Flächen wird der Phenol-Resorzin-Leim aufgetragen. Je nach gewünschter Trägerhöhe werden nun die Lamellen geschichtet und so ein Hochleistungsträger hergestellt. Im letzten Arbeitsschritt werden die Lamellen noch beidseitig geschliffen, siehe Pollmeier [31].

Die Zulassung für das Produkt Pollmeier BauBuche Träger GL70 wurde zuerst in Z-9.1-837:2013 Brettschichtholz aus Buchen Furnierschichtholz [32] herausgegeben. Diese wurde 2015 durch die ETA-14/0354:2015 für BauBuche Träger GL75 abgelöst. Die aktuelle Version ist die ETA-14/0354:2018 [33].

2-1.5 GEGENÜBERSTELLUNG MATERIALPARAMETER VON LAUB- UND NADELHOLZ

Aus der höheren Rohdichte resultiert auch eine höhere Festigkeit und Steifigkeit von Laubholz im Gegensatz zu Nadelholz. Das bedeutet, dass bei gleichem Querschnitt das Hartlaubholz i.d.R. höheren Beanspruchungen standhalten kann. Beispielhaft sind in Tabelle 2-1 einige wichtige charakteristische Materialparameter eingetragen. Bezogen auf die charakteristische Zugfestigkeit in Faserrichtung ist Buche mit dem Faktor 2 höher als Fichte. Der Vergleich von Birke und Buche zeigt, dass Birke um den Faktor 1,35 höher liegt.

Die charakteristische Zugfestigkeit in Faserrichtung eines Brettschichtholzträgers aus Buche (GL 48h) [34] verglichen mit Fichte (GL24h) [35] weist in etwa einen um den Faktor zwei höheren Wert auf. Die Brettschichtholzträger aus Birke [36] weisen einen um den Faktor 1,4 höheren Wert bezogen auf die charakteristische Zugfestigkeit in Faserrichtung auf. Jedoch steigt auch mit der Festigkeit die Rohdichte des Brettschichtholzträgers aus Birke um den Faktor 1,4 im Vergleich mit Fichte an. Bei Brettschichtholzträgern aus Buche ist der Rohdichteanstieg noch etwas höher und steigt im Vergleich mit Fichte um den Faktor 1,5 an. So werden durch die höheren mechanischen Eigenschaften zwar schlankere Querschnitte erreicht, jedoch kann dabei nicht immer von einer Reduktion des Eigengewichtes der Konstruktion auszugehen.

Tabelle 2-1 Vergleich Materialeigenschaften Fichte GL24h, Buche BSH GL 48c / GL48h und Birke BSH

| Holzart | [Einheit] | Fichte (GL24h) | BU (GL 48h) | BI [36] |
|---------------------------|----------------------|----------------|-------------|------------|
| $E_{0,mean}$ | [N/mm ²] | 11500 [35] | 15400 [34] | 15000 [36] |
| Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ | [N/mm ²] | 19,2 [35] | 38,4 [34] | 26 [36] |
| Schubfestigkeit $f_{v,k}$ | [N/mm ²] | 3,5 [35] | 6,0 [34] | 4,5 [36] |
| Rohdichte ρ_{mean} | [kg/m ³] | 460 [35] | 690 [34] | 600 [36] |

Durch die hohen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften ermöglicht auch die BauBuche eine schlankere Ausführung der Bauteile als vergleichsweise eine Ausführung in Nadelholz. Die Konstruktionen in BauBuche und in herkömmlichen Nadelholz befinden sich laut Herstellerangaben auf dem gleichen Preisniveau. So spart ein BauBuche Träger GL75 der Firma Pollmeier Massivholz GmbH & Co. KG 48 % seines Volumens ein im Vergleich mit einem Vollholzträger der Festigkeitsklasse C24 nach ON EN 338 [27] bezogen auf die Schubfestigkeit f_v , siehe Pollmeier [37].

2-2 HOLZBAUSCHRAUBEN FÜR HARTLAUBHOLZ

In Bezug auf die Anwendung von Schrauben in Hartlaubholz ist es von Interesse, ob die Schrauben vorgebohrt werden müssen oder nicht. Generell können Schrauben für Nadelholz auch für Laubholz verwendet werden, jedoch ist laut Eurocode 5 [1] bei Applikation dieser in Laubholzbauprodukten vorzubohren. Die Vorbohrung soll dabei im Bereich des Schaftes den gleichen Durchmesser wie der Schaft aufweisen und im Bereich des Gewindeteiles 70% des Schaftdurchmessers aufweisen. Diese Regelungen gelten für Schrauben mit einem Durchmesser größer als 6 mm. Dabei ist ersichtlich, dass ein erheblicher Aufwand für das Vorbohren einer Schraubengruppe entsteht.

Infolge der höheren Rohdichte von Hartlaubholz ist der Einschraubwiderstand, welcher beim Eindrehen auf die Schraube wirkt, wesentlich höher als bei Nadelholz und kann bereits beim Eindrehen zum Versagen der Schraube führen. Aus der höheren Rohdichte resultiert auch eine höhere Ausziehfestigkeit f_{ax} , wodurch bereits bei geringen Einschraubtiefen die Stahlzugtragfähigkeit erreicht wird. So wird bei einer

Einschraubtiefe von $6d$ und einem Schraubendurchmesser von 8 mm mit der Berechnung des Ausziehwiiderstandes nach Brandner et. al. [38] bereits ein Ausziehwiiderstand $F_{ax,mean} = 18,5$ kN bei Buchenholz erreicht.

Um das Applizieren von Schrauben in Hartlaubholz ohne vorzubohren zu ermöglichen, wurde von der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH, die in dieser Arbeit verwendete RAPID® Hardwood [39] entwickelt. Diese ist in der 2017 herausgegebenen ETA-12/0373 [39] angeführt. Die darin enthaltene Ausführung besitzt einen Nenndurchmesser von 8 mm und kann in Furnierschichtholz aus Buche oder ähnlichen Produkten aus Laubholz ohne Vorbohren eingebracht werden. Als Unterschied zu herkömmlichen Nadelholzschrauben werden ein Schaftfräser, eine verbesserte Verdichterspitze und ein höherer Kerndurchmesser angeführt. Dadurch wird eine höhere Zugtragfähigkeit der Schraube erreicht.

Schrauben zur Anwendung in Hartlaubholz, welche ohne vorzubohren eingebracht werden können, finden sich auch in Technischen Bewertungen anderer Hersteller, wie z. B. Würth Handelsges.m.b.H. und SPAX International GmbH & Co. KG.

2-3 QUERANSCHLÜSSE MIT SCHRAUBENGRUPPEN

2-3.1 NORMATIVE REGELUNGEN FÜR HARTLAUBHOLZ

Normative Regelungen für Verbindungen mit axial beanspruchten Holzschrauben sind u.a. im Eurocode 5 [1] zu finden. Dabei sind die folgenden Nachweise zu führen:

- Ausziehversagen,
- Kopfabreißen,
- Durchziehversagen,
- Abreißen der Schraube auf Zug,
- Knickversagen,
- Scherversagen entlang des Umfanges einer Gruppe von Schrauben (Blockscherversagen).

Dabei sind die Werte für Hartlaubholzarten für die Ausziehfestigkeit $f_{ax,k}$ und den Durchziehparameter $f_{head,k}$, den diversen ETAs angegeben.

Der Blockschernachweis wird in der Norm nur textlich unter dem Punkt Scherversagen erwähnt. Es ist jedoch kein entsprechendes Format zur Nachweisführung angeführt

Geometrie

Für die Bestimmung geometrischer Parameter in Hartlaubholz wurden vorab Abstände und Einschraubtiefen auf der Grundlage bisheriger Untersuchungen, wie in Abschnitt 2-3.3 dargelegt, normativer Regelungen nach Eurocode 5 [1] und unter Berücksichtigung zahlreicher Erkenntnisse aus Nadelholz Fichte festgelegt. Während der Prüfungen im Rahmen dieser Masterarbeit wurden die Ergebnisse laufend analysiert und nach Bedarf das Setting geändert bzw. nachjustiert, um im Sinne eines schrittweisen Annäherns den gewünschten Versagensmechanismus einzustellen.

Für axial belastete Schrauben werden im Eurocode 5 [1] die Abstände zwischen den Schrauben, von Schraube zum Rand ($a_{2,CG}$) und von Schraube zum Hirnholz ($a_{1,CG}$) beschrieben. Dabei gibt es für die Schraubenabstände die Unterteilung in Faserrichtung (a_1) und quer zur Faserrichtung (a_2). Laut Norm sind die Mindestabstände wie folgt festgelegt: $a_1 / a_2 / a_{1,CG} / a_{2,CG} = 7d / 5d / 10d / 4d$. Die Mindestabstände sind in Abbildung 2-3 dargestellt. Die minimale Einbindetiefe des Schraubengewindes auf der Seite der Schraubenspitze soll mindestens $6d$ betragen.

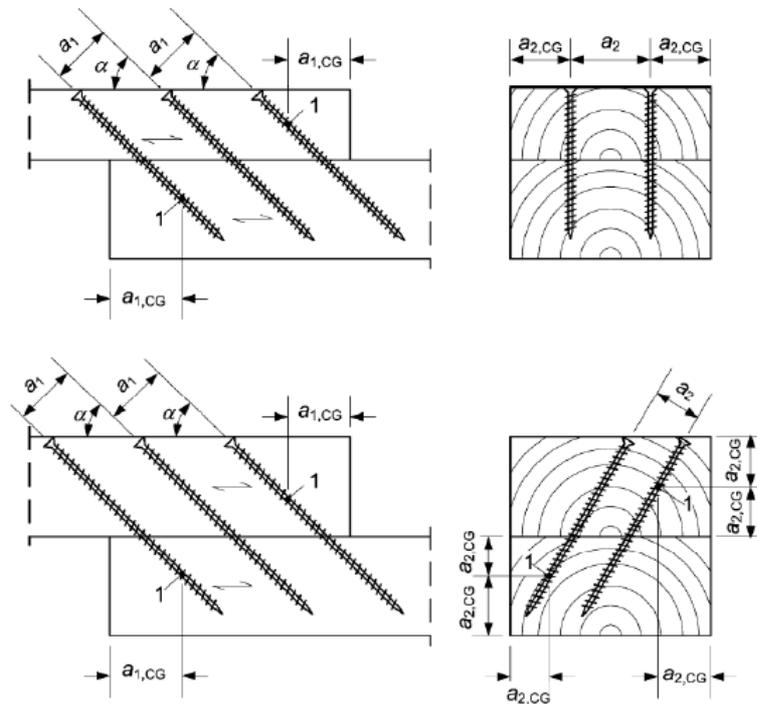


Abbildung 2-3 Graphische Darstellung der geometrischen Parameter im Eurocode 5 [1]

In Zulassungen wie z.B. ETA-12-0373 [39] werden auch Anforderungen an die Schraubenabstände gefordert, jedoch sind diese geringer als im Eurocode 5 [1]. Dabei werden die Abstände $a_1 / a_2 / a_{1,CG} / a_{2,CG} = 5 d / 5 d / 5 d / 4 d$ unter der Voraussetzung der axialen Belastung der Schrauben und einer Mindestholzdicke von $t = 12 d$ angegeben. Weiters kann der Abstand der Schrauben quer zur Faserrichtung auf $a_2 = 2,5 d$ ($3,5 d$) unter der Einhaltung des Produktes $a_2 \times a_2 \geq 25 d^2$ ($21 d^2$) reduziert werden.

2-3.2 VERSAGENSMECHANISMEN

Da in dieser Arbeit die Versagensmechanismen eine zentrale Rolle spielen, wird in diesem Kapitel darauf eingegangen. Es werden nur jene Versagensformen erläutert, die für axial auf Zug beanspruchte Verbindungen unter einem Winkel von $\alpha = 90^\circ$ relevant sind. Für das Versagen der Einzelschraube ist Aufspalten bei zu geringem Vorholz, Ausziehversagen und Schraubenbruch relevant. Bei den Prüfungen der Schraubenreihe kann zusätzlich ein Aufspalten zwischen den Schrauben und Reihenscheren auftreten. Bei Schraubengruppen sind zudem die Versagensmechanismen Aufspalten aufgrund der Querkzugbeanspruchung und Blockscheren zu berücksichtigen.

Aufspalten

Wie bereits in Abschnitt 2-1.1 näher ausgeführt, kann Aufspalten des Holzes durch die Applikation einer Schraube oder durch die Belastung einer Schraube hervorgerufen werden. Die Bilder in Abbildung 2-4 zeigen das Aufspalten des Holzes infolge einer Belastung.

Das Querkzugversagen eines Trägers durch die Belastung aus dem Queranschluss wird auch als Aufspalten des Trägers bezeichnet. Dabei liegt die Versagensebene normal zur Schraubenachse. Dieses Versagen wird hier in einem eigenen Punkt *Querkzugversagen* beschrieben.

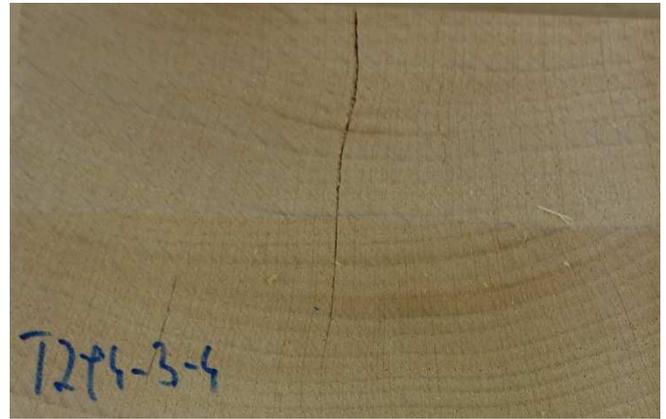


Abbildung 2-4 *Aufspalten bei Beanspruchung, Draufsicht (links) und Querschnitt eines Prüfkörpers mit mittigem Spaltriss (rechts)*

Stahlbruch

Wenn Schrauben mit ausreichender Gewindelänge im Holz eingedreht werden, ist der Widerstand auf Herausziehen größer als die Zugfestigkeit der Schraube und es kommt zum Bruch der Schraube.

In der Regel ist die Bruchstelle bei Schraubenbruch im Gewindeteil, da ein geringerer Querschnitt als im Schaft der Schraube vorhanden ist.

Die Stahlzugfestigkeit innerhalb einer Charge Schrauben weist meist eine sehr geringe Streuung auf und lässt sich somit für die Einzelschraube sehr gut vorhersagen. Selbstbohrende Holzbauschrauben werden gehärtet, um eine hohe Stahlzugfestigkeit zu erreichen. Dadurch ist eine geringe Duktilität der Verbindung vorhanden und es entsteht ein, im Vergleich zu lateral beanspruchten und schlanken Verbindungsmitteln, sprödes Versagensverhalten.

Für die Gruppe bedeutet eine geringere Duktilität ein geringeres Umlagerungsvermögen zwischen den einzelnen Schrauben beim Erreichen ihres Tragwiderstandes. Voraussetzung für das Erreichen der maximalen Traglast in der Gruppe ist, eine gleichmäßige Lastverteilung der Schrauben durch geeignete Maßnahmen sicherzustellen. Dies benötigt zum einen ein gleichmäßiges Anziehen und somit Vorspannen der Schrauben und zum anderen eine steife Ausführung der Stahlanschlussteile.

Lokale Holzmerkmale (z.B. Verankerung der Schraube in Ast) haben zusätzlich Einfluss auf die ungleichmäßige Lastverteilung. Dieser Einfluss kann aber nur bedingt gesteuert werden.

Wenn die Voraussetzungen für eine gleichmäßige Beanspruchung aller Schrauben nicht gegeben ist, kommt es zur Reduktion des Widerstandes bezogen auf den n -fachen Widerstand der Schraube.

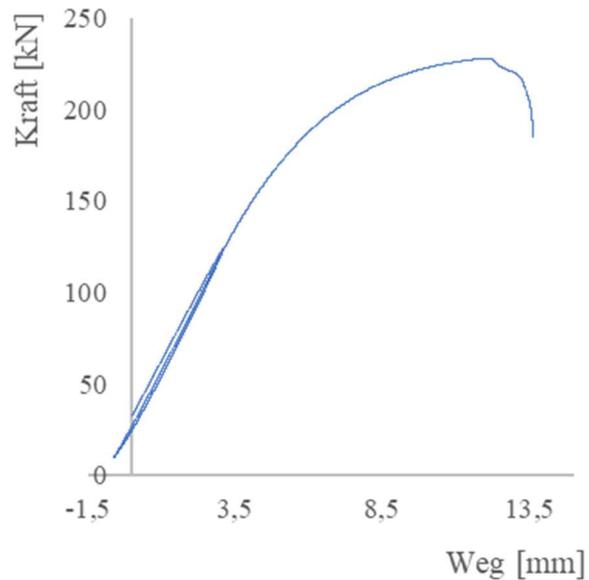
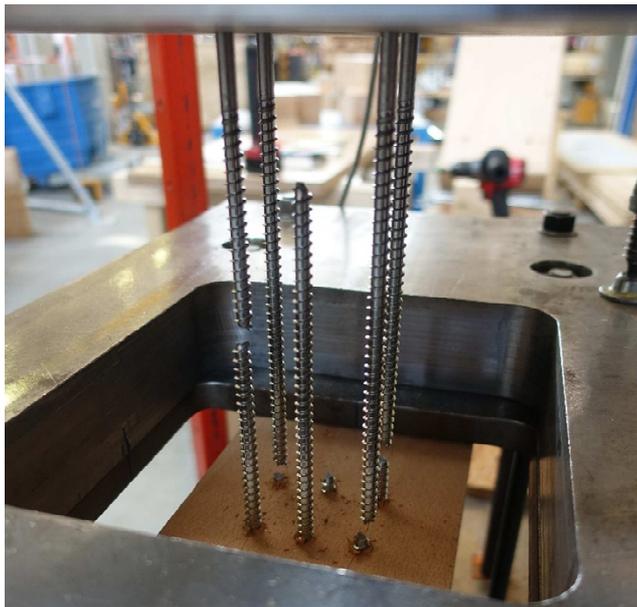


Abbildung 2-5 Schraubenbruch durch Überschreitung der Stahlzugfestigkeit (links) und typisches Kraft-Wegdiagramm (Serie 5/2) (rechts), BSH-Buche

Ausziehversagen

Beim Ausziehversagen werden die Holzfasern zwischen den Gewindegängen der Schraube abgesichert und die Schraube aus dem Holz herausgezogen. Bei ausreichendem Holzvolumen kann auch für die Gruppe ein Ausziehversagen erreicht werden. Im Idealfall entspricht der Widerstand der n -fachen Ausziehtragfähigkeit der Einzelschraube. Bei zu geringen Schraubenabständen in und quer zur Faser oder ungleichmäßiger Beanspruchung der Gruppe kann zwar Ausziehversagen erreicht werden, jedoch mit reduziertem Widerstand.

Da sich die Schraube im Bereich der Tragfähigkeit wenig duktil verhält, ist in der Gruppe nur zu einem geringen Ausmaß eine Umlagerungsfähigkeit vorhanden. Deshalb streut die Traglast bei Gruppenprüfungen i.d.R. weniger als bei der Einzelschraube. Bei reinem Ausziehversagen sind zwischen den Schrauben und im Bereich der Schraubenspitzen keine Risse im Holz sichtbar.

Hübner [17] berechnet die Spannungsverteilung in Abhängigkeit des Rotationswinkels um die Schraubenachse. Dabei geht er von orthotropen Materialeigenschaften mit einem Verhältnis der Schubfestigkeit in der radial-tangential Ebene $f_{v,RT}$ zu jener der radial-longitudinal Ebene $f_{v,RL}$ von etwa 6:1 aus. Daraus resultiert bei einem Winkel von $\alpha = 90^\circ$ zur Faserrichtung eine schmetterlingsartige Form der Schubfestigkeitsverteilung. Aus der Relation der Festigkeitseigenschaften in und quer zur Faserrichtung schließt Hübner [17] auf das Verhältnis der erforderlichen Mindestabstände a_1 und a_2 , die somit als benötigte Fläche für Ausziehversagen verstanden werden können.

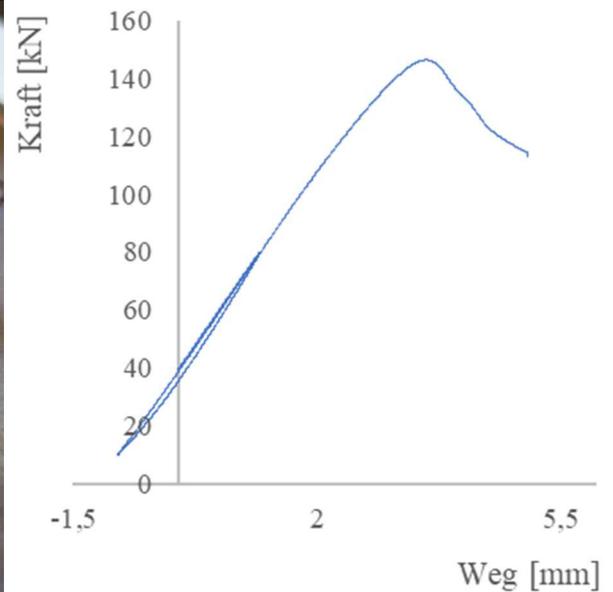
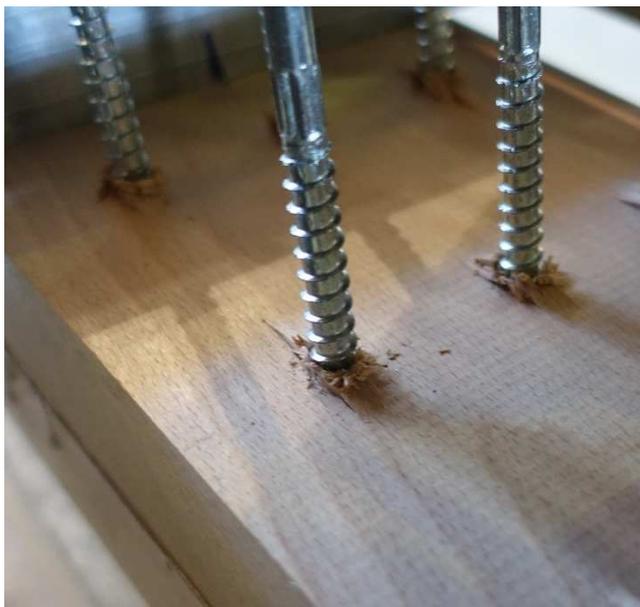


Abbildung 2-6 Ausziehversagen (links) und typisches Kraft-Wegdiagramm (Serie 1/3) (rechts), BSH-Buche

Reihenscheren

Dieser Versagensmechanismus kann auftreten, wenn mindestens zwei Schrauben hintereinander in Faserrichtung angeordnet werden. Bei der Lastabtragung kommt es bei geringen Abständen zwischen den Schrauben a_1 zum Überschreiten der Rollschubfestigkeit entlang der beiden Flächen parallel zur Faserrichtung und unmittelbar angrenzend an die Schraubenreihe. Die herausgescherte Holzscheibe hat dabei etwa die Dicke des Schraubendurchmessers d , die Länge der zwischen den benachbarten Schrauben eingeschlossenen Fasern und die Tiefe der Einbindelänge l_p bzw. kann auch nur ein oberer Teil dieses Volumens mitausgezogen werden.

Blaß und Flaig [11] meinen hierzu, dass es sich dabei um ein Kombinationsversagen aus Ausziehen und Rollschub handelt.

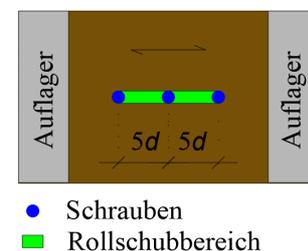


Abbildung 2-7 Versagensmechanismus Reihenscheren: bei $3 \times 1 R5d$ (links), Prüfkfiguration dazu mit Rollschubbereich (rechts)

Querzugversagen

Bei Queranschlüssen mit einem Winkel von $\alpha = 90^\circ$ zur Faserrichtung können in Abhängigkeit von der Ausführung bzw. der Lage des Schwerpunktes der Verbindung hohe lokale Querzug- und Schubbeanspruchungen im Träger entstehen.

Bei diesem Versagen bildet sich ein Riss im Holz normal zur Schraubenachse knapp oberhalb der Schraubenspitzen aus, welcher nach der äußeren Schraubenreihe zum Trägerrand hin weiter verläuft. Häufig verlaufen außerhalb der Gruppe diese Risse in radialer Richtung und bzw. oder entlang der Jahrringe bzw. Jahrringgrenzen. Diese Risse enden entweder im Holz oder gehen bis an die Oberfläche weiter und führen somit zum Querzugversagen des Prüfkörpers.

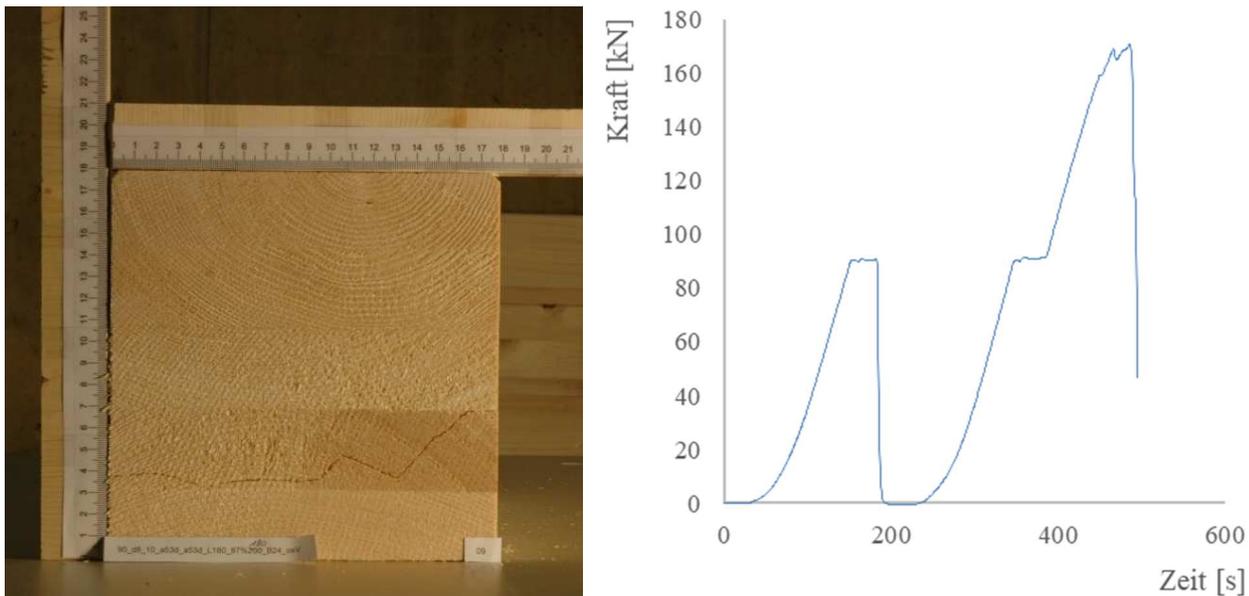


Abbildung 2-8 *Querzugversagen (links) und typisches Kraft-Zeitdiagramm (rechts), BSH Fichte; aus Mahlknecht und Brandner [40]*

Blockscheren

Das Blockscheren setzt sich aus dem Querzugversagen, dem Rollschubversagen und dem Schubversagen des Holzes zusammen. Dabei versagen die Fläche normal zur Schraubenachse knapp oberhalb der Schraubenspitze auf Querzug und die Flächen in Faserrichtung der äußeren Schraubenreihen auf Rollschub. Normal zur Faserrichtung können die Fasern an der Fläche der äußeren Schraubenreihen auf Schub ihre maximale Tragfähigkeit erreichen. Diese gedanklichen Flächen können bei Laststeigerung sukzessive versagen, wobei auch ein Anstieg des Widerstandes nach dem Versagen einer Fläche möglich ist. Das Blockschermodell nach Mahlknecht und Brandner [10] wird in Abschnitt 2-3.3 näher erläutert.

Das Rissbild ergibt sich im Querschnitt, siehe Abbildung 2-9, durch zwei vertikale Risse entlang der äußeren Schraubenreihen bis auf Höhe der Schraubenspitze. Diese können in Faserrichtung über den Umfang der Schraubengruppe hinausreichen. Der horizontale Riss knapp oberhalb der Schraubenspitze wird durch die äußeren Schraubenreihen seitlich begrenzt. Das Abscheren der Fasern normal zur Faserrichtung an den äußeren Schrauben ist mehr theoretischer Natur. Der Riss auf Höhe der Schraubenspitzen kommt einem Schubversagen zuvor.

Generell weist das Rissbild auf die Lastausbreitung im Querschnitt hin. Es zeichnet sich ab, dass der Holzblock, welcher sich im Umfang der Gruppe und zwischen den beschriebenen Flächen befindet, herausgeschert wird, wobei hierbei, im Gegensatz zum Blockscheren lateral beanspruchter Verbindungen, nur geringe Verformungen zu verzeichnen sind. Das Blockscheren tritt insbesondere auf, wenn die Gruppe der Schrauben auf einen Teil des Querschnitts konzentriert angeordnet wird, siehe Abbildung 2-9. Wenn

die Schrauben ausreichend über die Querschnittsbreite verteilt sind und dennoch geringe Abstände zwischen den Schrauben gegeben sind, wird das Querkzugversagen maßgebend.

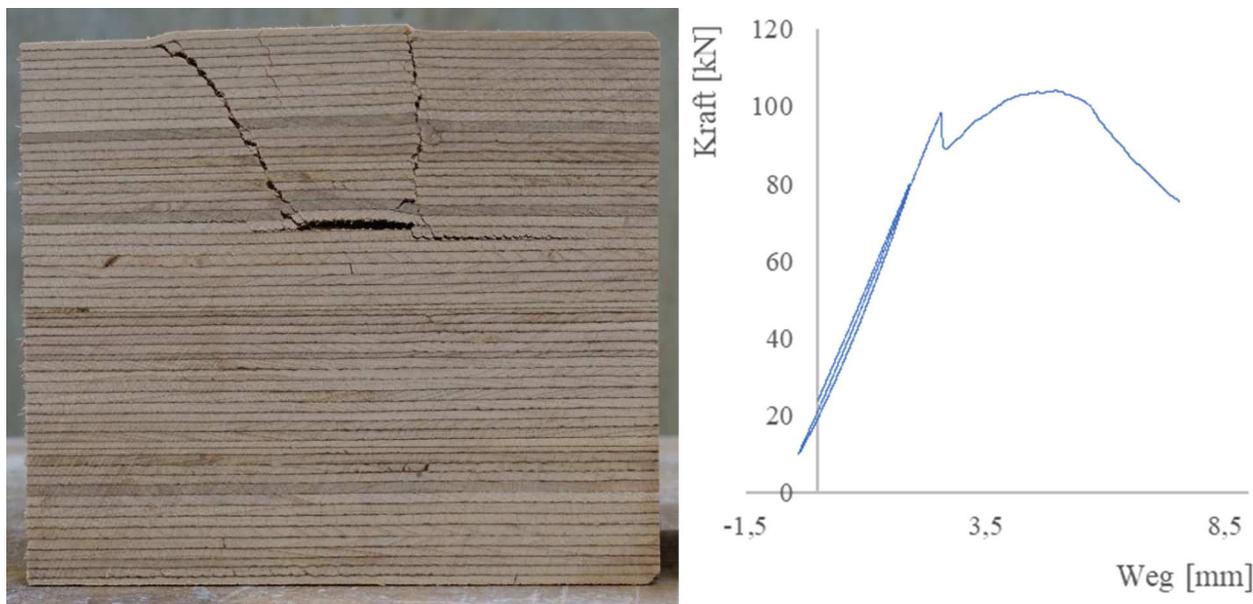


Abbildung 2-9 *Blockscherversagen (links) und typisches Last-Verformungsdiagramm (Serie 19/4) (rechts), BauBuche*

Treten beispielsweise Risse entlang jeder Schraubenreihe in Faserrichtung auf oder reicht der Querkzugriss über die Schraubengruppe hinaus, so kündigt sich ein Übergang zu anderen Versagensmechanismen an, wie Querkzugversagen, Reihenscheren oder Ausziehversagen.

2-3.3 ALLGEMEINE ERKENNTNISSE AUS DER LITERATUR

Da Erkenntnisse zu Queranschlüssen mit axial beanspruchten Schraubengruppen nur von Arbeiten mit Fichtenholz (*Picea abies*) bekannt sind, wird in diesem Kapitel auf diese eingegangen.

Masterarbeit Plieschounig [7]

In der Masterarbeit von Plieschounig [7] wurden Untersuchungen zum Tragverhalten von axial beanspruchten Schraubengruppen in Vollholz aus Fichte durchgeführt. Dafür wurde eine push-pull Prüfkonfiguration entwickelt, die letztendlich auch für diese Arbeit verwendet und im Kapitel 3-3.1 genauer erläutert wird.

Dabei wurde speziell bei der Gruppenwirkung der selbstbohrenden Holzschrauben mit einem Durchmesser von $d = 6$ mm und $l_{ef} = 11.5 d$ auf die effektiv wirksame Verbindungsmittelanzahl bei Ausziehversagen geachtet. Vorab wurden über Einzelschrauben und Schraubenpaare Referenzwerte erarbeitet und die Abstände parallel und normal zur Faserrichtung untersucht. Ab einem Abstand von $a_1 = 7 d$ in Faserrichtung und einem Abstand von $a_2 = 5 d$ quer zur Faserrichtung wurde für das Schraubenpaar der volle Auszieh Widerstand im Vergleich mit der Einzelschraube erreicht. In Folge wurden quadratische Schraubengruppen mit 4, 9, 16 und 25 Schrauben und einem Abstand von $a_1 = a_2 = 5 d$ untereinander untersucht. Plieschounig [7] beobachtete mit zunehmender Gruppengröße Blockscherversagen. Für jene Prüfungen mit Ausziehversagen in den Gruppen $n = 4$ und $n = 9$, wurde die effektiv wirksame Verbindungsmittelanzahl auf charakteristischem Niveau (5 %-Quantilwerte) $n_{ef,05} \geq 0,9 n$ für geeignet befunden.

Plieschounig [7] stellte ein Modell vor, welches den für Ausziehversagen erforderlichen faserparallelen Mindestabstand berechnen kann. Dabei wurden aktivierbare Widerstände in einer Formel

zusammengefasst. Jede Außenhälfte der Schraube trägt über Abscheren in Faserlängsrichtung (Herausziehen). Der Bereich zwischen dem Schraubenpaar entspricht dem Volumen der durchgetrennten Fasern. Dieser überträgt einen Teil der Kraft über Rollschub an das seitliche Holz. In Abbildung 2-10 sind die Flächen dargestellt. Da beide Anteile parallel wirken, ziehen sie proportional ihrer Steifigkeit Lasten an.

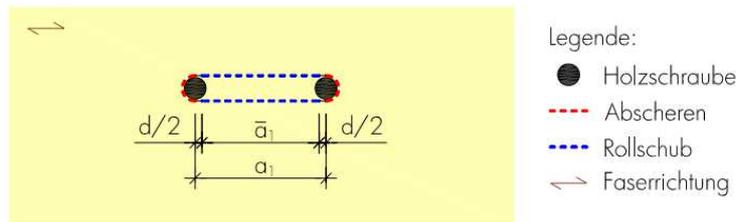


Abbildung 2-10 Skizze der lastabtragenden Flächen bei einem Schraubenpaar, Plieschounig [7]

Die daraus resultierende Formel für den Ausziehwiiderstand einer Schraubenreihe ist in Gleichung (2.1) angeführt.

$$F_{ax,r} = f_{v,r} 2 l_{ef} (r - 1) (a_1 - d) + f_{ax} d \pi l_{ef} \quad (2.1)$$

Dabei sind:

- $F_{ax,r}$ der Widerstand der Reihe [N]
- $f_{v,r}$ die Rollschubfestigkeit des Holzes in [N/mm²]
- l_{ef} die Einschraubtiefe rechtwinklig zur Faserrichtung in [mm]
- r die Anzahl der Schrauben in Faserrichtung
- \bar{a}_1 der faserparallele, freie Innenabstand zwischen zwei benachbarten Schrauben in [mm]
- f_{ax} die axiale Ausziehfestigkeit der Holzschraube in [N/mm²]
- d der Nenndurchmesser der Schraube in [mm]

Blaß und Flaig [11] schlagen 2019 ein Modell für eine Reihe mit r Schrauben vor. Dabei berücksichtigen sie ebenso wie Plieschounig in Gleichung (2.1) den halben Ausziehwiiderstand der beiden äußeren Schrauben und den Rollschubwiderstand entlang der ganzen Scherfläche zwischen den Achsen der beiden äußeren Schrauben, wie in Gleichung (2.3), mit dem Unterschied, dass anstatt des freien Innenabstandes zwischen den Schrauben \bar{a}_1 der Achsabstand a_1 verwendet wird. Weiters wird eine konstante Spannungsverteilung entlang der effektiven Einschraublänge l_{ef} angenommen. Die Untersuchungen wurden mit eingeklebten Stahlstäben in Furnierschichtholz aus Buche mit 90° zur Faserrichtung durchgeführt.

$$F_{90,R} = 2 (r - 1) f_{v,r} l_{ef} a_1 + f_{ax} \pi l_{ef} d \quad (2.2)$$

Weitere Untersuchungen am Institut für Holzbau und Holztechnologie

Die Beobachtungen von Plieschounig [7] führten zu weiteren Untersuchungen zum Blockscher-, Auszieh- und Stahlversagen in der Gruppe von axial auf Zug beanspruchten Schrauben, siehe Mahlknecht 2011 [8], Mahlknecht und Brandner 2013 [40], Mahlknecht et al. 2013 [9], Mahlknecht et al. 2016 [41] und Mahlknecht und Brandner 2019 [10]. Die Erkenntnisse aus diesen Arbeiten werden im Folgenden zusammengefasst:

Es wurden Erkenntnisse zum Widerstand und den Versagensmechanismen von axial beanspruchten Schraubengruppen in Vollholz (C24 nach ON EN 338 [27]) und Brettschichtholz GL 24h nach ON EN 14080 [35] jeweils aus Fichte unter einem Winkel 90° zur Faser gewonnen. Die variierenden Parameter waren der Durchmesser $d = 6$ und 8 mm, die Schraubenanzahl n mit bis zu 25 Schrauben, die Abstände a_1

und a_2 und die Längenparameter l_{ef} und l_{emb} . Es wurden die Versagensmechanismen Herausziehen, Schraubenbruch und Blockscheren beobachtet.

Die Betrachtung der Ergebnisse bezüglich Ausziehversagen und Schraubenbruch ergibt, dass die Regelung bezüglich n_{ef} im Eurocode 5 [1] konservativ ist, stets unter der Voraussetzung der gleichmäßigen Beanspruchung.

Das Versagen auf Herausziehen wurde nur mit den Verbindungsmittelabständen von $a_1 \geq 7,5 d$ und $a_2 \geq 7 d$ bei gleichzeitig nicht mehr als drei in Faserrichtung hintereinander angeordneten Schrauben, $r \leq 3$, beobachtet. In diversen ETAs werden häufig Regelungen für die Mindestabstände der Verbindungsmittel mit $a_1 a_2 = 25 d^2$ mit $a_1 \geq 5 d$ und $a_2 \geq 3,5 d$ angegeben. Diese wurden für das Stahlversagen in der Gruppe bestätigt. Es wurde bei dem Stahlversagen in der Gruppe eine Tragfähigkeit zwischen 90% und 100% der Einzelschraube ($n_{ef} \geq 0,9 n$) erreicht.

Um Schraubenbruch als Versagensmechanismus sicherzustellen, wird zusätzlich zur Einhaltung der Mindestabstände und der erforderlichen Einschraubtiefe für Schraubenbruch empfohlen, den Schwerpunkt des Kraftverlaufes im Holz mindestens bis zur Trägerachse zu bringen und dadurch Holzversagen auszuschließen.

Im Fall von Blockscherversagen wurde ein geringerer Widerstand als bei Ausziehversagen und Schraubenbruch beobachtet. Das Blockscherversagen wurde auch bei geneigt angeordneten Schraubengruppen, $\alpha = 45^\circ$ in Brettschichtholz und in Brettsperrholz bei einem Winkel von $\alpha = 90^\circ$ beobachtet. Das Versagen auf Herausziehen wurde in Brettsperrholz analog zu den Untersuchungen in Vollholz und Brettschichtholz nur mit den Abständen $a_1 = 7,5 d$ und $a_2 = 7 d$ beobachtet.

Mit den Ergebnissen aus diesen Prüfungen wurde ein Blockschermodell für axial und unter einem Winkel von 90° zur Faser beanspruchte Schraubengruppen entwickelt, welches in der Arbeit von Mahlkecht und Brandner [10] genauer erklärt wird.

Eine weitere wesentliche Erkenntnis ist, dass durch die alleinige Angabe von Mindestabständen zwischen den Schrauben, zum Rand- und zum Hirnholz, das Blockscherversagen nicht ausgeschlossen werden kann. Die zusätzliche Betrachtung der dritten Dimension, der Einschraublänge, ist erforderlich.

Blockschermodell nach Mahlkecht und Brandner [10]

Diese Arbeit setzt sich mit dem Versagensmodus Blockscheren und der damit verbundenen Tragfähigkeit des Anschlusses bzw. des Bauteils im Bereich des Anschlusses auseinander. Als Grundlage für das Modell dienen die Arbeiten im vorherigen Abschnitt: Weitere Untersuchungen am Institut für Holzbau und Holztechnologie.

Das Modell charakterisiert das Versagen und berechnet das Lastniveau. Das Modell beschreibt eine zutreffende Vorhersage aller getesteten Serien betreffend deren Lastniveau, der Versagensart und der Versagensreihenfolge. Das Modell berücksichtigt zusätzlich als dritte Dimension die Einbindelänge der Schrauben und die Anzahl der Schrauben in der Gruppe.

Das Modell basiert auf einem System von parallel wirkenden, linear-elastischen Federn. Dabei gibt es für jede Lastabtragungsfläche eine Steifigkeit. Die Fläche normal zur Faserrichtung $A_{s,s}$ erfährt Schubbeanspruchung, die Fläche $A_{r,s}$ parallel zur Faser erfährt Rollschubbeanspruchung und die Fläche $A_{t,90}$ erfährt eine Querkzugbeanspruchung. Die Anteile der Begrenzungsflächen des Gruppenvolumens $A_{s,s}$ und $A_{r,s}$ fließen jeweils als eine Federsteifigkeit über die Schubverformung der seitlichen angrenzenden Volumen $A_{t,s} \cdot l_p$ und $A_{t,r} \cdot l_p$ in die Berechnung ein. Die Steifigkeit der mit Querkzug beanspruchten Fläche $A_{t,90}$ wird aus der Volumendehnung in Richtung der Schrauben ermittelt. Die geometrischen Parameter sind in Abbildung 2-11 beschrieben.

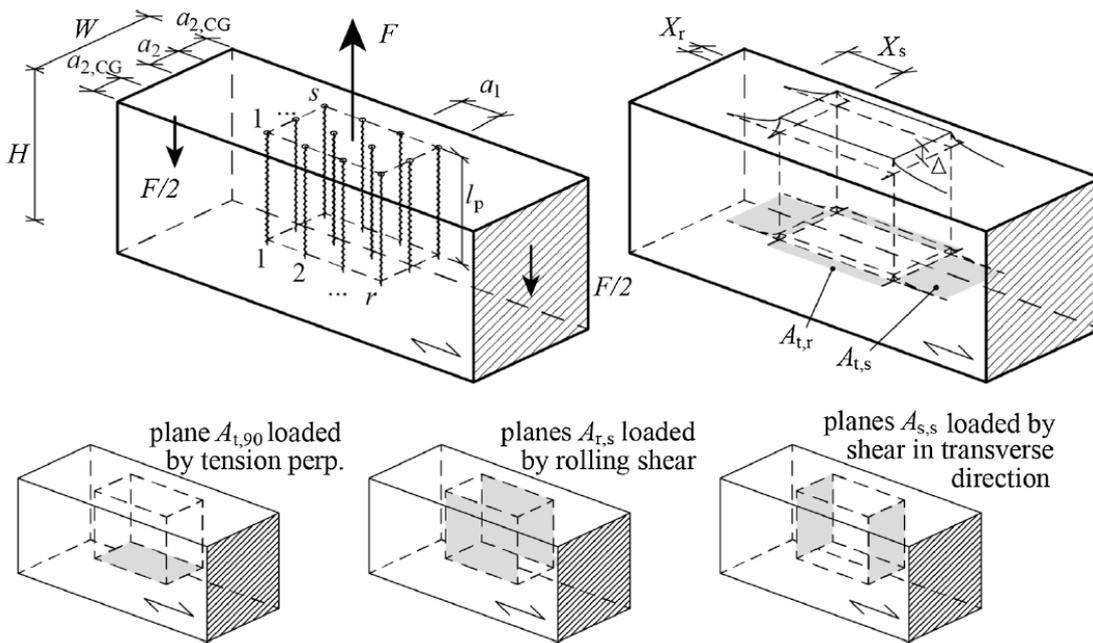


Abbildung 2-11 Kenngrößen zum Blockschermodell nach Mahlkecht und Brandner [10]

Dabei sind in den folgenden Formeln:

- F_{max} der maximale Widerstand der Verbindung [kN],
- $K_{t,90}$ die Steifigkeit der Querzugfläche [N/mm²],
- K_S die Steifigkeit der Schubfläche [N/mm²],
- K_r die Steifigkeit der Rollschubfläche [N/mm²],
- K_j die Gesamtsteifigkeit des Blockschervolumens und der Verbindung [N/mm²],
- $\varepsilon_{f,(i)}$ die Grenzverformung der Fläche i ,
- $E_{t,90}$ der Zug-E-Modul quer zur Faserrichtung [N/mm²],
- G_0 der Schubmodul [N/mm²],
- G_r der Rollschubmodul [N/mm²],
- $A_{t,90}$ die auf Querzug beanspruchte Fläche,
- $A_{t,s}$ die auf Rollschub beanspruchte Fläche,
- $A_{t,r}$ die auf Schub beanspruchte Fläche,
- $C_{t,90}$ der Beiwert, der den nicht-linearen Verlauf der Querzugbelastung entlang l_p berücksichtigt; dafür wird 0,8 angenommen, [10]
- C_r der Beiwert, der den nicht-linearen Verlauf der Rollschubbeanspruchung auf die Rollschubfläche $A_{s,r}$ berücksichtigt; dafür wird 0,8 angenommen, [10]
- C_S der Beiwert welcher den nicht-linearen Verlauf der Schubbeanspruchung auf die Schubfläche $A_{s,s}$ berücksichtigt; dafür wird 0,8 angenommen, [10]
- l_p die Einsraubtiefe; diese entspricht der Einbindetiefe l_{emb} und der effektiv wirksamen Gewindelänge l_{ef} ,
- X_s die Länge des seitlichen Volumens, welches mit Schub beansprucht wird,
- X_r die Länge des seitlichen Volumens, welches mit Rollschub beansprucht wird,
- f_i die Festigkeit der Fläche i .

Die Steifigkeiten der Flächen werden wie folgt berechnet:

$$K_{t,90} = \frac{E_{t,90} A_{t,90}}{C_{t,90} l_p} \quad (2.3)$$

$$K_S = \frac{G_0 A_{s,s}}{X_s} + \frac{E_{t,90} A_{t,s}}{10 l_p} \quad (2.4)$$

$$K_r = \frac{G_r A_{s,r}}{X_r} + \frac{E_{t,90} A_{t,r}}{10 l_p} \quad (2.5)$$

Die Gesamtsteifigkeit K_j ergibt sich zunächst durch Addition der einzelnen Steifigkeiten.

$$K_j = (K_{t,90} + 2 K_s + 2 K_r) \quad (2.6)$$

Die Kraft kann so lange gesteigert werden, bis die Grenzverformung $\varepsilon_{f,(i)}$ der ersten Fläche bzw. des ersten Flächenpaares erreicht wird und es zum ersten Versagen kommt.

$$\varepsilon_{f,(i)} = \frac{f_i A_i c_i}{K_i} \quad (2.7)$$

Ab diesem Zeitpunkt gibt es einen Abfall in der Belastungskurve und infolge kann mit den verbleibenden Flächen und zugehörigen Steifigkeiten eine weitere Kraftsteigerung erreicht werden, wie in Abbildung 2-12 veranschaulicht wird.

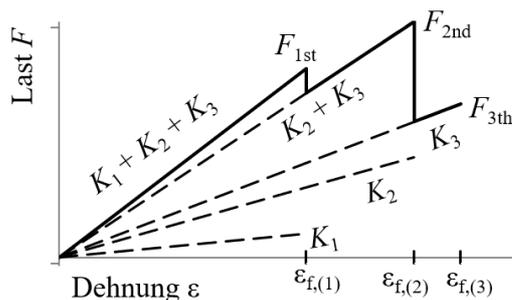


Abbildung 2-12 Schematische Darstellung des Belastungsverlaufes und des sequentiellen Versagens einzelner Flächen einschließlich Lastumlagerungen im Zuge des Blockscherversagens

Das Model berechnet den Blockscherwiderstand der Verbindung aus dem Maximum der drei Versagensschritte.

$$F_{max} = \max \left[\sum_{j=a+1}^3 K_j \varepsilon_{(a+1)} \right], \text{ mit } a = 0, 1, 2 \quad (2.8)$$

Bei der Berechnung mit diesem Model werden 19 verschiedene Eingangsparameter benötigt. Diese hängen von der Geometrie, von den Materialeigenschaften und von den Lastverteilungsparametern ab.

Blaß und Flaig [11]

Diese Veröffentlichung beschäftigt sich mit dem Tragverhalten von Anschlüssen, bei denen axial belastete Schraubengruppen rechtwinklig zur Faser angeordnet werden.

Blaß und Flaig [11] diskutieren, ob der Versagensmechanismus Blockscheren ausreichend über die Berechnung des Auszieh- bzw. Schraubenwiderstandes unter Berücksichtigung der wirksamen Anzahl der Verbindungsmittel $n_{ef} = n^{0,9}$ nach Eurocode 5 [1] abgedeckt ist. Dazu wird eine Bemessungsmethode für kompakte Schraubengruppen vorgestellt, das sie als Blockschermodell bezeichnen. Blaß und Flaig [11] analysieren eigene Prüfungen und jene von Mahlknecht und Brandner [40] und [10] und halten fest, dass im Fall von Blockscherversagen stets Querzugrisse und / oder Rollschubrisse jeweils über die Gruppe hinaus, aber kein Schubversagen beobachtet wurde. Deshalb beinhaltet das Modell letztendlich vier mögliche Versagensmechanismen des Queranschlusses mit axial beanspruchten Vollgewindeschrauben, die zu berücksichtigen sind. Dabei setzt sich der für die Bemessung relevante Wert des Widerstandes aus dem Minimum aus

- Zugversagen der Schraube mit Berücksichtigung $n_{ef} \cdot f_{tens,d}$
- Herausziehen der Schraube mit Berücksichtigung $n_{ef} \cdot F_{ax,Rd}$
- Querzugversagen des Holzes im Verbindungsbereich $F_{QZ,90,Rd}$
- Rollschubversagen des Holzes im Verbindungsbereich $F_{r,90,Rd}$, siehe Gleichung (2.9),

zusammen. Der Querzugnachweis wird analog zum Nachweis Queranschluss Eurocode 5 [1] nationaler Anhang berechnet. Beim Rollschubnachweis wird jener Anteil der Einwirkung nachgewiesen, der, bei

Betrachtung des Querschnittes, an die Bereiche seitlich der Gruppe übertragen wird. Dies entspricht der verbleibenden Breite $(b - (s - 1) \cdot a_2)$, der Einschraubtiefe l_{ef} und in Faserrichtung der Gruppenlänge zusätzlich jeweils $0,75 \cdot l_{ef}$. Es wird festgehalten, dass in den Prüfungen nicht erkennbar war, ob die Querzugfläche und die beiden Rollschubflächen nacheinander oder gleichzeitig versagt haben. Somit wird ein Zusammenwirken der Versagensflächen nicht berücksichtigt. Des Weiteren werden im Gegensatz zu dem Blockschermodell nach Mahlknecht und Brandner [10] die Schubflächen rechtwinklig zur Faser nicht berücksichtigt.

$$F_{r,90,Rk} = \frac{f_{v,r,k} \cdot 2 \cdot b \cdot l_{ef} \cdot (1,5 \cdot l_{ef} + (r-1) \cdot a_1)}{(b - (s-1) \cdot a_2)} \quad (2.9)$$

Dabei sind:

- $f_{v,r,k}$ die charakteristische Rollschubfestigkeit des Holzes in [N/mm²],
- b die Trägerbreite in [mm],
- l_{ef} die Einschraubtiefe rechtwinklig zur Faserrichtung in [mm],
- r die Anzahl der Schrauben in Faserrichtung,
- a_1 der Schraubenabstand untereinander in Faserrichtung in [mm],
- s die Anzahl der Schrauben rechtwinklig zur Faserrichtung,
- a_2 der Schraubenabstand untereinander rechtwinklig zur Faserrichtung [mm].

Bei Vergleich der Prüfergebnisse mit der Bemessungsmodell stellen Blaß und Flaig [11] folgendes fest: „Obwohl die effektiv wirksame Schraubenanzahl n_{ef} vorrangig den Einfluss einer ungleichmäßigen Schraubenbeanspruchung innerhalb der Verbindung berücksichtigt, führt die Bemessung ohne einen direkten Nachweis des Versagensmechanismus Rollschub zu einer ausreichend zuverlässigen Bemessung auch in denjenigen Fällen, in denen Querzugversagen oder Rollschubversagen auftrat.“ [11]

Schoenmakers [6]

Schoenmakers [6] setzt sich u.a. mit dem Versagensmechanismus „Aufspalten eines Fichtenbrettschichtholz Einfeldträgers bei Beanspruchung durch einen Queranschluss“ auseinander und untersucht dafür in einer kleinen Serie auch axial und unter einem Winkel von 90° zur Faser belastete Schraubengruppen des Durchmessers $d = 8$ und 12 mm.

Bei den Prüfungen wurde eine Konfiguration mit drei Schrauben in einer Reihe und eine Konfiguration mit drei Schrauben in zwei Reihen geprüft. Die jeweiligen Abstände wurden zu $a_1 = a_2 = 4 d$ und $a_1 = a_2 = 8 d$ variiert, wobei bei der Reihe nur a_1 vorhanden war. Es wurden 80 Prüfungen durchgeführt. Dabei betrug die mittlere Dichte der Prüfkörper $\rho_{mean} = 458 \text{ kg/m}^3$ bei einer Feuchte von $u_{mean} = 12,2 \%$.

Das Versagen auf Herausziehen wurde nur bei der Konfiguration mit drei Schrauben $d = 12 \text{ mm}$ und $a_1 = 8 d$ und bei derselben Konfiguration mit zwei Reihen der drei Schrauben mit einem Abstand von $a_2 = 8 d$ erreicht. Ansonsten wurde immer Querzugversagen beobachtet. Es wird bei der Unterscheidung zwischen dem Versagen auf Herausziehen und dem Versagen durch Aufspalten auch die Linearität des Kraft-Verschiebungsverlaufes betrachtet. Dabei wird festgestellt, dass das Ausziehversagen einen größeren Bereich der Nichtlinearität im Bereich der maximalen Kraft besitzt als das Aufspaltversagen.

In der Dissertation von Schoenmakers [6] wird der Bruchenergieparameter $\sqrt{GG_c}$ betrachtet, der sich für die Analyse von sprödem Bruchverhalten wie Querzugversagen eignet. Dieser Parameter besteht aus der Wurzel des Schubmoduls mal der kritischen Energiefreisetzungsrate und wird direkt aus den Prüfdaten berechnet. Schoenmakers [6] hält fest, dass die Prüfkörper, welche auf Herausziehen der Schrauben versagt haben, eine deutlich geringeren Bruchparameter zufolge haben, als jene, bei denen der Prüfkörper aufgespalten wurde.

Aus den Ausführungen von Schoenmakers [6] kann man schließen, dass zwischen dem Abstand $a_1 = a_2 = 4 d$ und $a_1 = a_2 = 8 d$ für Schrauben mit $d = 12 \text{ mm}$ der Übergang zwischen Aufspalten und Ausziehen liegt.

KAPITEL 3: MATERIAL UND METHODEN

3-1 PRÜFKONZEPT

3-1.1 ALLGEMEINE VORBEMERKUNGEN

In diesem Kapitel wird der Umfang der Prüfungen quantifiziert und auf die einzelnen Prüfkfigurationen eingegangen. Der Prüfablauf wurde an ON EN 26891 [42] angelehnt. Die maximale Gruppengröße und die Durchmesserwahl wurden an die zur Verfügung gestellten Materialien Holz und Schraube, an die Maximalkraft von 275 kN der vorhandene Prüfmaschine [43] im Lignum Test Center (LTC) des Institutes für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz und an die vorhandenen Anschlusssteile und möglichen Abstandsvariationen im Sinne der Lösungsfindung angepasst.

3-1.2 NAHES AUFLAGER

Unter dem Begriff „nahes Auflager“ wird eine einachsige Lagerung verstanden, wobei der Abstand der äußeren Schraubenreihe der Gruppe zum Auflagerrand möglichst angepasst an a_1 ist. In Bezug auf den Kraftfluss bedeutet das eine weitgehend direkte Lastabtragung und das Verhältnis l_p / h hat weniger Relevanz. Durch den kurzen Auflagerabstand und angepassten Prüfkörperhöhen wurde angestrebt eine hohe Steifigkeit zu erreichen und dadurch eine möglichst geringe Biegeverformung zu bewirken.

Bei den Untersuchungen zu der Schraubengruppe 90° zur Faser wurden die Parameter Abstand zwischen den Schrauben in Faserrichtung a_1 , Abstand zwischen den Schrauben normal zur Faserrichtung a_2 , und effektive Gewindelänge im Prüfkörper l_{ef} mit dem Ziel variiert, den Zusammenhang zu den Versagensarten Herausziehen, Blockscheren und Stahlbruch zu untersuchen. Weiters wurden auch Steifigkeitswerte aufgezeichnet, welche im Kapitel 3-3.1 näher beschrieben sind.

Die Variation der Parameter wurde in Brettschichtholz aus Buche durchgeführt. Die Anordnungen der Schraubengruppe für die jeweilige Zielversagensart wurden dann in Brettschichtholz aus Birke und Furnierschichtholz aus Buche (BauBuche; Fa. Pollmeier Massivholz GmbH & Co. KG; ETA-14/0354:2018 [33]) überprüft, um festzustellen, ob dasselbe Versagen auftrat oder gegebenenfalls Anpassungen notwendig erscheinen.

Einzelsschraube

Um eine konkrete Aussage über das potenzielle Tragverhalten der Gruppe treffen zu können, wurden Referenzprüfungen mit Einzelschrauben in jeder der zu untersuchenden Holzarten gemäß ON EN 1382 [44] durchgeführt und zusätzlich die Stahlzugtragfähigkeit gemäß ON EN 1383 [45] bestimmt, siehe Tabelle 3-1. Die verwendeten Prüfkörper hatten die Abmessungen $b = l = 160$ mm.

Die Ergebnisse der Referenzprüfungen wurden in der Auswertung den Ergebnissen der Gruppe gegenübergestellt. Dabei wurden die Bezeichnungen der Serien BU für Buche, BI für Birke und BB für BauBuche eingeführt. Es wurden die Schrauben durch den Prüfkörper durchgeschraubt, sodass die Schraubenspitze und zugehörige Features, wie z.B. der Verdichter, keinen Einfluss auf das Ergebnis hatten. Um dennoch das Tragverhalten der Schraubenspitze und genannter Features zu überprüfen, wurde die Serie BUd eingeführt, bei der die Schrauben nicht durchgeschraubt wurden, sondern die Spitze noch im Prüfkörper verbleibt. Die Serie S beschreibt die reine Prüfung der Stahlzugtragfähigkeit der Schraube.

Tabelle 3-1 *Prüfumfang Einzelschraube*

| Serie | BU | BI | BB | BUd | S |
|---------------|----|----|----|-----|---|
| Anzahl PK | 20 | 20 | 20 | 3 | 6 |
| l_{ef} [mm] | 49 | 43 | 58 | 41 | - |
| h [mm] | 49 | 43 | 58 | 73 | - |

Reihe

In den Prüfkonfigurationen zur Überprüfung eines möglichen Reihenscherversagens wurde der Abstand zwischen den Schrauben in Faserrichtung untersucht. Diese Prüfungen wurden nur mit Buchenlamellen durchgeführt. Die verwendeten Prüfkörper hatten die Abmessung $b = 160$ mm, $l = 280$ mm und $h = 48$ mm.

Dabei wurden die Serien, wie in Tabelle 3-2 dargestellt, benannt und in der beschriebenen Häufigkeit, Anzahl der Prüfkörper, mit dem jeweiligen Abstand a_1 ausgeführt. Die Brettstärke war 49 mm und die Schrauben wurden, wie bei der Referenzserie, durchgeschraubt. Dabei wurde bei der Serie R10db eine Lamelle mit einer Breite von $b = 48$ mm und somit der seitliche Abstand zum Rand auf 24 mm verringert. Im Vorfeld war eine Anordnung mit $5 d$ und drei Schrauben geplant. Jedoch wurde festgestellt, dass bei diesem Abstand Reihenscheren auftrat, weshalb wurde der Abstand a_1 vergrößert. Aufgrund der Prüfkonfiguration und dem davon abhängigen Auflagerabstand wurden danach nur zwei Schrauben je Prüfkörper eingedreht.

Tabelle 3-2 *Parameter zur Charakterisierung der Prüfkonfigurationen Reihe*

| Serie | R5d | R7d | R8d | R10d | R10db |
|-----------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Anzahl PK | 5 | 3 | 3 | 10 | 6 |
| n | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| a_1 | $5 d$ | $7 d$ | $8 d$ | $10 d$ | $10 d$ |

Gruppen

Bei der Planung der Gruppenprüfungen wurden die Ergebnisse der Reihe herangezogen und demnach die Serien ausgelegt. Die Reihenfolge der Serien richtet sich nach dem Prüfaufbau, da, je nach Aufbau, verschiedene Abstände geprüft werden können, wie näher in Abschnitt 3-3.1 erklärt. Die Länge der Prüfkörper beträgt 600 mm und ergibt bei der maximalen Öffnungslänge eine Auflagerbreite von 180 mm.

Die Serien wurden der Prüfreihefolge nach von 1 bis 20 benannt. In Tabelle 3-3 sind die Ausgangsparameter für die Gruppenprüfungen in Buche und in Tabelle 3-4 für Birke und BauBuche dargestellt. Darin sind die Anzahl der Prüfkörper je Serie, die effektive Einschraublänge (l_{ef}), die Länge der Öffnung zwischen den Auflagern in Faserrichtung ($l_{öffnung}$), die Anzahl der Schrauben (n), die Abmessungen des Prüfkörpers (b und h), die Abstände zwischen den Schrauben und zwischen den Schrauben und dem Rand ($a_{2,c}$), der Abstand zwischen Schrauben und Auflager ($a_{1,A}$) und die Holzart angeführt. Die Parameter sind auch graphisch in Abbildung 3-1 dargestellt. Während der Prüfung wurde auf die Ergebnisse reagiert und Serien angepasst, im Umfang verringert oder hinzugefügt.

Tabelle 3-3 *Parameter zur Charakterisierung der Prüfkonfigurationen Gruppe Buche*

| Serien | Anzahl PK | $l_{ef} + l_{emb}$ | $l_{\text{Öffnung}}$ | n | b | h | a_1/d | a_2/d | $a_{1,A}$ | $a_{2,c}$ |
|----------------|-----------|--------------------|----------------------|-------|------|------|---------|----------|-----------|-------------|
| Einheit | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| 1 | 6 | 48+0 | 240 | 9 | 138 | 92 | 10 | 5 | 40 | 29 |
| 2 | 6 | 48+0 | 240 | 9 | 138 | 92 | 5 | 5 | 80 | 29 |
| 3 | 6 | 48+0 | 180 | 9 | 138 | 92 | 5 | 5 | 50 | 29 |
| 4 | 6 | 96+0 | 180 | 6 | 138 | 138 | 7 | 2,5 | 34 | 49 |
| 5 | 5 | 120+0 | 210 | 6 | 138 | 138 | 7 | 2,5 | 49 | 49 |
| 6 | 6 | 56+0 | 210 | 9 | 138 | 92 | 7 | 5 | 49 | 29 |
| 7 | 6 | 56+0 | 180 | 9 | 138 | 138 | 5 | 5 | 50 | 29 |
| 8 | 6 | 120+0 | 180 | 6 | 138 | 138 | 5 | 3,5 | 50 | 41 |
| 11 | 6 | 56+0 | 240 | 9 | 138 | 92 | 7,5 | 2,5 | 60 | 49 |
| 12 | 5 | 64 + 28 | 240 | 9 | 138 | 92 | 7,5 | 2,5 | 60 | 49 |
| 15 | 3 | 40+0 /56+0 | 180 | 9 | 183 | 138 | 5 | 7,5 | 50 | 31,5 |
| 16 | 2 | 40+0 | 180 | 6 / 4 | 183 | 138 | 5 | 7,5 / 10 | 50 | 31,5 / 11,5 |
| 17 | 6 | 48 + 32 | 240 | 9 | 183 | 138 | 5 | 5 | 80 | 51,5 |
| 18 | 4 | 56+0 | 240 | 9 | 88 | 92 | 7,5 | 2,5 | 60 | 24 |

Tabelle 3-4 *Parameter zur Charakterisierung der Prüfkonfigurationen Birke und BauBuche*

| Serien | Anzahl PK | $l_{ef} + l_{emb}$ | $l_{\text{Öffnung}}$ | n | b | h | a_1/d | a_2/d | $a_{1,A}$ | $a_{2,c}$ |
|----------------|-----------|--------------------|----------------------|-----|------|------|---------|---------|-----------|-----------|
| Einheit | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [mm] | [mm] | [-] | [-] | [mm] | [mm] |
| 9 (BI) | 6 | 56 | 210 | 9 | 200 | 120 | 7 | 5 | 98 | 95 |
| 13 (BI) | 6 | 56 | 240 | 9 | 182 | 126 | 7,5 | 2,5 | 112,5 | 88,5 |
| 10 (BB) | 2 | 56 | 210 | 9 | 193 | 160 | 7 | 5 | 98 | 91,5 |
| 14 (BB) | 2 | 56 | 240 | 9 | 181 | 160 | 7,5 | 7,5 / 5 | 112,5 | 83 |
| 19 (BB) | 4 | 56 | 240 | 9 | 185 | 160 | 7,5 | 2,5 | 112,5 | 90 |
| 20 (BB) | 4 | 56 | 240 | 4 | 185 | 160 | 10 | 10 | 110 | 82,5 |

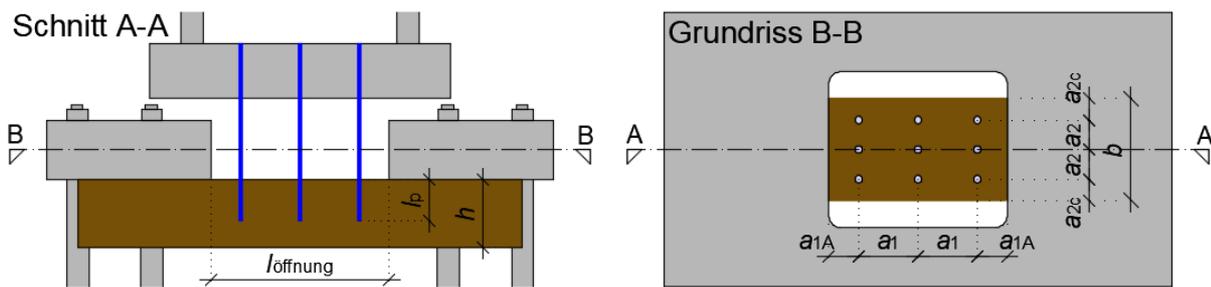


Abbildung 3-1 Geometrieparameter Gruppe, Darstellung Schnitt (links) und Grundriss (rechts)

Die effektive Gewindelänge l_{ef} ist die Länge des Schraubengewindes im Holz abzüglich der Schraubenspitze. Die Länge der Schraube im Prüfkörper samt Spitze wird als l_p bezeichnet. Die Einbindetiefe l_{emb} beschreibt die Länge der Schraube ohne Verankerung im Holz. Dieser Abstand kann durch Vorbohren mit mindestens dem Schraubendurchmesser oder durch Verwendung von Teilgewindeschrauben zustande kommen. Die geometrischen Parameter bezüglich der Schraubenlänge im Holz sind in Abbildung 3-2 dargestellt. Die Länge der Schraubenspitze wurde mit $1 d$ für die Auswertung dieser Masterarbeit festgelegt. Dies begründet sich auf den Erkenntnissen aus Hübner [17] und Pirnbacher [46].

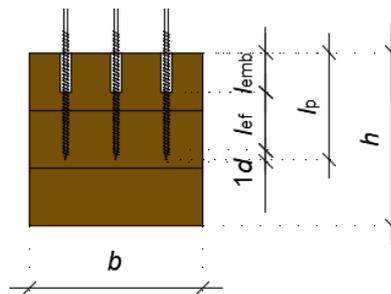


Abbildung 3-2 Geometrische Parameter Schraube im Holz

Es wurden auch zwei Serien durchgeführt, bei denen eine Einbindetiefe für das Gewinde l_{emb} verwendet wurde. Einerseits wurde in Serie 12 die Schraube durchgeschraubt, wie aus Abbildung 3-3 mittig hervorgeht. Andererseits wurde in Serie 17 die Einbindetiefe vorgebohrt und somit eine größere Einbindetiefe der Schraube bei gleichem l_{ef} erreicht, wie in Abbildung 3-3 rechts gezeigt wird.

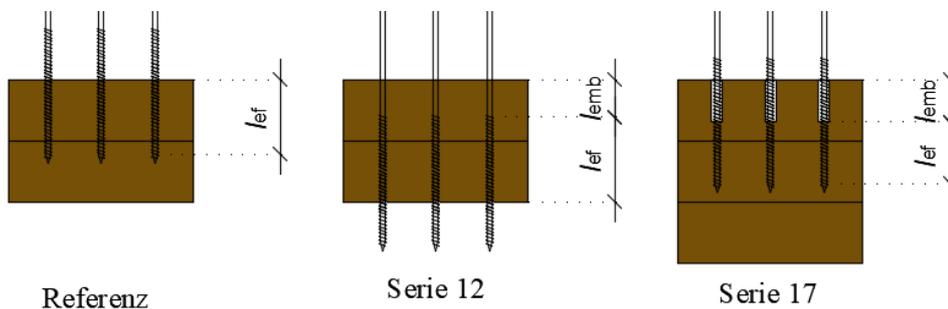


Abbildung 3-3 Einschraubtiefen Referenz (links); Serie 12 (Mitte); Serie 17 (rechts)

3-2 MATERIAL

3-2.1 PRÜFKÖRPER

Das benötigte Material für die Prüfkörper aus Buche wurde von der Firma Pollmeier Massivholz GmbH & Co. KG zur Verfügung gestellt. Das Holz wurde in Form von Buchenlamellen mit einer Stärke von 49 bis 55 mm sowie Trägern in BauBuche mit einer Höhe von 200 mm, einer Breite von 160 mm und einer Länge von 2.600 mm angeliefert.

Bei den Buchenlamellen handelte es sich um Ware der Güte SUPERIOR 52 (48,5) mm mit Brettlänge von 2,45 m und 3,05 m und einer Breite von 140 und 210 mm. Die Lamellen wiesen eine hohe Qualität auf und zeigten keinen Rotkern, eine minimale Astigkeit und kaum andere Wuchsmerkmale. Dies half den Einfluss von Wuchsmerkmalen auf die Prüfungen möglichst gering zu halten und hielt den Aufwand und den Verschnitt für die Prüfkörperherstellung gering.

Die Birkenlamellen wurden von Hasslacher Norica Timber GmbH zur Verfügung gestellt. Sie wurden mit einer Breite von 210 mm, der Länge 3.000 mm und der Höhe 46 mm zugestellt. Die Lamellen wurden visuell nach möglichst geringen Wuchsmerkmalen sortiert, um die Variabilität innerhalb des Materials gering zu halten. Es handelte sich bei den Lamellen um kern- und kernnahe Bretter. Zum Lieferzeitpunkt war keine Seitenware verfügbar.

Das zur Verfügung gestellte Holz wurde von August 2019 bis zu den Prüfungen im Februar 2020 bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert. Im Zuge des ersten Zuschnittes Mitte September 2019 wurde Stichprobenartig eine Holzfeuchte mittels einer Widerstandsmessung (Hygronette mit Einschlagelektroden) durchgeführt. Dabei wurde eine Holzfeuchte für Buche zwischen 8,7 % und 12,4 % und für Birke zwischen 5,3 % und 11,9 % gemessen. Für BauBuche konnte keine aussagekräftige Messung durchgeführt werden, da die Hygronette keine Referenzdaten zum Vergleich für BauBuche enthält. Schweiger [4] führte Ende November 2019 Prüfungen mit dem selben Ausgangsmaterial durch und ermittelte aus Darrproben die folgenden Holzfeuchten: $u_{BU,mean} = 9,4 \%$ $CoV = 3,2 \%$, $u_{BI,mean} = 12,3 \%$ $CoV = 2,4 \%$ und $u_{BB,mean} = 7,3 \%$ $CoV = 2,1 \%$.

3-2.1.1 Herstellung der Prüfkörper

Für die Prüfungen wurden Prüfkörper mit einer, zwei und drei Lamellen hergestellt, welche nachfolgend beschrieben werden. Die Prüfkörper mit drei Lamellen wurden aufgrund von größerer Einschraubtiefe und größerem Biegegewidstand benötigt. Für die Referenzprüfung der Einzelschraube und für die Prüfungen mit Schraubenreihen in Faserrichtung wurden Prüfkörper mit einer Lamelle hergestellt. Diese wurde zugeschnitten und die Oberfläche gehobelt, um satten Kontakt zwischen Prüfkörper und Lagerungsplatte zu gewährleisten. Für die Gruppenprüfungen wurden Träger mit zwei und drei Lamellen hergestellt. Dazu wurden die einzelnen Lamellen abgelängt, gehobelt, der Rohdichte nach sortiert und anschließend zu Duo- bzw. Trio-Prüfkörper mit möglichst homogener Rohdichte verklebt (Abbildung 3-11). Dabei ist die Homogenität der Einzelnen Prüfkörper bezogen auf die Rohdichte relevant, um bei der Auswertung eine klare Aussage über die betrachteten Ergebnisgrößen treffen zu können. So wurde für einen Prüfkörper mit mehreren Lamellen entweder dieselbe Lamelle oder ein Brett mit ähnlicher Rohdichte verwendet.

Die Dokumentation des Zuschnittes für die jeweiligen Prüfkörper ist nachfolgend dargestellt. Der Zuschnitt für die Gruppenprüfkörper aus BauBuche ist in Abbildung 3-4 und jener für die Einzelprüfkörper in Abbildung 3-5 dargestellt. Der Zuschnittplan für die Gruppenprüfkörper aus Buche ist in Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7, und jener für die Einzelprüfkörper in Abbildung 3-8 dargestellt. Der Zuschnitt der Birkenlamellen ist in Abbildung 3-9 für die Gruppenprüfkörper und in Abbildung 3-10 für die Einzelprüfkörper gezeigt. Der jeweils lange Abschnitt der Buchen- und Birkenlamellen wird für die zu einem späteren Zeitpunkt folgende Herstellung der Einfeldträger zur Seite gelegt.

Um eine eindeutige Prüfkörper- und Lamellenidentifizierung zu gewährleisten, wurde jede Lamelle mit ihrer Holzart und einer fortlaufenden Nummer beschriftet. Wenn aus einer langen Lamelle drei kurze Stücke geschnitten wurden, bekamen sie eine zusätzliche Zahl von eins bis drei.

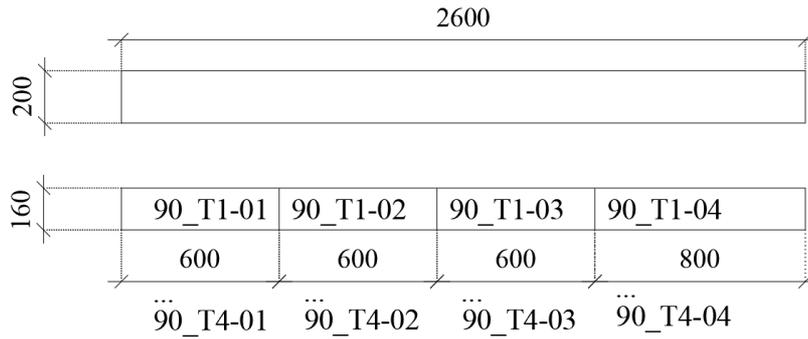


Abbildung 3-4 **Zuschnitt Prüfkörper BauBuche Gruppe**

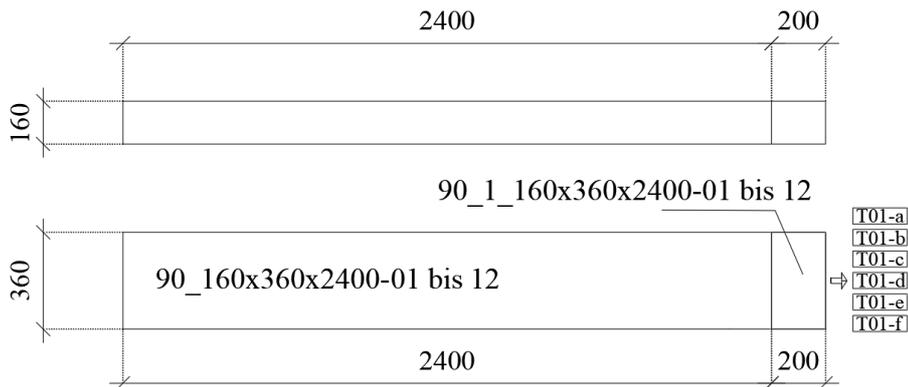


Abbildung 3-5 **Zuschnitt Prüfkörper BauBuche Einzel**

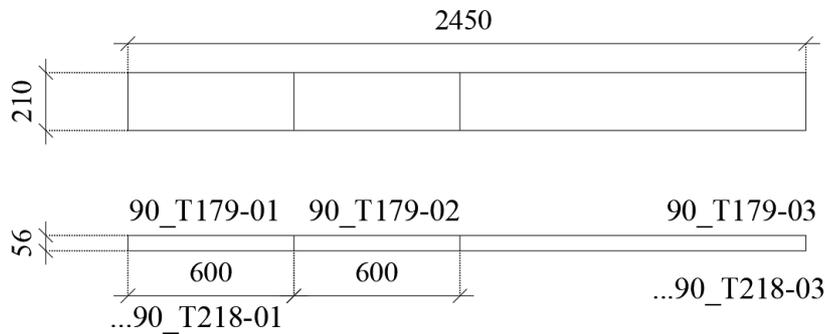


Abbildung 3-6 **Zuschnitt Prüfkörper Buche Gruppe, Breite $b = 210$ mm**

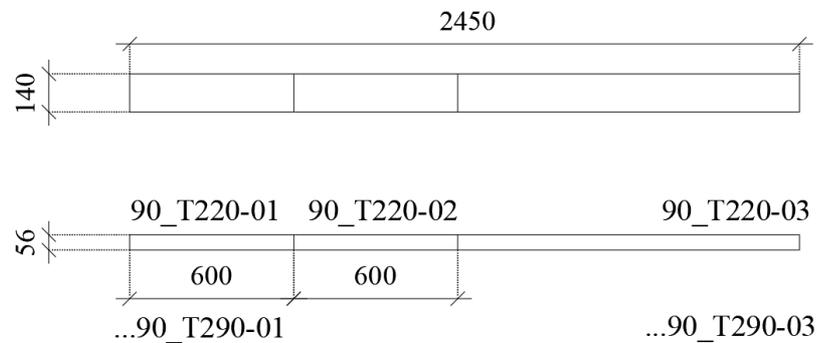


Abbildung 3-7 **Zuschnitt Prüfkörper Buche Gruppe, Breite $b = 140$ mm**

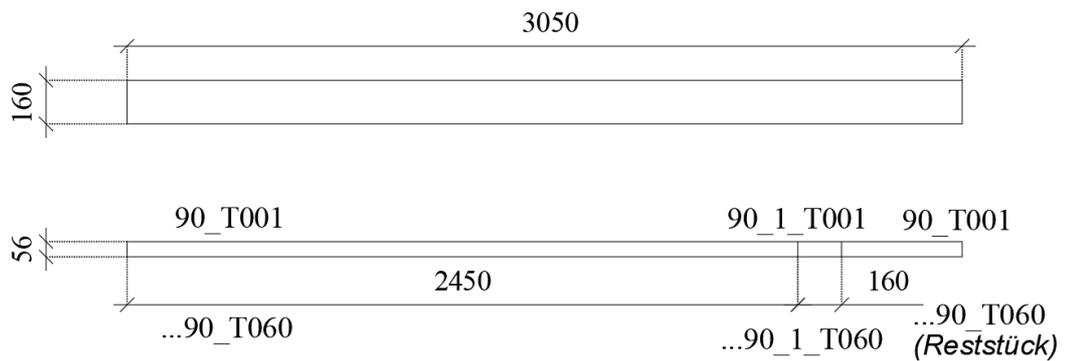


Abbildung 3-8 *Zuschnitt Prüfkörper Buche Einzel*

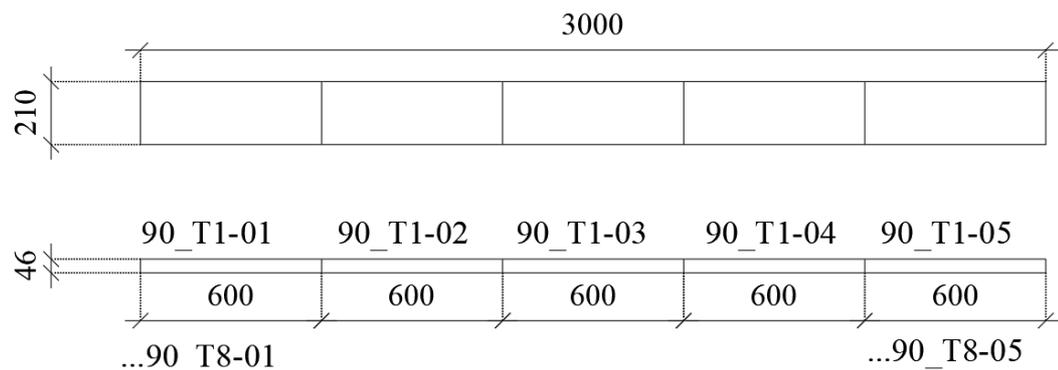


Abbildung 3-9 *Zuschnitt Prüfkörper Birke Gruppe*

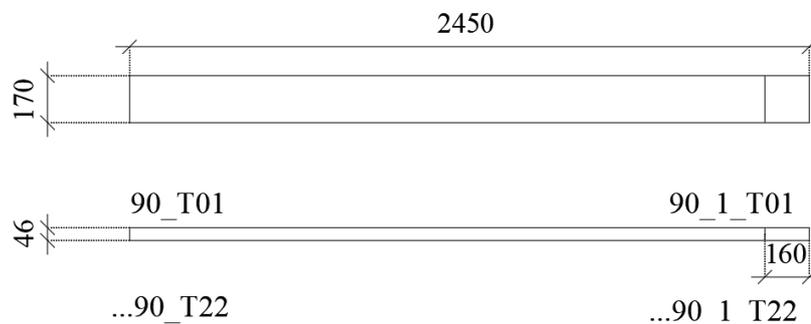


Abbildung 3-10 *Zuschnitt Prüfkörper Birke Einzel*

Für die Herstellung der zwei- und dreilagigen Prüfkörper in Buche und Birke wurden je Fuge 400 g/m² des Klebstoffgemisches aufgetragen und mit einem Pressdruck von 0,8 N/mm² für 7 Stunden verklebt. Das Klebstoffgemisch bestand aus einem Verhältnis von Kleber zu Härter 10:3. Es wurde der Melamin-Harnstoff Klebstoff Prefere 4546 [47] der Firma Dynea und der zugehörige Härter Prefere 5022 [47] der Firma Dynea verwendet.

Die Träger aus BauBuche wurden nur zugeschnitten und für die Referenzprüfung der Einzelschraube in Teilquerschnitte mit einer Höhe von 55 mm aufgetrennt, siehe Abbildung 3-5.



Abbildung 3-11 Lagerung Klimakammer (links), Verklebung der Prüfkörper in der Presse (rechts)

3-2.2 VERBINDUNGSMITTEL – HOLZSCHRAUBE

Als Verbindungsmittel wurde die RAPID® Hardwood [39] von der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH mit ETA-12/0373 zur Verfügung gestellt. Es wurden Teilgewindeschrauben mit Durchmesser 8 mm, einer Gewindelänge von 100 mm und 300 mm sowie einer Gesamtlänge von 240 mm und 400 mm geliefert. Die Schraube besitzt einen Schaftfräser, welcher den Eindrehwiderstand verringern soll, eine Vollspitze in Kombination mit einem Verdichter, welche zusammen eine geringere Sprengwirkung hervorrufen sollen und einen im Vergleich mit herkömmlichen Schrauben höheren Kerndurchmesser aufweisen, wodurch die Zugtragfähigkeit der Schraube wesentlich erhöht ist.

3-3 METHODEN

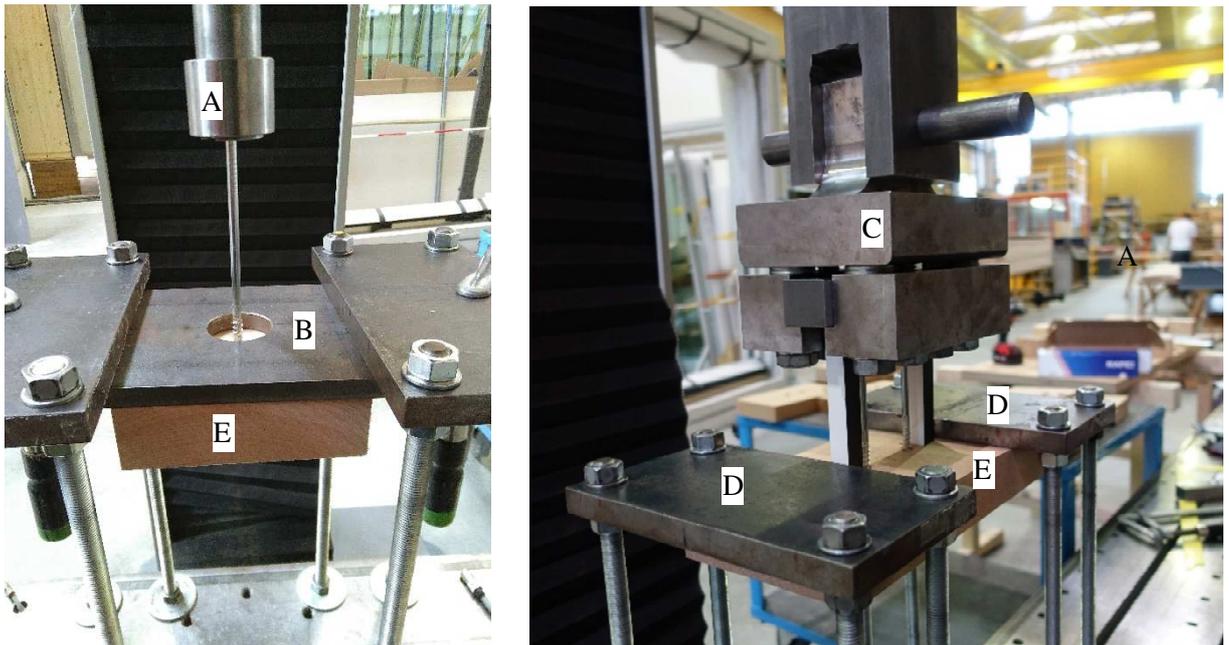
3-3.1 PRÜFAUFBAU

Prüfmaschine

Die Prüfungen wurden an der Prüfmaschine lignum_uni_275 der Firma Zwick GmbH & Co. KG [43] des Lignum Test Centers des Instituts für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz durchgeführt. Die maximale Prüfkraft der Maschine ist für die Prüfungen mit 275 kN begrenzt.

Prüfaufbau

Für die Referenzprüfungen an der Einzelschraube und den Schraubenreihen wurde der in Abbildung 3-12 links und rechts dargestellte „push-pull“ Aufbau verwendet. Die Einleitung der Zugkraft auf den bzw. die Schraubenköpfe erfolgte über ein passendes Eihängestück. Der Prüfkörper selbst wurde während der Prüfung gegen eine Lagerungsplatte mit runder Öffnung, $6d = 48$ mm, bzw. gegen zwei Lagerungsplatten mit einem Abstand von 160 mm gedrückt.



Legende: A: Einhängestück für Schraubenkopf, B: Lagerungsplatte Einzelschraube, C: Einhängestück Schraubenreihe, D: Lagerungsplatten, E: Prüfkörper

Abbildung 3-12 Prüfaufbau für Einzelausziehprüfungen (links) und Schraubenreihen (rechts)

Die Konfiguration für die Gruppenprüfungen ist in Abbildung 3-13 und Abbildung 3-14 dargestellt. Es wurde die Lagerungsplatte mittels acht Gewindestangen mit dem Längsträger der Prüfmaschine verbunden, welches als Widerlager für den Prüfkörper dient. An der beweglichen Traverse der Prüfmaschine wurde eine Gelenkkette angebracht, woran die obere Einbauplatte über Bolzen befestigt war. Somit besitzt das System in den beiden Hauptrichtungen ein Gelenk, wodurch bei Belastung keine Zwangskräfte entstehen können. An der oberen Einbauplatte ist die untere Einbauplatte über drei Gewindestangen angehängt. An diesen Gewindestangen sind Dehnmessstreifen befestigt, welche die Messung der Kraft in der jeweiligen Stange ermöglichen. Über die untere Einbauplatte mit Lochraster ist eine Variation der Abstände in und quer zur Faserrichtung möglich. Des Weiteren wurden unter die Lagerungsplatte, welche eine Öffnungslänge in Faserrichtung von 240 mm besaß, kleinere Lochplatten, mit einer Öffnungslänge von 210 mm oder 180 mm, montiert, um den Randabstand je nach Schraubenabstand variieren zu können.



Legende: 8: Wegaufnehmer oben

Abbildung 3-13 Gesamter Aufbau der Gruppenprüfung (links), Nahaufnahme Schraubengruppe, Lagerung und Wegaufnehmer oben (rechts)

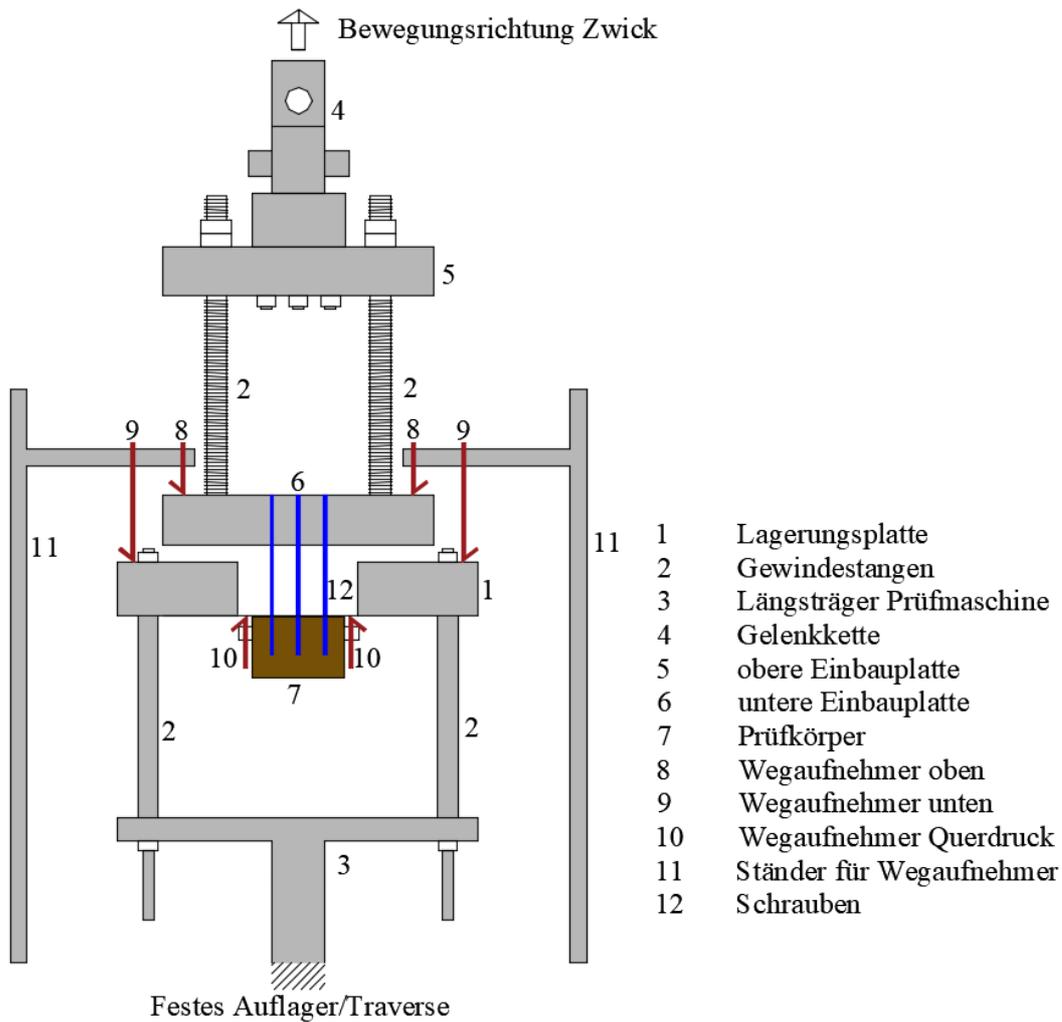
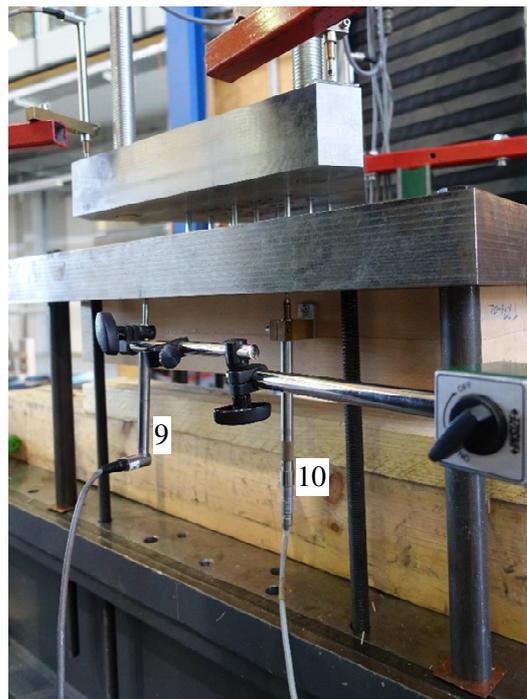


Abbildung 3-14 Darstellung des Aufbaus und der Position der Wegaufnehmer

Wegmessung

Zur Aufzeichnung des absoluten vertikalen Weges oben wurde in jeder der drei Ecken der unteren Einbauplatte, wie in Abbildung 3-13 rechts ersichtlich, je ein induktiver Wegaufnehmer angebracht, welcher den absoluten vertikalen Weg aufgezeichnet hat. In Abbildung 3-15 ist der Wegaufnehmer für den absoluten Weg unten und der Wegaufnehmer für relativen Weg zwischen Prüfkörper und Lagerungsplatte (Querdruckverformung) in der Nähe des Auflagers gezeigt. Der Wegaufnehmer unten zeichnet auf beiden Seiten des Prüfkörpers die in der Mitte befindlichen Verformung der Lagerplatte auf. Beidseitig an den Prüfkörper ist ein Wegaufnehmer angeschraubt, der Querdruckverformung zwischen Prüfkörper und Auflager (Stahlplatte) misst. Die Wegaufnehmer für die absolute Wegmessung sind auf, vom System unabhängigen, Ständern montiert.



Legende: 9: Wegaufnehmer unten, 10: Wegaufnehmer Querdruck

Abbildung 3-15 Wegaufnehmer Oben, Unten und Wegaufnehmer Querdruck

3-3.2 VORBEMESSUNG

Um die Prüfung planen zu können, wurde eine Vorbemessung durchgeführt. Zur Berechnung der Ausziehtragfähigkeit der Einzelschraube wurde die Vorbemessung nach Brandner et al. [38] für zerstreutporige Holzarten, deren Modell auf ein große Datenbasis zurückgreift und auf unterschiedlichen Laubholzarten beruht, durchgeführt. Des Weiteren wurde ein Biegenachweis und ein Querdrucknachweis durchgeführt.

Ausziehfestigkeit

Die Formeln zur Bestimmung der mittleren Ausziehfestigkeit nach Brandner et al. [38] stellen sich in Gleichung (3.1) dar. Zu Bestimmung der charakteristischen Ausziehfestigkeit wurde die Gleichung (3.2) nach Brandner [48] verwendet.

$$f_{ax,mean} = f_{ax,ref,mean} k_{ax,mean} k_{sys,mean} \left(\frac{\rho_{mean}}{\rho_{ref,mean}} \right)^{k_p} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.1)$$

$$f_{ax,05} = 0,0007 \rho_{05}^{1,60} d^{-0,33} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.2)$$

Dabei ist $f_{ax,ref,mean} = 0,00042 \rho_{ref,mean}^{1,7} d^{-0,33}$, $k_{ax,mean} | \alpha = 90^\circ = 1$, $k_{gap,mean} = 1$ und $f_{ax,ref,05} = 0,0004 \rho_{ref,05}^{1,7} d^{-0,33}$ und $k_{ax,05} | \alpha = 90^\circ = 1$ und $k_{gap,05} = 1$.

Um nun den Mittelwert und den charakteristischen Wert der Ausziehtragfähigkeit zu erhalten werden nachfolgende Formeln angewendet:

$$F_{ax,mean,RK} = f_{ax,mean} d l_{ef} \pi [N] \quad (3.3)$$

$$F_{ax,05,RK} = f_{ax,05} d l_{ef} \pi [N] \quad (3.4)$$

Dabei sind:

- d der Durchmesser der Schraube [mm],
- l_{ef} die effektive Gewindelänge $l_{ef} = l_p - 1,0 d$,
- l_p die wirksame Gewindelänge.

Bei der Auslegung der Gruppengröße galt es die maximale Prüfkraft der Prüfmaschine von 275 kN entsprechend zu berücksichtigen. Folglich ergab sich eine Gruppengröße von max. neun Schrauben für die Prüfung mit $l_{ef} \leq 56$ mm und von sechs Schrauben für den Versagensmechanismus Schraubenbruch.

Mit den zuvor beschriebenen Formeln (3.1), (3.2), (3.3) und (3.4) lassen sich die Ausziehfestigkeit und die Ausziehtragfähigkeit auf charakteristischen und Mittelwert Niveau bestimmen. Dazu wurden die Lamellen, aus denen die Prüfkörper hergestellt wurden, abgewogen und somit eine mittlere Rohdichte ermittelt. Die Einschraubtiefe wurde je nach Serie festgelegt. Die Ergebnisse und Zusammenstellung der Vorbemessung zur Ausziehfestigkeit und Ausziehtragfähigkeit befinden sich in Tabelle 3-5.

Tabelle 3-5 *Vorbemessung Einzelschraube und Gruppe betreffend Ausziehfestigkeit und Ausziehtragfähigkeit*

| | Einheit | BU | | | | | | BI | BB |
|-------------------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\rho_{12,05}$ | [kg/m ³] | 674 | | | | | | 532 | 756 |
| $\rho_{12,mean}$ | [kg/m ³] | 724 | | | | | | 584 | 774 |
| l_{ef} | [mm] | 49 | 40 | 48 | 56 | 96 | 120 | 43 | 58 |
| $f_{ax,05}$ | [N/mm ²] | 11,8 | 11,8 | 11,8 | 11,8 | 11,8 | 11,8 | 8,1 | 14,2 |
| $f_{ax,mean}$ | [N/mm ²] | 15,4 | 15,4 | 15,4 | 15,4 | 15,4 | 15,4 | 10,7 | 17,2 |
| $F_{max,05}$ | [kN] | 14,6 | 11,9 | 14,3 | 16,6 | 28,5 | 35,7 | 8,8 | 20,7 |
| $F_{max,mean}$ | [kN] | 18,9 | 15,5 | 18,5 | 21,6 | 37,1 | 46,4 | 11,6 | 25,1 |
| $F_{max,mean} \times 3$ | [kN] | 57 | - | - | - | - | - | - | - |
| $F_{max,mean} \times 4$ | [kN] | - | - | - | - | - | - | - | 100 |
| $F_{max,mean} \times 6$ | [kN] | - | - | - | - | 223 | 278 | - | 151 |
| $F_{max,mean} \times 9$ | [kN] | - | 139 | 167 | 195 | - | - | 104 | 226 |

Verbindungsmitteleanzahl

Bei der Bemessung einer Schraubengruppe wird die Tragfähigkeit der Einzelschraube bestimmt, wobei die Tragfähigkeit der Gruppe bei n Einzelschrauben das n -Fache dieser wäre. Jedoch kann die Tragfähigkeit einer Gruppe mit n Schrauben kleiner sein als die Tragfähigkeit von n Einzelschrauben. Deshalb wird in Normen und Regelwerken die effektiv wirksame Verbindungsmitteleanzahl n_{ef} eingeführt, welche kleiner gleich als die Gesamtzahl der Schrauben in der Gruppe ist.

Für die Berechnung der Auszieh- und Schraubkraft der Gruppe wird ein $n_{ef,mean} = n$ verwendet. Einerseits, da es auf der sicheren Seite liegt bezüglich der maximalen Zugkraft der Prüfmaschine und andererseits, da mit ausreichend Abstand durchaus die volle Tragfähigkeit der Schrauben erreicht werden kann.

Stahlzugtragfähigkeit

Die Bruchkraft der Einzelschraube wurde aus Erfahrung vorangegangener Arbeiten angenommen. Der Wert der Zugtragfähigkeit für die RAPID® Hardwood [39] betrug der Mittelwert 36,5 kN. Somit konnte für den Versagensmechanismus Schraubenbruch eine aufzubringende Kraft im Mittel von 219 kN für Gruppen mit sechs Schrauben angesetzt werden.

3-3.3 ABLAUF

Im Vorfeld wurde in wenigen Vorversuchen getestet, wie sich das Holz beim Eindrehen der Schrauben verhält. Es wurden in einzelne Lamellen Schrauben eingedreht und dabei der Abstand der Schrauben zum Rand variiert. Dabei wurde festgestellt, dass bei $a_{1,c} = 5 d$ und $a_{2,c} = 3,5 d$ keine Spaltrisse zum Rand hin auftreten. Des Weiteren wurde beobachtet, dass mit „normaler“ Eindrehgeschwindigkeit das Holz eine größere Neigung zum Spalteten bei Applizierung der Schraube hat als bei „langsamer“ Eindrehgeschwindigkeit. Bei der Prüfdurchführung wurde mit ca. 60 bis 85 U/min die Schraube eingedreht.

Bei allen Prüfungen wurde die Zeit, die Kraft und der Weg der Prüfmaschine aufgezeichnet. Zusätzlich wurden bei den Gruppenprüfungen Wegaufnehmer montiert, deren Daten später zur Berechnung der Steifigkeit genutzt wurden.

Prüfungen der Einzelschraube – Referenzprüfungen

Bei der Prüfdurchführung wurde die Schraube mittig in den Prüfkörper bis zur geplanten Einschraubtiefe eingedreht. Um die Schraube gerade in den Prüfkörper eindrehen zu können, wurde eine Einschraubhilfe, wie in Abbildung 3-16 gezeigt, verwendet, welche mittels einer Zwinge befestigt wurde und somit den Einschraubwinkel vorgab. Anschließend wurde der Prüfkörper mit Schraube in den Prüfaufbau eingehängt, gesichert und die Prüfung durchgeführt. Dabei wurde die Kraft solange gesteigert, bis die Schraube aus dem Prüfkörper gezogen wurde. Die Zeit, in der ein Versagen stattfinden soll, ist in ON EN 1382 [44] angegeben. Aufgrund der Vermutung, dass schnelles Eindrehen Risse verursacht und dies auch bei schnellem Herausziehen gelten würde, wurde die Zeit für das Versagen nach ON EN 1382:1999 [49] bei 90 ± 30 sec. angestrebt. Dazu wurde verformungsgesteuert eine Geschwindigkeit für BU / BI / BB von 1,8 / 1,3 / 1,8 mm/min gewählt.



Legende: A: Einschraubhilfe, B: Prüfkörper

Abbildung 3-16 Eindreihen der Schraube mit Einschraubhilfe

Prüfungen an Schraubenreihen

Auf dem Prüfkörper wurden die Einschraubpunkte markiert und vorgekört, um ein exaktes Ansetzen der Schraube zu ermöglichen. Um eine gleichmäßige Belastung der Schrauben zu erreichen, wurden Distanzhölzer zwischen der Stahllochleiste und dem Prüfkörper eingebaut und darauf mit einem Drehmoment von 10 Nm die Schrauben vorgespannt. Diese Stahllochleiste wurde in die Gelenkkette eingeschoben und die Prüfung durchgeführt. Bei der Prüfdurchführung wurden die Distanzhölzer locker und konnten herausgenommen werden. Die Geschwindigkeit der Traverse wurde von anfangs 2,5 mm/min für Reihen mit drei Schrauben auf 1 mm/min für Reihen mit zwei Schrauben heruntersetzt.

Prüfungen an Schraubengruppen

Die Prüfgeschwindigkeit und das Belastungsverfahren wurden an die ON EN 26891 [42] angelehnt. Auf den Prüfkörper wurden die Einschraubpunkte angezeichnet und vorgekört, um ein exaktes Ansetzen der Schrauben zu erreichen. Der Prüfkörper wurde unter die Lagerungsplatte mit Holzkeilen leicht fixiert, die Schrauben durch die Lochplatte gesteckt und mit dem Akkuschrauber langsam bis kurz vor Erreichen der Einschraubtiefe eingedreht. Danach wurde die Weg- und Kraftmessung gestartet. Um ein gleichmäßiges Vorspannen der Schrauben zu erreichen, wurden diese mit einem Drehmomentschlüssel angezogen und somit vorgespannt. Die Reihenfolge beim Anziehen der Schrauben war abwechselnd diagonal gegenüberliegend. Für Buche und in Übereinstimmung mit ETA-12/0373 [39] wurde ein Drehmoment von 26 Nm verwendet. Bei den anfangs noch geringer gewählten Drehmomenten konnten die Schrauben nicht soweit eingeschraubt werden, dass sie die untere Einbauplatte kraftschlüssig berührten und somit vorgespannt werden konnten. Bei den Birkenprüfkörpern wurde mit 20 Nm angezogen, da die Schrauben bereits bei geringerem Drehmoment vorgespannt werden konnten. Für BauBuche wurde mit 26 Nm vorgespannt. Der Anziehvorgang wurde bei Bedarf so lange wiederholt, bis jede Schraube den gewünschten Eindrehwiderstand erreichte. Danach wurde die Prüfung in Anlehnung an den Prüfablauf gemäß ÖNORM EN 26891 [42] weggesteuert durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit wurde zuerst für Buche mit 0,4 mm/min angenommen und danach je nach Gruppenanordnung und Holzart zwischen 0,4 mm/min und 1,6 mm/min variiert, um in einen Gesamtzeitfenster zwischen 10 min und 15 min zu agieren. Zunächst wurden die Prüfkörper bis zu 50 % der erwarteten Bruchkraft beansprucht und die Last anschließend auf

diesem Niveau für 30 Sekunden gehalten. Anschließend wurde die Kraft auf 10 % der erwarteten Bruchkraft mit derselben Geschwindigkeit abgesenkt und abermals für 30 Sekunden auf diesem Niveau gehalten. Anschließend wurde die Kraft erneut auf 50 % der erwarteten Bruchkraft gesteigert und wiederum für 30 Sekunden gehalten, um währenddessen die erschütterungsempfindlichen Wegaufnehmer abzunehmen. Im letzten Abschnitt wurde die Kraft bis zum Versagen des Anschlusses im Prüfkörpers gesteigert. In Abbildung 3-17 ist ein exemplarischer Verlauf einer Prüfung dargestellt.

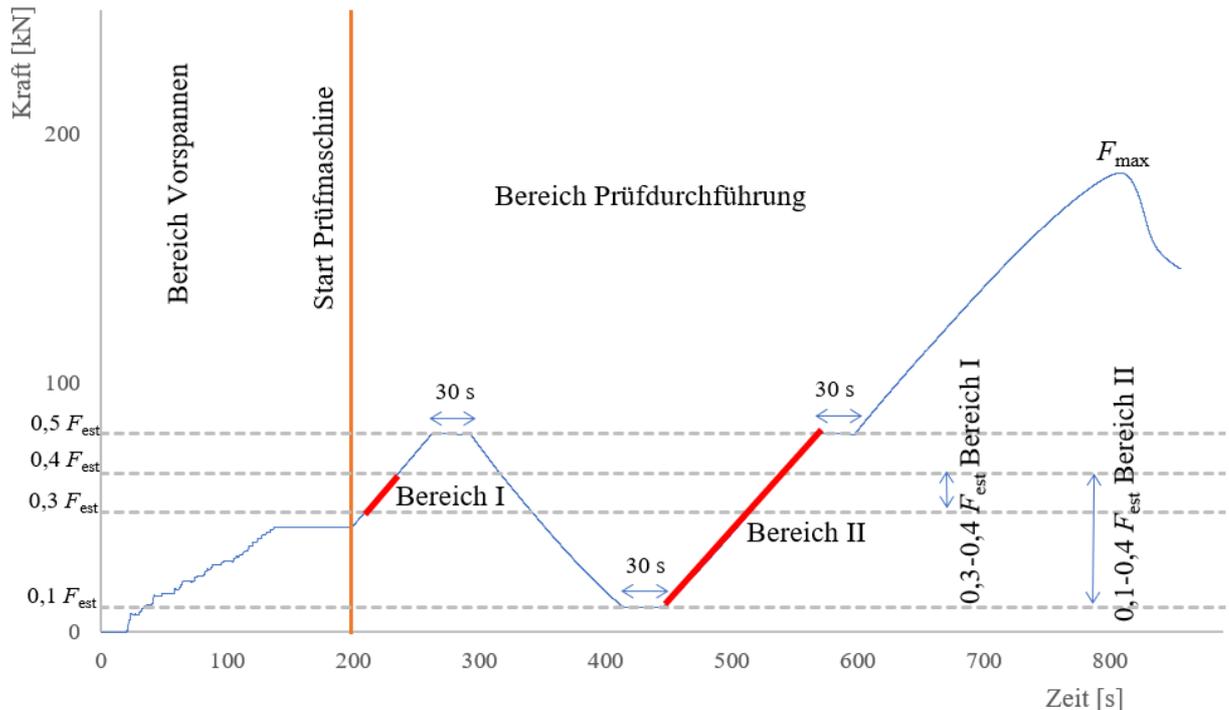


Abbildung 3-17 Exemplarischer Prüfablauf einer Gruppenprüfung aus Serie 6; $a_1 = 7 \text{ d}$, $a_2 = 5 \text{ d}$, $l_{ef} = 56 \text{ mm}$, $v = 1,0 \text{ mm/min}$

Die Dokumentation der Prüfungen erfolgte mit einem parallel geführten Prüfprotokoll, siehe Anhang D. Darin sind ebenso akustische wie visuelle Beobachtungen betreffend Rissbildung während der Prüfung, Unregelmäßigkeiten und Besonderheiten sowie das Prüfdatum schriftlich angeführt.

3-3.4 NACHBEREITUNG DER PRÜFKÖRPER

Im Anschluss an die Prüfungen wurden noch weitere Parameter bestimmt.

Bestimmung der Rohdichte

Zur Bestimmung der Rohdichte wurde aus jedem Prüfkörper eine Scheibe unmittelbar neben der Gruppe und quer zur Faserrichtung herausgeschnitten, um die Rohdichte sowie den Feuchtegehalt des Prüfkörpers gemittelt über alle Lagen zu bestimmen. Das Herausschneiden dieser Probe erfolgte im Anschluss an die Prüfdurchführung. Die Probe wurde gewogen und mittels elektronischer Schiebelehre vermessen. Die, auf eine Referenzholzfeuchte von 12 % umgerechnete Rohdichte ρ_{12} wurde gemäß ON EN 384 [50] nach Gleichung (3.5) bestimmt.

$$\rho_{12} = \rho_u \left(1 + (12 - u) \frac{0,5}{100} \right) \quad (3.5)$$

Dabei sind:

- ρ_{12} die Rohdichte des Prüfkörpers, bei einer rechnerischen Referenzholzfeuchte von 12 % [kg/m³]
- ρ_u die Rohdichte des Prüfkörpers, bei dem Feuchtegehalt u [kg/m³]
- u der Feuchtegehalt des Prüfkörpers [%]

Bestimmung der Holzfeuchte

Um den Feuchtegehalt der Probe zu bestimmen wurde die Probe bis zum Darrgewicht gemäß ON EN 13183 [51] getrocknet. Der Feuchtegehalt ergibt sich gemäß folgender Formel:

$$u = \frac{m_1 - m_0}{m_0} 100 \quad (3.6)$$

Dabei sind:

- m_0 die Masse des Prüfkörpers nach dem Trocknen [g]
- m_1 die Masse des Prüfkörpers nach der Prüfung [g]
- u der Feuchtegehalt des Prüfkörpers [%]

Aufschneiden und Dokumentation der Risse

Alle geprüften Prüfkörper wurden nach der Prüfung an einer Stelle zwischen den Schrauben und quer zur Faserrichtung durchgeschnitten, beschriftet und fotografisch dokumentiert, um die spätere Nachbearbeitung zu erleichtern. Die Prüfkörper wurden, wie in Abbildung 3-18 gezeigt, aufgeschnitten und die Querschnittsfläche abgelichtet. Im Querschnitt wurden die Lage und die Ausbreitung von vorhandenen Rissen dokumentiert und analysiert.



Abbildung 3-18 Aufgeschnittener Prüfkörper

Aufspalten in Folge einem Versagen in bzw. im Bereich der Klebefuge

Bei der Durchführung der Prüfungen trat ein zusätzlicher Versagensmechanismus auf, welcher im Vorfeld nicht bedacht wurde, nämlich das Versagen der Klebefuge. Dieses Versagen wurde bei 14 von insgesamt 74 Prüfungen in Buche beobachtet. Dabei kam es im Bereich der maximalen Prüfkraft oder nach Erreichen der maximalen Prüfkraft zum Aufreißen oder teilweisen Aufreißen der Klebefuge.

Aufgrund der Dokumentation im Protokoll und der Durchsicht der Rissbilder wurden letztendlich nur acht Prüfungen dem Versagen Klebefläche zugeordnet. Bei allen anderen Prüfungen wurde das Versagen der Klebefuge als Folgeversagen klassifiziert.

Um bei den nachfolgenden Prüfungen ein Versagen der Klebefläche zu vermeiden, wurde die effektive Einschraubtiefe von 48 mm auf 56 mm erhöht. Dies wurde in den Serien 6,7,11 und 18 aus Buche umgesetzt. Alle Serien aus Birke und BauBuche wurden daran angepasst, um eine Vergleichbarkeit der Holzarten ohne Einfluss der effektiven Einschraubtiefe sicherzustellen.

Um genauere Erkenntnisse daraus zu gewinnen und die Versagensfläche und ihr Ausmaß definieren zu können, wurde erst nachdem eine Probe für die Feuchte- und Rohdichtebestimmung entnommen und der Prüfkörper zerschnitten wurde, eine Auswertung jener Prüfkörper als sinnvoll erachtet und durchgeführt, bei denen die Klebefuge versagte. Da nur noch etwas mehr als die Hälfte der Prüfkörper bezogen auf die Längsrichtung übrig war, wurde dieser Teil näher untersucht. Dabei wurden die Prüfkörper entlang des

Risses unter Zuhilfenahme von Hammer und Meißel aufgespalten. Der Anteil der Rissfläche, der während der Prüfung aufspaltete und jener, der durch das händische Aufspalten entstand, konnte dabei nicht differenziert werden. Um den Anteil der Klebefuge an der Rissfläche zu quantifizieren, wurde diese mittels einer Folie mit einem 10 mm Raster abgezählt, siehe Abbildung 3-19. Erfasst wurden dafür jene Flächen, auf denen reine Kleberspuren ohne Holzfasern zu sehen waren. Alle aufgespaltenen Prüfkörper wurden dokumentiert, siehe Tabelle 3-6.



Abbildung 3-19 *Quantifizierung des Klebefugenversagens*

Bei der Quantifizierung des Anteils der Klebefläche wurde die Fläche zwischen Auflager und Mitte der Schraubengruppe abgezählt und diese mit zwei multipliziert, siehe Abbildung 3-20.



Abbildung 3-20 *Auswertung Anteil Klebefugenversagen, halbe Fläche zwischen Mitte der Schraubengruppe und Auflagerrand*

Zusätzlich wurde die Fläche innerhalb der Schraubengruppe bis zur Mitte der Schraubengruppe abgezählt und mit zwei multipliziert, wie in Abbildung 3-21 dargestellt.



Abbildung 3-21 Auswertung Anteil Klebefugenversagen, halbe Fläche innerhalb der Schraubengruppe

In Tabelle 3-6 ist die Auswertung bezüglich der Klebeflächen aufgelistet. Dabei ist F_A , wie in Abbildung 3-20 gezeigt, die Fläche zwischen der Mitte der Schraubengruppe und dem Auflager. $F_{A,k}$ ist jene Fläche mit sichtbaren Klebstoffrückständen auf der Holzoberfläche. F_g ist in Abbildung 3-21 dargestellt und spiegelt die halbe Fläche innerhalb der Schraubengruppe wider, wobei $F_{g,k}$ die Fläche mit augenscheinlichem Klebstoffversagens darstellt. Darin sind auch die im Prüfprotokoll notierten Versagensmechanismen notiert. Es steht H für Herausziehen, A für Aufspalten, B für Blockscheren und K für Klebefuge.

Tabelle 3-6 Auswertung Klebefugenversagen

| Serie | Nr. | Vers. | F_g | $F_{g,k}$ | $F_g / F_{g,k}$ | F_A | $F_{A,K}$ | $F_A / F_{A,K}$ |
|-------|-----|-------|--------------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| [-] | [-] | [-] | [cm ²] | [cm ²] | [%] | [cm ²] | [cm ²] | [%] |
| 1 | 1 | H+A | 64 | 38 | 59,4 | 166 | 79 | 47,7 |
| 1 | 2 | H+A | 64 | 38 | 59,4 | 166 | 49 | 29,6 |
| 1 | 6 | H+A | 64 | 54 | 84,4 | 166 | 64 | 38,6 |
| 2 | 1 | B+K | 32 | 7 | 21,9 | 166 | 23 | 13,9 |
| 2 | 2 | B+K | 32 | 13 | 40,6 | 166 | 15 | 9,1 |
| 2 | 3 | B+K | 32 | 6 | 18,8 | 166 | 17 | 10,3 |
| 2 | 5 | B+K | 32 | 8 | 25,0 | 166 | 79 | 47,7 |
| 2 | 6 | B+K | 32 | 14 | 43,8 | 166 | 59 | 35,6 |
| 3 | 1 | B | 32 | 18 | 56,3 | 124 | 47 | 37,8 |
| 3 | 5 | B | 32 | 9 | 28,1 | 124 | 10 | 8,1 |
| 6 | 3 | H+A | 45 | 42 | 93,8 | 145 | 140 | 96,6 |
| 11 | 2 | B+K | 24 | 10 | 41,7 | 166 | 11 | 6,6 |
| 11 | 4 | B+K | 24 | 10 | 41,7 | 166 | 10 | 6,0 |
| 11 | 5 | K | 24 | 22 | 91,7 | 166 | 137 | 82,5 |

3-3.5 MESSWERTE UND BEURTEILUNG DES PRÜFVERLAUFES

3-3.5.1 Prüfkraft

Ausziehfestigkeit / maximale Ausziehspannungen bei Versagen

Um die aus Prüfungen ermittelten Maximalkräfte miteinander vergleichen zu können, werden die Ausziehfestigkeit, siehe Gleichung (3.7), bzw. die maximalen Ausziehspannungen bei Versagen, siehe Gleichung (3.8), der Verbindung mittels der Mantelfläche umgerechnet:

$$f_{ax-max} = \frac{F_{ax-max}}{d \times l_{ef} \times \pi} \quad (3.7)$$

$$\sigma_{ax-max} = \frac{F_{ax-max}}{d \times l_{ef} \times \pi} \quad (3.8)$$

Dabei sind:

f_{ax-max} ... der Ausziehparameter [N/mm²]

σ_{ax-max} ... die maximale Spannung bei Versagen [N/mm²]

F_{ax-max} ... die maximale Ausziehlast [N]

d der Gewinde-Außendurchmesser einer Schraube [mm]

l_{ef} die effektive Eindringtiefe des Verbindungsmittels [mm].

Prüfkraft beim ersten Versagen F_{1st}

In der Masterarbeit von Mahlknecht [8] wurde Blockscherversagen bei einer axial beanspruchten Schraubengruppe untersucht und ein teilweiser Einbruch im Weg-Kraft-Verlauf nach oder im linear elastischen Bereich beobachtet und als erstes Versagen beschrieben. Dabei wurde von einer Schädigung im Holz ausgegangen. Quantifiziert wurde die Kraft beim ersten Versagen F_{1st} , wenn eine Abminderung der Steifigkeit um mindestens 10 % und ein Kraftabfall von mindestens 4 % festgestellt wurde. Mahlknecht und Brandner [10] interpretieren dies als Versagen eines Teiles der Begrenzungsflächen der Verbindung. Im Anschluss ist eine Kraftumlagerung und -steigerung verbunden mit einer geringeren Steifigkeit grundsätzlich möglich, aber nicht in allen Prüfungen angezeigt.

In Verbindung damit, wurde auch bei der Auswertung der Prüfdaten dieser Arbeit auf Einbrüche im Weg-Kraft-Verlauf geachtet. Ein erstes Versagen F_{1st} wurde bei einigen Prüfungen beobachtet. Dabei wurde akustisch und / oder visuell das Aufspalten des Holzes festgestellt und im Prüfprotokoll dokumentiert. Jedoch konnte meist kein deutlicher Abfall der Kraft und / oder der Steifigkeit festgestellt werden. Bei den Prüfungen mit BauBuche wurde vermehrt ein deutlicher Abfall der Kraft und der Steifigkeit sowie ein anschließender Wiederanstieg der Last beobachtet, jedoch geschah dies bereits im Bereich der Maximallast wodurch eine Unterscheidung nach F_{1st} und F_{max} als wenig sinnvoll erscheint.

Versagen bei der maximalen Prüfkraft F_{max}

Der Versagensverlauf und zuordenbare Versagensmechanismen wurden kontinuierlich protokolliert. Im weiteren Verlauf der Bewertung der Prüfungen wurden für eine eindeutige Zuordnung eines Versagensmechanismus der Prüfverlauf, Notizen im Prüfprotokoll und die Beurteilung vorhandener Risse im Querschnitt berücksichtigt.

Dabei wurden folgende Versagensformen festgestellt:

- Versagen auf Herausziehen,
- Versagen auf Blockscheren,
- Versagen der Schraube auf Zug,
- Versagen auf Reihenscheren,
- Versagen der Klebefuge.

3-3.5.2 Wegmessung und Steifigkeit

Im Zuge der Auswertung der Daten für die Prüfungen wurde auch die Steifigkeit K_{ser} der Verbindung und die Querdrucksteifigkeit des Holzes am Auflager ermittelt. Die Bestimmung der Steifigkeit erfolge gemäß ON EN 26891 [42] bei Erstbelastung im Bereich I und nach dem Entlasten erneut im Bereich II. Im Bereich I, wie beispielsweise beim Prüfverlauf in Abbildung 3-17 dargestellt, wurde die Vorspannung der Schrauben vorgenommen. Durch das schrittweise Aufbringen des Anziehdrehmomentes an die einzelnen Schrauben, variiert die Weg-Kraft-Kurve stark. Deshalb wurde dieser Bereich nicht ausgewertet. Ab dem Start der Prüfmaschine wurde ein kleiner Bereich zwischen 0,3 und 0,4 F_{est} ausgewertet. Der Bereich der Wiederbelastung wurde zur Gänze ausgewertet, somit von 0,1 bis 0,4 F_{est} . In Abbildung 3-22 ist ein exemplarischer Weg-Kraft-Verlauf dargestellt.

Für die Auswertung der Steifigkeit als Verschiebungsmodul wurde ein linearer Bereich mit mindestens einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,999$ angestrebt. War dies im vorgegebenen Bereich nicht möglich, so wurde dieser verkleinert, bis das Bestimmtheitsmaß erreicht wurde.

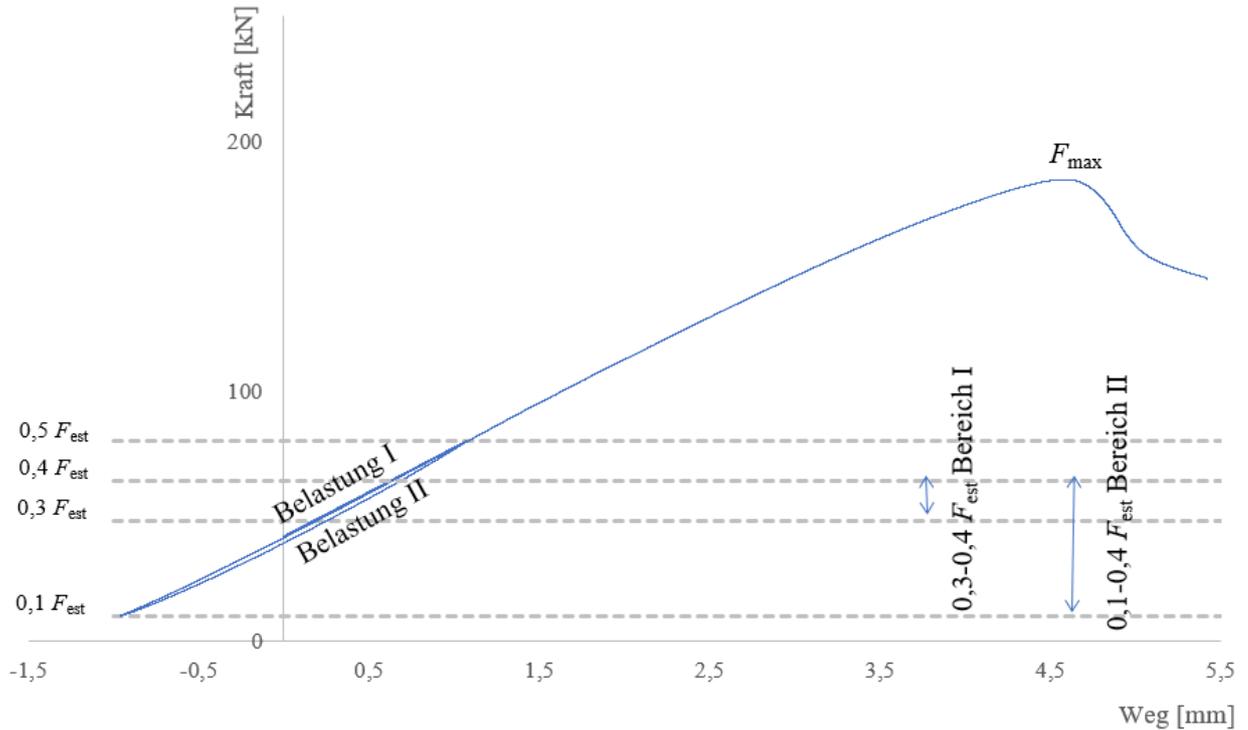


Abbildung 3-22 Weg-Kraft-Diagramm für die Bestimmung der Steifigkeiten K_I und K_{II} einer Gruppenprüfung aus Serie 6; $a_1 = 7$ d, $a_2 = 5$ d, $l_{ef} = 56$ mm, $v = 1,0$ mm/min

Um den Verschiebungsmodul der Prüfung zu ermitteln wurde Gleichung (3.9) verwendet.

$$K = \frac{\Delta F}{\Delta w} \quad (3.9)$$

Die darin vorkommenden Weggrößen beschreiben die Differenz des Mittelwertes der Wegaufnahme oben und des Mittelwertes der Wegaufnahme unten, wie in Abbildung 3-14 dargestellt. Die Kraftgrößen beschreiben die Differenz zwischen den wirkenden Kräften am Ende und zu Beginn des Auswertebereichs.

3-3.5.3 Statistische Bewertung

Zur Bestimmung der charakteristischen Werte aus den Prüfergebnissen legt die ON EN 14358 [52] statistische Verfahren fest. Die Eigenschaften der Grundgesamtheit werden mittels charakteristischer Werte abgeschätzt. Bei der Auswertung werden das 5 %-Quantil und das 95 %-Quantil angegeben.

Für die Festigkeitseigenschaften wurde eine logarithmische Normalverteilung angenommen. Für die Rohdichte und die Feuchte wurde eine Normalverteilung angenommen.

Der Lageparameter der logarithmisch normalverteilten Variable \bar{y} wird nach Gleichung (3.10) und der Streuungsparameter s_y nach Gleichung (3.11) ermittelt.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(m_i) \quad (3.10)$$

$$s_y = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(m_i) - \bar{y})^2}, 0,05 \right\} \quad (3.11)$$

Das 5 %-Quantil einer logarithmisch normalverteilten Variable wird nach Gleichung (3.12) und das 95 %-Quantil nach Gleichung (3.13) berechnet.

$$m_k = \exp(\bar{y} - k_s(n) s_y) \quad (3.12)$$

$$m_k = \exp(\bar{y} + k_s(n) s_y) \quad (3.13)$$

Der Lageparameter der normalverteilten Variable \bar{y} wird nach Gleichung (3.14) und der Streuungsparameter s_y nach Gleichung (3.15) berechnet.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad (3.14)$$

$$s_y = \max \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{y})^2} \\ 0,05 \bar{y} \end{array} \right. \quad (3.15)$$

Das 5 %-Quantil einer normalverteilten Variable wird nach Gleichung (3.16) und das 95 %-Quantil nach Gleichung (3.17) berechnet.

$$m_k = \exp(\bar{y} - k_s(n) s_y) \quad (3.16)$$

$$m_k = \exp(\bar{y} + k_s(n) s_y) \quad (3.17)$$

Bei der Bestimmung von $k_s(n)$ darf ein vereinfachter Ausdruck nach Gleichung (3.18) laut ON EN 14358 [52] verwendet werden. In der Weiteren Auswertung wird für $k_s = 1,645$ eingesetzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass unendlich viele Prüfkörper betrachtet werden und so der Einfluss der Gruppengröße ausgeschaltet wird. In der Auswertung werden Referenzserien mit einem Stichprobenumfang von 20 pro Serie mit Gruppenserien von sechs Prüfkörper je Serie miteinander verglichen. Da in den Referenzserien der Stichprobenumfang viel größer ist als in den Gruppenprüfungen würde sich somit eine Verzerrung zu Ungunsten der Gruppen ergeben.

$$k_s(n) = \frac{6,5n+6}{3,7n-3} \quad (3.18)$$

Dabei sind:

- \bar{y}der Lageparameter,
- m_k das 5 %-Quantil der Zufallsgröße m ,
- n die Anzahl der Proben,
- s_y der Streuungsparameter.

KAPITEL 4: ERGEBNISSE UND DISKUSSION

4-1 HOLZFEUCHTE

Die Holzfeuchte der Serien in Buche liegt zwischen 9,1 % und 12,6 %. Die Mittelwerte und Variationskoeffizienten (CoV) der Serien sind in Tabelle 4-2 angeführt. Wie in Abbildung 4-1 gezeigt, ist eine Vergleichbarkeit der Serien bezüglich der Holzfeuchte gegeben.

Die verwendeten Prüfkörper in Birkenholz weisen eine Holzfeuchte zwischen 10,3 % und 12,1 % auf. Die Daten zu den Serien in Birke sind in Tabelle 4-1 aufgelistet. Wie die Verteilung der Boxplots in Abbildung 4-2 darstellt, ist eine Vergleichbarkeit der Serien gegeben.

Die Prüfkörper in BauBuche weisen eine Holzfeuchte zwischen 7,1 % und 8,9 % auf, siehe Tabelle 4-1. Die Holzfeuchtwerte der Gruppenprüfkörper liegen dabei aufgrund des gleichen Prüfkörperaufbaus sehr nah beieinander. Die Einzelprüfkörper haben im Vergleich zu den Gruppenprüfkörpern einen höheren Holzfeuchtegehalt.

Tabelle 4-1 *Mittlere Holzfeuchte, Rohdichte und CoV aller Serien in Birke und BauBuche*

| Serie | Anzahl PK | $\rho_{12,mean}$ | CoV [$\rho_{12,mean}$] | u_{mean} | CoV [u_{mean}] |
|---|-----------|----------------------|-----------------------------|------------|-----------------------|
| Einheit | [-] | [kg/m ³] | [%] | [%] | [%] |
| BI | 20 | 589 | 5,4 | 10,7 | 2,3 |
| 9 (BI) | 6 | 617 | 6,5 | 10,8 | 1,4 |
| 13 (BI) | 6 | 591 | 5,0 | 11,1 | 4,7 |
| BB | 20 | 788 | 2,1 | 8,4 | 2,7 |
| 10 (BB) | 2 | 805 | ¹⁾ | 7,3 | ¹⁾ |
| 14 (BB) | 3 | 817 | 1,1 | 7,3 | 0,4 |
| 19 (BB) | 4 | 817 | 0,2 | 7,1 | 0,2 |
| 20 (BB) | 4 | 724 | 5,7 | 10,7 | 5,9 |
| ¹⁾ Serie mit nur zwei Werten | | | | | |

In Abschnitt 3-2.1 wurde bereits die Bestimmung der Holzfeuchten an Stichproben im Rahmen der ersten Bearbeitungsschritte am Ausgangsmaterial beschrieben. Bezugnehmend auf die stichprobenartige Messung fällt bei Buche keine Änderung der Holzfeuchte auf. Werden die Holzfeuchten, welche Schweiger [4], ermittelte $u_{BU,mean} = 9,4 \%$ $CoV = 3,2 \%$, $u_{BI,mean} = 12,3 \%$ $CoV = 2,4 \%$ und $u_{BB,mean} = 7,3 \%$ $CoV = 2,1 \%$ verglichen, wobei die Prüfkörpergröße stark ähnelt und das gleiche Holz verwendet wurde, ist erkennbar, dass bezogen auf die Serien der Einzelschraube BU und BI die Holzfeuchte zugenommen bzw. abgenommen hat und sich bei BU und BI im Mittel bei 10,7 % eingependelt hat. Für BauBuche wurde eine Steigerung der Holzfeuchte von 7,3 % auf 8,4 % der Einzelprüfkörper und ein Gleichbleiben der Feuchte

bezogen auf die Gruppenprüfkörper beobachtet. Der dabei betrachtete Zeitraum geht von Ende November 2019 bis Mitte Februar 2020.

Bei einer Lagerung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit stellt sich laut Kollmann [53] für Rotbuche eine Ausgleichsholzfeuchte von ca. 10 % ein, aber nur dann, wenn das Buchenholz mit einer geringeren Holzfeuchte eingelagert wird. Dies stimmt mit der Serie BU gut mit 10,7 % überein.

Tabelle 4-2 *Mittlere Holzfeuchte, Rohdichte und CoV aller Serien in Buche*

| Serie | Anzahl PK | $\rho_{12,mean}$ | CoV [$\rho_{12,mean}$] | u_{mean} | CoV [u_{mean}] |
|----------------|------------------|------------------------------------|--|------------------------------|------------------------------------|
| Einheit | [-] | [kg/m³] | [%] | [%] | [%] |
| BU | 20 | 724 | 5,7 | 10,7 | 5,9 |
| BUd | 3 | 707 | 6,7 | 10,8 | 4,5 |
| R5d | 5 | 738 | 7,3 | 10,6 | 6,7 |
| R7d | 3 | 748 | 8,3 | 11,3 | 4,5 |
| R8d | 3 | 738 | 5,0 | 10,3 | 3,3 |
| R10d | 10 | 742 | 6,5 | 10,9 | 6,0 |
| R10db | 6 | 760 | 7,0 | 10,6 | 4,8 |
| 1 | 6 | 707 | 9,7 | 10,6 | 8,1 |
| 2 | 6 | 733 | 5,3 | 10,8 | 8,7 |
| 3 | 6 | 743 | 5,9 | 10,8 | 9,6 |
| 4 | 6 | 693 | 4,7 | 10,3 | 5,0 |
| 5 | 5 | 708 | 5,7 | 10,2 | 6,5 |
| 6 | 6 | 742 | 7,3 | 10,9 | 10,0 |
| 7 | 6 | 675 | 4,7 | 10,6 | 8,2 |
| 8 | 6 | 713 | 5,0 | 10,5 | 7,4 |
| 11 | 6 | 735 | 5,2 | 10,7 | 9,5 |
| 12 | 5 | 700 | 8,8 | 10,5 | 9,0 |
| 15 | 3 | 682 | 5,7 | 10,1 | 1,6 |
| 16 | 2 | 739 | ¹⁾ | 10,4 | ¹⁾ |
| 17 | 6 | 737 | 4,7 | 10,4 | 2,1 |
| 18 | 4 | 716 | 5,2 | 10,4 | 8,0 |

¹⁾ Serie mit nur zwei Werten

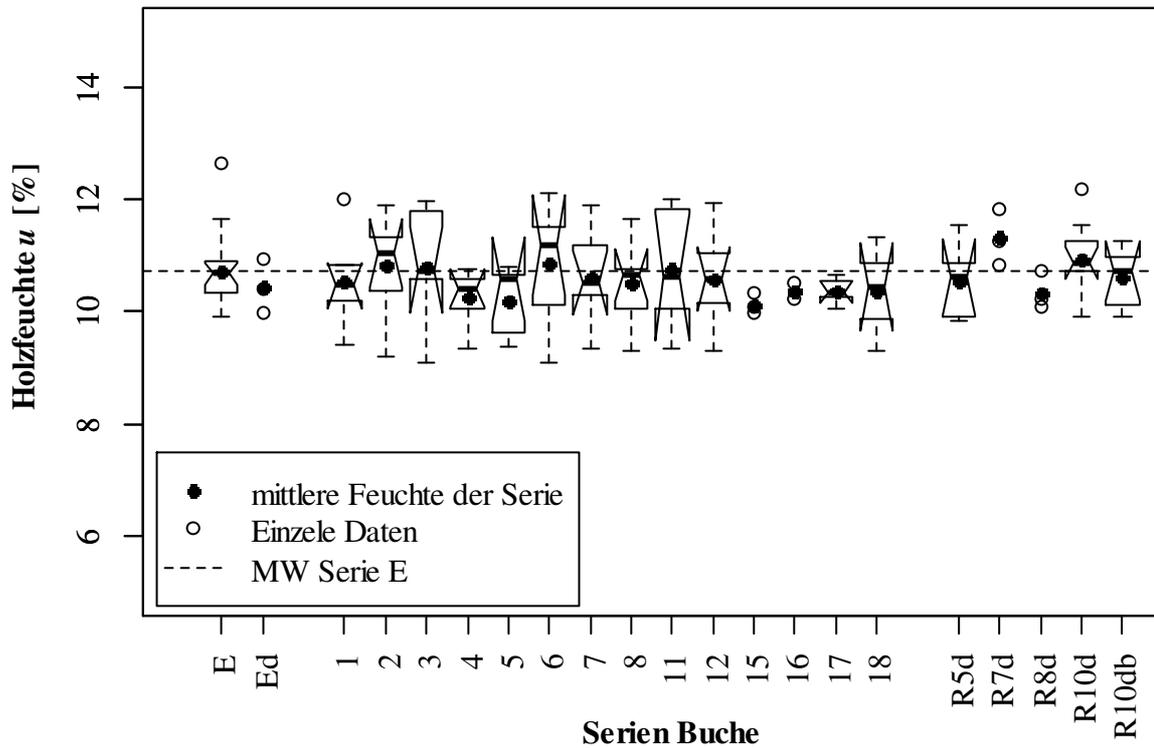


Abbildung 4-1 Boxplot der mittleren Holzfeuchte aller Serien in Buche

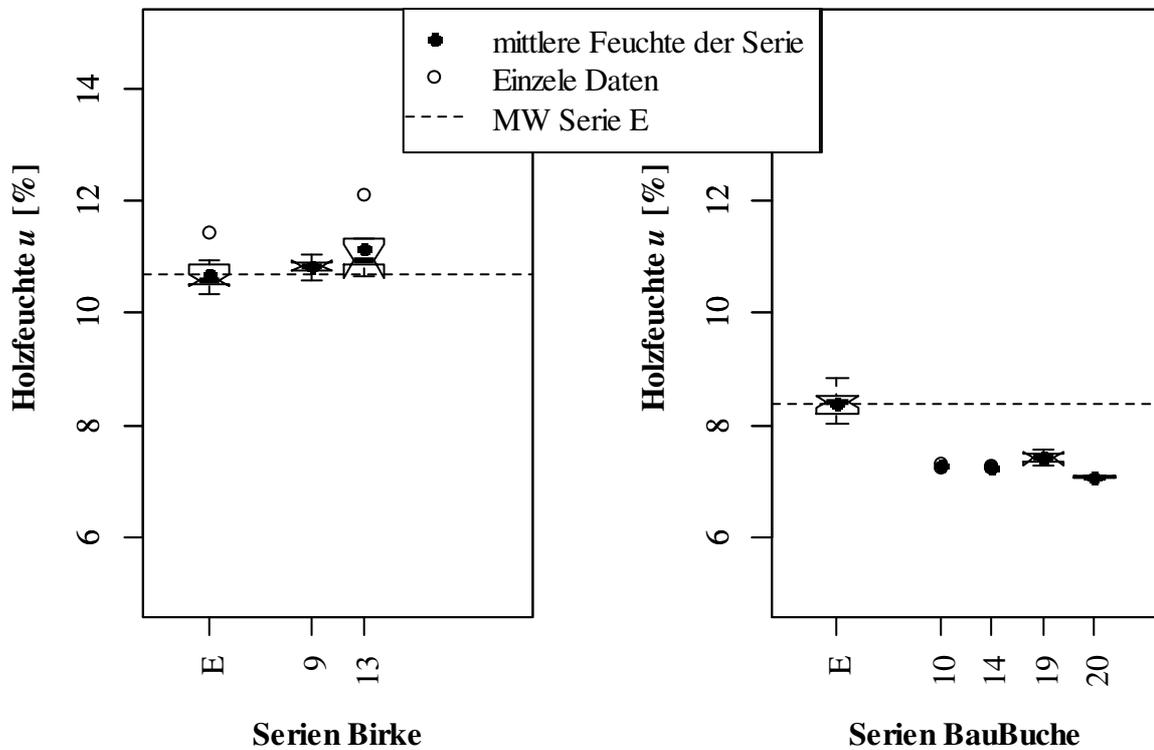


Abbildung 4-2 Boxplot der mittleren Holzfeuchte aller Serien in Birke (links) und BauBuche (rechts)

4-2 ROHDICHTE

Der Auswertung der Rohdichte wurde eine Normalverteilung der Werte zugrunde gelegt und nach ON EN 14358 [52] berechnet. Daraus ergeben sich die in Tabelle 4-2 und Tabelle 4-1 dargestellten Werte. Darin werden die auf eine Referenzholzfeuchtigkeit von 12 % korrigierten Mittelwerte der Rohdichte laut Gleichung (3.5) samt zugehörigen Variationskoeffizienten angegeben.

Der Bereich der Rohdichte der verwendeten Prüfkörper aus Buche liegt zwischen 584 kg/m^3 und 858 kg/m^3 . Die Mittelwerte und die Variationskoeffizienten der jeweiligen Serien sind in Tabelle 4-2 dargestellt. Die Rohdichten der einzelnen Serien sind als Boxplots in Abbildung 4-4 dargestellt. Mit Ausnahme von Serie 7 und 15 weisen alle Serien, wie in Abbildung 4-4 dargestellt, eine Überschneidung des 95 % Konfidenzintervalls des Medians mit Serie E auf.

Die Prüfkörper aus Birke befinden sich in einem Rohdichtebereich zwischen 556 kg/m^3 und 685 kg/m^3 . Die geprüften Serien aus Birke weisen, wie in Abbildung 4-5 links dargestellt, ein Überschneiden der Bereiche des jeweiligen 95 % Konfidenzintervall des Medians auf, womit eine Vergleichbarkeit der Serien hinsichtlich dieses Lageparameters gegeben erscheint. Die dazugehörigen Mittelwerte und Variationskoeffizienten für Birke sind in Tabelle 4-1 dargestellt.

Das verwendete Material mit der höchsten Rohdichte ist BauBuche mit einem Rohdichtebereich zwischen 795 kg/m^3 und 830 kg/m^3 . Aufgrund der Homogenität des Materials BauBuche wurde auch bezüglich der Rohdichte eine Homogenität erwartet. Wie aus der Abbildung 4-5 hervorgeht, ist ein Unterschied zwischen der Serie der Einzelschraube und jenen der Gruppen vorhanden. Um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wurde in die Grafik zusätzlich der Mittelwert und der charakteristische Wert laut Hersteller [54] eingefügt. Es ist ersichtlich, dass die Gruppen im Bereich des vom Hersteller angegebenen Mittelwertes der Rohdichte liegen. Die Rohdichte der Serie der Einzelschraube liegt zwischen dem charakteristischen Wert und dem Mittelwert. Die Prüfkörper für die Einzelschrauben wurden aus einem Trägerstück mit einer Höhe von 360 mm durch Abschneiden von sechs gleich großen Stücken hergestellt. Der Grundbaustoff für GL75 Träger besteht aus 40 mm starken BauBuchen Platten bzw. Lamellen, welche aufeinander verklebt, Träger größerer Ausmaße ergeben. In der Nähe der sekundär-verklebten Fugen kommt es durch den Herstellungsprozess der Platten bzw. Lamellen zu einer lokalen Verdichtung. Frese [55] zeigt in seinen Untersuchungen, dass in BauBuche Platten ein Rohdichteprofil vorzufinden ist. Dabei kann in den Außenschichten als höchste Rohdichte ca. 900 kg/m^3 im Vergleich zu den Innenschichten mit der niedrigsten Rohdichte ca. 700 kg/m^3 auftreten. Die Verteilung der Sekundärfuge im Einzelprüfkörper variierte durch die Herstellung, wie in Abbildung 4-3 gezeigt. Dadurch war in jedem Prüfkörper der Einzelschraubenprüfung mindestens eine Sekundärfuge in unterschiedlicher Tiefe vorhanden und damit wurde ein möglicher Einfluss auf die Ergebnisgrößen ausgeschlossen. Die Unterschiede in der Rohdichte zwischen Einzel und Gruppenprüfkörper können nicht ausreichend erklärt werden.

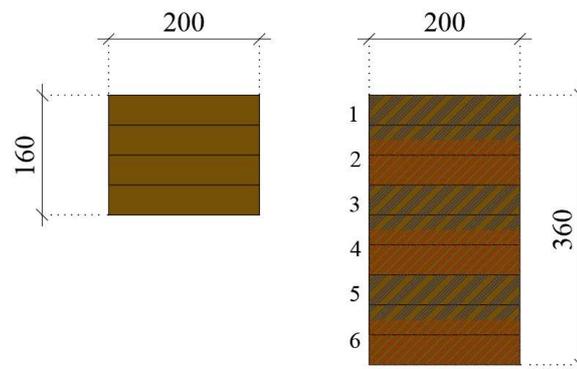


Abbildung 4-3 Querschnitte für die Herstellung der Prüfkörper BauBuche, links: Gruppe, rechts: Einzel

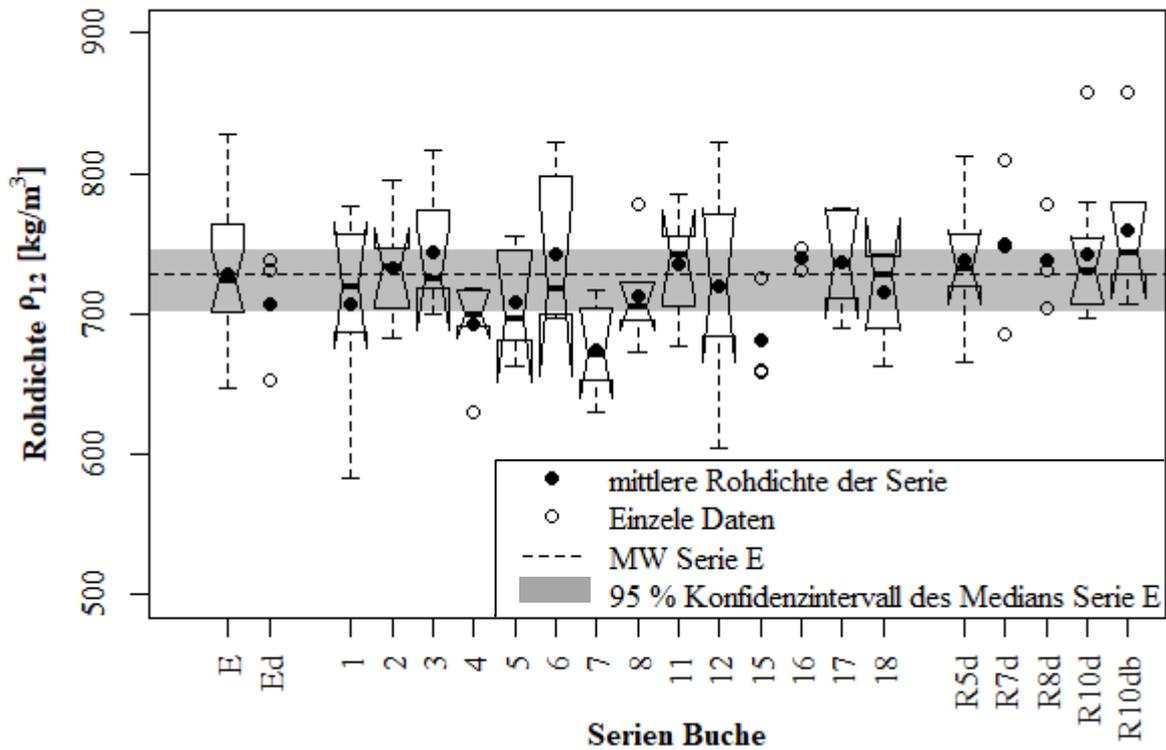


Abbildung 4-4 Boxplot der mittleren Rohdichte ρ_{12} aller Serien in Buche

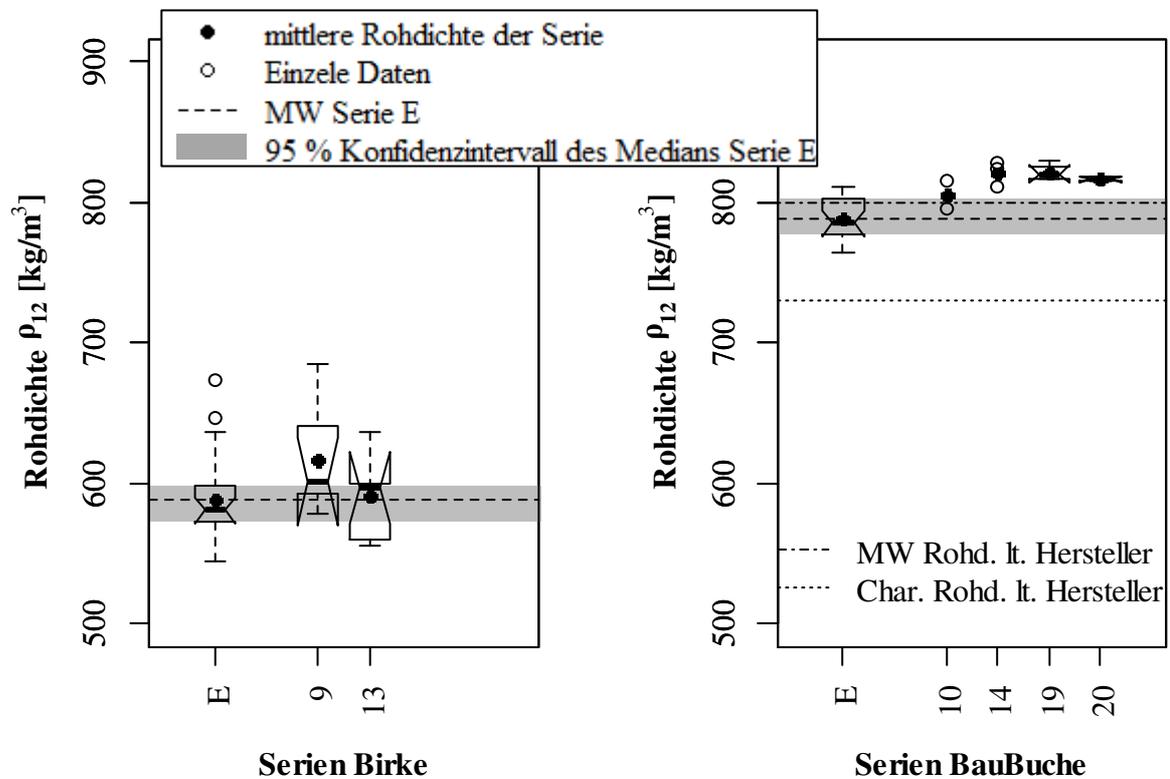


Abbildung 4-5 Boxplot der mittleren Rohdichte ρ_{12} aller Serien in Birke (links) und BauBuche (rechts)

4-3 AUSWERTUNG EINZELSCHRAUBE

Der Bestimmung des charakteristischen Wertes der Ausziehfestigkeit je Serie wurde eine Log-Normalverteilung zugrunde gelegt und nach ON EN 14358 [52] berechnet. Dabei wurde die Ausziehfestigkeit nach Gleichung (3.7) berechnet. In Tabelle 4-3 werden die Ergebnisse und berechneten Werte der Einzelschraubenprüfungen dargestellt. Bezüglich Serie BUd wurden neun Prüfkörper auf ihre maximale Ausziehtragfähigkeit geprüft. Jedoch sind nur bei drei dieser neun Prüfkörper Rohdichte- und Holzfeuchtedaten vorhanden. Aus diesem Grund werden in Abbildung 4-6 und Tabelle 4-3 für die restlichen sechs Prüfkörper die Rohdichten der gesamten Lamelle des jeweiligen Prüfkörpers berücksichtigt.

Tabelle 4-3 Ausziehtragfähigkeit und -festigkeit der Einzelschraube in Buche, Birke und BauBuche

| Serie | [Einheit] | BU | BUd | BI | BB |
|---|----------------------|------|--------------------|------|------|
| $F_{ax-max,mean}$ | [kN] | 17,5 | 19,7 | 10,3 | 22,3 |
| CoV [$F_{max,mean}$] | [%] | 10,2 | 10,7 | 12,1 | 5,8 |
| $f_{ax-max,mean}$ | [N/mm ²] | 14,2 | 16,0 | 9,6 | 15,3 |
| $\rho_{12,mean}$ | [kg/m ³] | 724 | 738 ⁺ * | 589 | 788 |
| CoV [$\rho_{12,mean}$] | [%] | 5,7 | 7,1 ⁺ * | 5,4 | 2,1 |
| u_{mean} | [%] | 10,7 | 10,8* | 10,7 | 8,4 |
| CoV [u_{mean}] | [%] | 5,9 | 4,5* | 2,3 | 2,7 |
| + 6 von 9 Daten wurden mittels der Rohdichte der gesamten Lamelle ermittelt (ohne Feuchtekorrektur) | | | | | |
| * Nur von 3 Prüfkörpern sind Werte vorhanden | | | | | |

In Abbildung 4-6 ist der Zusammenhang zwischen Rohdichte und Ausziehfestigkeit dargestellt. Darin sind die Daten der Einzelschraubenprüfungen in Buche, Birke und BauBuche eingetragen. Die Rohdichtebereiche der Holz- bzw. Produktarten überschneiden sich. Der Anstieg der Ausziehfestigkeit mit steigender Rohdichte ist deutlich erkennbar. In Abbildung 4-6 ist ebenso die Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte zur Bestimmung des charakteristischen Wertes nach Brandner [48] Gleichung (3.2) und des Mittelwertes nach Brandner et al. [38] Gleichung (3.1) eingetragen. Die Prognose nach Brandner et al. [38] und Brandner [48] überschätzt die gemessene Ausziehfestigkeit der Birke und BauBuche leicht.

Zum Vergleich wurde auch die Formel für den 5 %-Quantilwert der Ausziehfestigkeit nach Hübner [17] eingefügt. Damit wird eine gute Einschätzung der Resultate im unteren Ergebnisbereich für Buche und BauBuche erreicht.

Werden die Ausziehfestigkeit der Prüfungen mit den Werten der Vorbemessung verglichen, so ist erkennbar, dass in den Prüfungen die rechnerische Ausziehfestigkeit nicht erreicht wurde. Dabei wurde für die in der Prüfungsvorliegende Rohdichte und Einschraublänge von Buche ein Wert von 18,9 kN errechnet und in den Prüfungen 17,5 kN erreicht. Dies entspricht einer Tragfähigkeit von 93 % der Vorbemessung.

Die Werte der Prüfungen in Birke liegen mit $F_{ax-max,mean} = 10,3$ kN auch um 10 % unter der berechneten Ausziehkraft von 11,6 kN.

Betrachtet man die Ausziehkraft der BauBuche ergibt sich das Ergebnis aus der Prüfung zu $F_{max,mean} = 22,3$ kN und liegt damit um 11 % unter der errechneten Kraft von 25,1 kN.

Zusammenhang Ausziehfestigkeit - Rohdichte

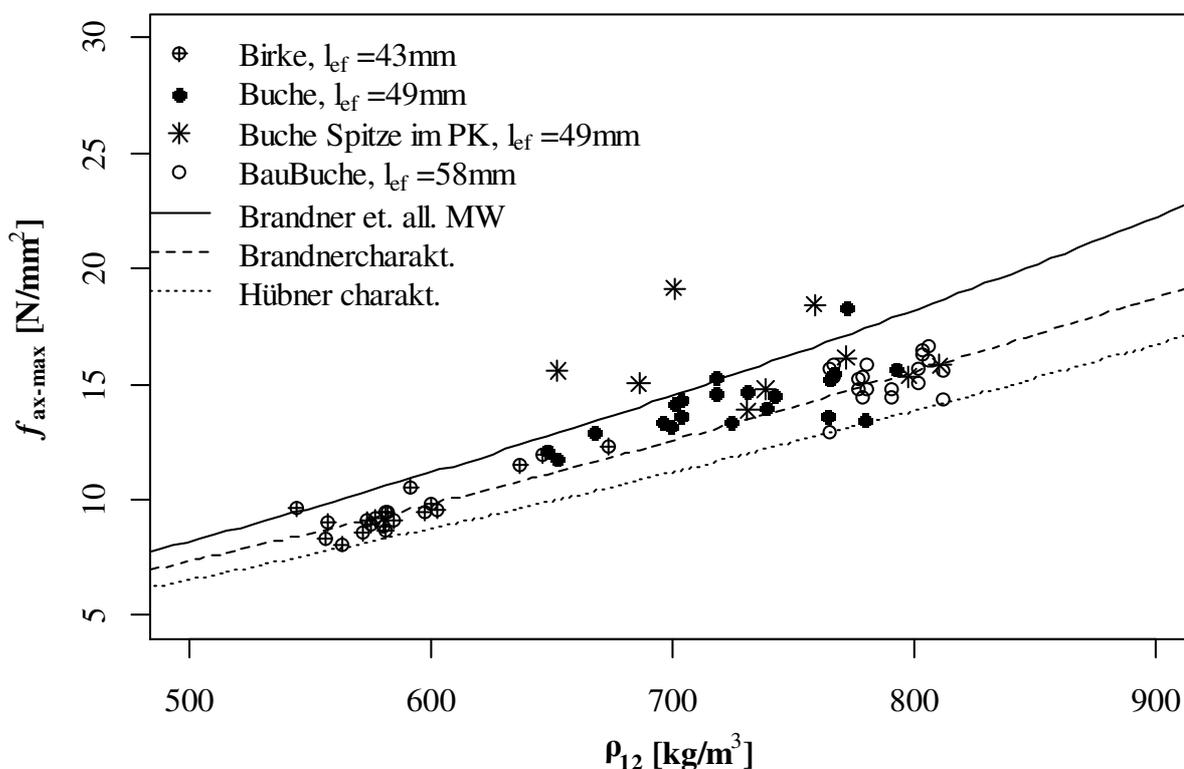


Abbildung 4-6 Ausziehfestigkeit aller Einzelschraubenprüfungen verglichen mit Berechnung nach Brandner et al. [38], Brandner [48] und Hübner [17]

Des Weiteren wurde eine zusätzliche Serie zur Untersuchung der Tragfähigkeit der Schraubenspitze durchgeführt. Dabei wird die Serie BU zur Bestimmung der Ausziehfestigkeit in Buche herangezogen. Bei dieser Serie wird die Schraube in ein 49 mm starkes Brett so weit eingedreht, dass die Schraubenspitze und der an die Spitze anschließende, profilierte Schrauben Kern zur Verdichtung des Schraubenloches außerhalb des Prüfkörpers lag. Beim Austreten der Schraubenspitze an der Unterseite war akustisch ein Knacken zu hören, welches als Hinweis auf ein lokales Spalten gedeutet werden konnte. In der Serie BUd wurde die Schraube in Buchenvollholz mit einer Querschnittshöhe von 73 mm über eine größere Länge von $l_p = 57\text{ mm}$ eingedreht. Somit lag die Schraubenspitze im Prüfkörper. Dies entspricht derselben effektiven Einschraublänge l_{ef} , wenn die Schraubenspitze bis zu einer Länge von $1 d$ als nicht tragend angenommen wird.

Im Vergleich liegt die durchgeschraubte Serie BU mit einer Ausziehfestigkeit $f_{ax,mean}$ von $14,2\text{ N/mm}^2$ unter jener Serie mit der Schraubenspitze im Prüfkörper $f_{ax,mean}$ von $16,0\text{ N/mm}^2$. Da für die Serie BUd keine aussagekräftigen Daten in Bezug auf Rohdichte und Holzfeuchte vorhanden sind, wurde letztendlich die Entscheidung, ob die Schraubenspitze als tragend zu berücksichtigen sei, basierend auf Erfahrungs- und Literaturwerten (Hübner [17], Pirnbacher [46]) wie folgt getroffen: Als Referenzwert für die geplante Serie in Buche BU wird jener der Serie mit Schraubenspitze außerhalb des Prüfkörpers herangezogen. Dabei ist $l_{ef} = l_p - 1 d$.

Im weiteren Verlauf der Auswertung wird die Ausziehfestigkeit nur auf das Ausziehversagen bezogen. Um eine Vergleichbarkeit mit anderen Versagensmechanismen herstellen zu können, werden Ausziehspannungen zum Zeitpunkt des Eintretens des Versagens angegeben. Genannte Spannungen werden rohrichtekorrigiert, um damit den Einfluss der Rohdichte auf die Ergebnisse zu begrenzen.

4-4 AUSWERTUNG SCHRAUBENREIHEN

Um den Einfluss des Abstandes in Faserrichtung der Schrauben zueinander zu untersuchen, wurden Schraubenreihen mit je zwei bzw. drei Schrauben geprüft. Die Ergebnisse dazu sind in Tabelle 4-4 dargestellt. In der weiteren Ausführung dieser Arbeit steht H für Herausziehen, A für Aufspalten, B für Blockscheren, R für Reihenscheren und K für Klebefuge.

Tabelle 4-4 Ausziehtragfähigkeit und -festigkeit der Schraubenreihen in Buche

| Serie | [Einheit] | BU | R5d | R7d | R8d | R10d | R10db |
|------------------------------------|----------------------|------|------|------|------|------|-------|
| Versagen | [-] | H | R | H | H | H | H |
| l_{ef} | [mm] | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 |
| $F_{ax-max,mean}$ | [kN] | 17,5 | 44,6 | 33,2 | 33,6 | 33,2 | 31,7 |
| CoV [$F_{max,mean}$] | [%] | 10,2 | 9,6 | 12,8 | 8,6 | 9,2 | 9,3 |
| $\sigma_{ax-max,ref,mean}$ | [N/mm ²] | 14,5 | 11,6 | 12,4 | 13,0 | 12,7 | 11,3 |
| CoV [$\sigma_{ax-max,ref,mean}$] | [%] | 12,7 | 14,6 | 13,7 | 7,9 | 12,3 | 18,5 |
| $\rho_{12,mean}$ | [kg/m ³] | 724 | 738 | 748 | 738 | 742 | 760 |
| CoV [$\rho_{12,mean}$] | [%] | 5,7 | 7,3 | 8,3 | 5,0 | 6,5 | 7,0 |
| u_{mean} | [%] | 10,7 | 10,6 | 11,3 | 10,3 | 10,9 | 10,6 |
| CoV [u_{mean}] | [%] | 5,9 | 6,7 | 4,5 | 3,3 | 6,0 | 4,8 |

In der Abbildung 4-8 ist erkennbar, dass das Niveau der Einzelschraube mit den Reihenprüfungen mit Ausnahme von Serie R5d erreicht wird. Dabei liegt der Mittelwert der Ausziehspannung bei Versagen der Serie R5d mit 11,6 N/mm² unter der Ausziehfestigkeit der Einzelschraube von 14,5 N/mm². Ab dem Abstand $a_1 = 7d$ zwischen den Schrauben ist kein Unterschied mehr erkennbar. Die Verringerung der Prüfkörperbreite von 160 mm auf 48 mm in Serie R10db ($a_{2,c} = 3d$) bewirkt einen Abfall der Ausziehfestigkeit von 12,7 N/mm² auf 11,3 N/mm². Nur bei Serie R5d wurde Reihenscheren beobachtet, bei allen anderen Serien konnte das Ausziehversagen festgestellt werden. Wie in Abschnitt 4-5 näher erläutert, wurde bei den Gruppenprüfungen kein Reihenscheren beobachtet.

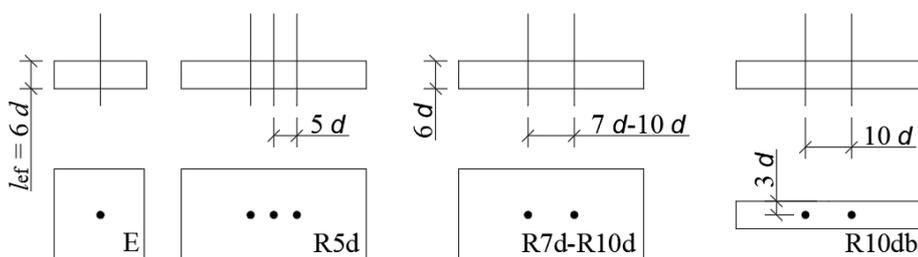


Abbildung 4-7 Piktogramme Variation Reihenprüfungen

Buche - Schraubenreihe

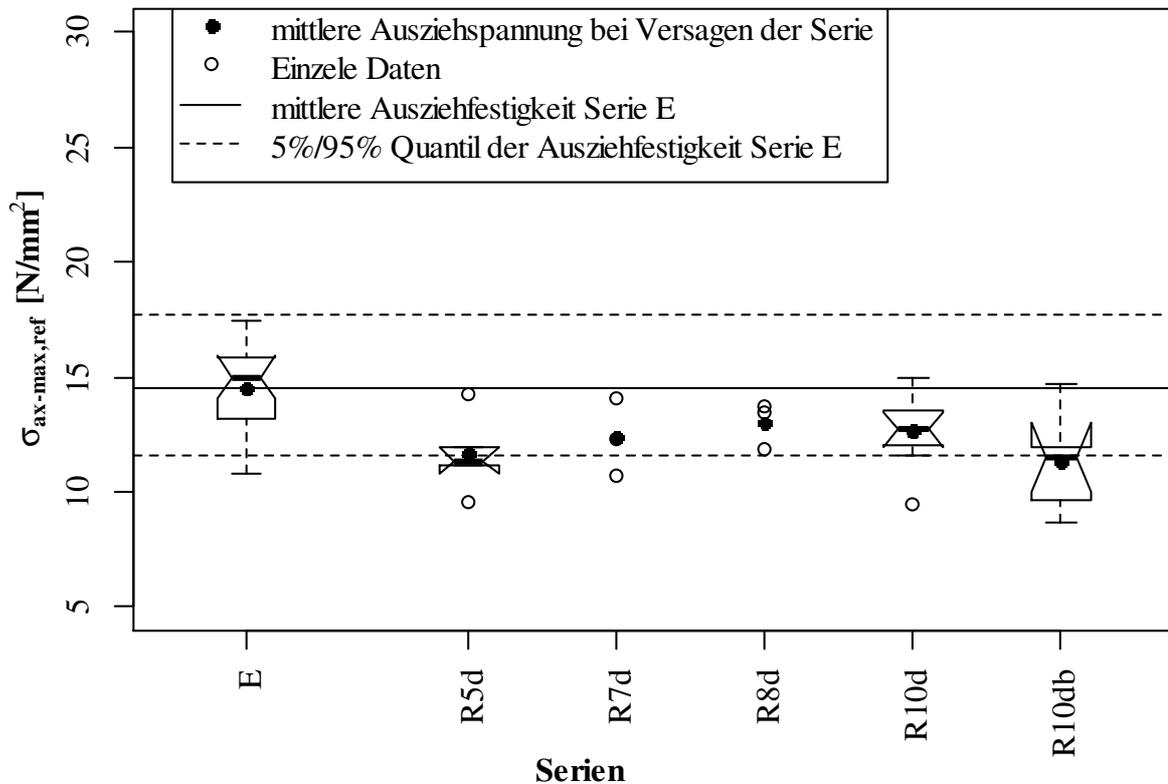


Abbildung 4-8 Boxplot der Ausziehfestigkeiten aller Prüfungen an Schraubenreihen

Vergleich der Prüfergebnisse mit Modellen basierend auf dem Rollschubwiderstand

Die Prüfergebnisse werden mit der in Abschnitt 2-3.3 angeführten Gleichungen (2.1) und (2.2) verglichen. Als Rollschubfestigkeit wird $f_{v,r,mean} = 5,37 \text{ N/mm}^2$ von Erhart und Brandner [56] übernommen. Es sind in Tabelle 4-5 die Werte aus Gleichung (2.2) nach Blaß und Flaig [11] und Gleichung (2.1) nach Plieschounig [7] den Resultaten aus den Prüfreihen und dem n -fachen Widerstand der Einzelschraube gegenübergestellt. Die Formel nach Plieschounig [7] kann mit Serie R5d verglichen werden, da diese Formel für den Versagensmechanismus Reihenscheren entwickelt ist. Der n -fache Widerstand der Einzelschraube kann mit den restlichen Serien verglichen werden, da Ausziehversagen stattfand.

Bezogen auf Serie R5d weichen die Modelle, da sie sehr ähnlich sind, nur gering voneinander ab, nach Blaß und Flaig [11] um 26 % und Plieschounig [7] um 14 % bezogen auf den Mittelwert des Ausziehwerstandes. Die Berechnungen nach den Modellen überschätzen die Tragfähigkeit der Verbindung. Im Fall von beobachteten Ausziehversagen, ab der Reihe R7d, weicht die Berechnung des Widerstandes mit Referenz zur Einzelschraube um 7 % von den Mittelwerten der Prüfungen ab. Dieser Unterschied fällt bei Seire R5d mit 15 % deutlich größer aus, was als Hinweis auf ein anderen Versagensmechanismus gedeutet wird.

Tabelle 4-5 Tragfähigkeitswiderstand der Schraubenreihe - Vergleich Modelle

| Serie | [Einheit] | R5d | R7d | R8d | R10d |
|--|----------------------|------|------|------|------|
| $f_{v,r,mean}$ | [N/mm ²] | 5,37 | 5,37 | 5,37 | 5,37 |
| l_{ef} | [mm] | 49 | 49 | 49 | 49 |
| r | [-] | 3 | 2 | 2 | 2 |
| a_1 | [mm] | 40 | 56 | 64 | 80 |
| $F_{ax-max,mean}$ | [kN] | 44,6 | 33,2 | 33,6 | 33,2 |
| $r \times F_{ax,mean,Einzelschraube}$ | [kN] | 52,5 | 35,0 | 35,0 | 35,0 |
| $F_{r,90,mean}$ nach Blaß und Flaig [11] | [kN] | 59,9 | 47,3 | 51,5 | 59,9 |
| $F_{r,90,mean}$ nach Plieschounig [7] | [kN] | 51,5 | 43,1 | 47,3 | 55,7 |

Die Modelle zur Berechnung des Widerstandes von Schraubenreihen berücksichtigen eine konstante Spannungsverteilung über l_{ef} . In den Prüfungen wurde nur ein oberer Bereich des Holzes aus dem Querschnitt herausgeschert, siehe Abbildung 4-9. Somit wird von einer nicht konstanten Spannungsverteilung über die Einbindelänge ausgegangen.


Abbildung 4-9 Rollschubversagen bei Serie R5d mit $a_1 = 5 d$

4-5 AUSWERTUNG GRUPPE

Im Folgenden werden je nach vorherrschendem Versagensmechanismus der Serie in Ausziehversagen, Blockscherenversagen und Stahlversagen differenziert. Wenn in einer Serie zwei verschiedene Versagensmechanismen in sechs Prüfungen auftraten, z.B. zwei Mal Blockscheren und vier Mal Ausziehversagen, wurde diese Serie auch in der jeweiligen Auswertung dargestellt.

Es ist davon auszugehen, dass Prüfkörper, ohne deren frühzeitiges Versagen auf Blockscheren, mit dem Ausziehversagen einen höheren Widerstand erreicht hätten. Diese Daten werden als rechtszensiert verstanden.

Über die statistische Maximum-Likelihood-Methode für rechtszensierte und lognormalverteilte Daten wird nun der Erwartungswert und die Standardabweichung des Widerstandes geschätzt, für den Fall, dass alle Prüfungen der Serie mit demselben Versagensmechanismus enden. Maßgebender Versagensmechanismus

ist jener, der in mehr als der Hälfte der Prüfungen auftrat. Für die Serien 3, 6, 7, 9, 12 und 17 wurden die Ausziehspannungen bei Versagen der rohdichtekorrigierten Werte durch den Wahrscheinlichkeitswert in Tabelle 4-7 und Tabelle 4-6 ersetzt, um damit eine statistische Aussage über den Versagensmechanismus der Gruppe treffen zu können. In Tabelle 4-8 sind zum Vergleich die Wahrscheinlichkeitswerte mit den ausgetauschten Ausziehspannungen angeführt.

4-5.1 SERIEN MIT AUSZIEHVERSAGEN

In der folgenden Auswertung befinden sich die Serien mit dem Versagensmechanismus Herausziehen. Die berechneten Werte ergeben sich aus dem gesamten Umfang der Serie. Die Serien unterscheiden sich unter anderem in der Gruppengröße, deshalb wird, um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Serien herzustellen, die Ausziehspannung bei Versagen σ_{ax-max} betrachtet. Die Werte dazu finden sich für Buche in Tabelle 4-7 und für Birke und BauBuche in Tabelle 4-6. Ein Wert der Serie 12 wurde vor der Auswertung aussortiert, da er die eingestellte Maximalkraft der Prüfmaschine erreichte und kein Versagen des Prüfkörpers erreicht wurde.

Tabelle 4-6 Ausziehungswiderstand und -festigkeit bzw. maximale Kraft und Ausziehspannung zum Versagenszeitpunkt der Serien in Birke und BauBuche mit Versagen auf Herausziehen, Blockscheren und Schraubenbruch (Stahlversagen)

| Serie | Vers. | l_{ef} | $F_{ax-max,mean}$ | $\sigma_{ax-max,ref,mean,MLEre} / \sigma_{ax-max,mean}$ | CoV $[F_{ax-max,mean} / \sigma_{ax-max,mean}]$ | $\sigma_{ax-max,ref,05,MLEre} / \sigma_{ax-max,05}$ | CoV $[\sigma_{ax-max,ref,mean,MLEre}]$ | $n_{ef,ref,mean} / n_{ef,mean}$ | $n_{ef,ref,05} / n_{ef,05}$ |
|----------------|-----------|----------|-------------------|---|---|---|---|---------------------------------|-----------------------------|
| Einheit | [-] | [mm] | [kN] | [N/mm ²] | [%] | [N/mm ²] | [%] | [-] | [-] |
| BI | H | 43 | 10 | 9,5 / 9,6 | 12,1 | 8,6 / 7,9 | 6,0 | - | - |
| 9 (BI) | 5×H & 1×B | 56 | 137 | 10,0 / 10,8 | 7,3 | 9,5 / 8,8 | 3,45 | 1,05 / 1,13 | 1,1 / 1,12 |
| 13 (BI) | 6×B | 56 | 96 | 7,6 / 7,6 | 11,0 | 6,1 / 6,3 | 12,3 | 0,79 / 0,79 | 0,71 / 0,8 |
| BB | H | 58 | 22 | 15,3 / 15,3 | 5,8 | 13,8 / 13,8 | 5,6 | - | - |
| 10 (BB) | 2×B | 56 | 161 | 12,3 / 12,7 | 1) | 1) | 1) | - | - |
| 14 (BB) | 2×B | 56 | 172 | 12,8 / 13,6 | 1) | 1) | 1) | - | - |
| 19 (BB) | 4×B | 56 | 114 | 8,4 / 9,0 | 5,7 | 7,6 / 8,1 | 5,6 | 0,55 / 0,59 | 0,55 / 0,59 |
| 20 (BB) | 4×H | 56 | 94 | 15,8 / 16,7 | 3,2 | 14,9 / 15,8 | 3,5 | 1,03 / 1,09 | 1,08 / 1,15 |

¹⁾ Serie mit nur zwei Werten bzw. unterschiedlichen Geometrieparameter

Tabelle 4-7 *Auszieh- und -festigkeit bzw. maximale Kraft und Ausziehspannung zum Versagenszeitpunkt der Serien in Buche mit Versagen auf Herausziehen, Blockscheren und Schraubenbruch (Stahlversagen)*

| Serie | Vers. | l_{ef} | $F_{ax-max,mean}$ | $\sigma_{ax-max,ref,mean,MLEre} / \sigma_{ax-max,mean}$ | CoV $[F_{ax-max,mean} / \sigma_{ax-max,mean}]$ | $\sigma_{ax-max,ref,05,MLEre} / \sigma_{ax-max,05}$ | CoV $[\sigma_{ax-max,ref,mean,MLEre}]$ | $n_{ref,ref,mean} / n_{ef,mean}$ | $n_{ref,ref,05} / n_{ef,05}$ |
|---------|-----------|----------|-------------------|---|---|---|---|----------------------------------|------------------------------|
| Einheit | [-] | [mm] | [kN] | [N/mm ²] | [%] | [N/mm ²] | [%] | [-] | [-] |
| BU | H | 49 | 17 | 14,5 / 14,2 | 10,2 | 11,6 / 12,0 | 12,7 | - | - |
| 1 | 6×H | 48 | 163 | 15,7 / 15,0 | 14,1 | 13,9 / 11,8 | 7,3 | 1,09 / 1,05 | 1,2 / 1,0 |
| 2 | 6×B | 48 | 155 | 14,2 / 14,3 | 5,8 | 12,5 / 12,9 | 7,8 | 0,98 / 1,01 | 1,08 / 1,08 |
| 3 | 4×B & 2×H | 48 | 156 | 14,0 / 14,4 | 7,4 | 13,2 / 12,7 | 3,6 | 0,96 / 1,01 | 1,13 / 1,06 |
| 4 | 3×H & 3×B | 96 | 186 | 14,0 / 12,9 | 7,4 | 11,4 / 11,3* | 13,0 | 0,97 / 0,91 | 0,98 / 0,94 |
| 5 | 4×S & 1×H | 120 | 226 | 13,1 / 12,5 | 2,4 | 11,5 / 12,0 | 7,6 | 0,91 / 0,88 | 1,0 / 1,0 |
| 6 | 5×H & 1×B | 56 | 192 | 14,8 / 15,1 | 13,9 | 13,0 / 12,0 | 7,6 | 1,01 / 1,07 | 1,12 / 1,0 |
| 7 | 5×B & 1×H | 56 | 170 | 15,3 / 13,5 | 10,0 | 14,0 / 11,4 | 5,5 | 1,05 / 0,95 | 1,2 / 0,95 |
| 8 | 6×S | 120 | 227 | 13,0 / 12,6 | 9,1 | 11,5 / 12,4 | 7,2 | 0,9 / 0,89 | 0,99 / 1,03 |
| 11 | 5×B & 1×K | 56 | 165 | 12,9 / 13,0 | 9,2 | 11,1 / 11,2 | 8,9 | 0,89 / 0,92 | 0,96 / 0,93 |
| 12 | 4×H & 1×B | 64 | 187 | 16,1 / 14,7 | 11,3 | 14,0 / 12,1 | 8,2 | 1,09 / 1,04 | 1,19 / 1,01 |
| 15 | 3×H | 40 | 155 | 15,0 / 13,5 | 1) | 1) | 1) | - | - |
| 16 | 2×H | 40 | 82 | 16,1 / 16,5 | 1) | 1) | 1) | - | - |
| 17 | 5×B & 1×H | 48 | 221 | 17,2 / 17,4 | 9,2 | 15,9 / 14,8 | 4,7 | 1,18 / 1,23 | 1,37 / 1,23 |
| 18 | 4×B | 56 | 151 | 12,3 / 11,9 | 8,5 | 11,2 / 10,3 | 5,3 | 0,85 / 0,84 | 0,97 / 0,86 |

1) Serie mit nur zwei Werten bzw. unterschiedlichen Geometrieparameter

Tabelle 4-8 Auszieh-widerstand und -festigkeit bzw. maximale Kraft und Ausziehspannung zum Versagenszeitpunkt der Serien in Buche, Birke und BauBuche mit Versagen auf Herausziehen, Blockscheren) korrigiert mittels MLEre

| Serie | 3 | 6 | 7 | 9 | 12 | 17 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| $\sigma_{ax-max,ref,mean,MLEre}$ | 14,0 | 14,8 | 15,3 | 10,0 | 16,1 | 17,2 |
| $\sigma_{ax-max,ref,05,MLEre}$ | 13,2 | 13,0 | 14,0 | 9,5 | 14,0 | 15,9 |
| CoV [$\sigma_{ax-max,ref,mean,MLEre}$, $\sigma_{ax-max,ref,05,MLEre}$] | 3,5 | 7,5 | 5,5 | 3,4 | 8,2 | 4,7 |
| $\sigma_{ax-max,ref,mean}$ | 13,9 | 14,7 | 15,2 | 10,0 | 15,8 | 17,1 |
| $\sigma_{ax-max,ref,05}$ | 13,1 | 12,9 | 13,9 | 9,5 | 13,8 | 15,8 |
| CoV [$\sigma_{ax-max,ref,mean}$] | 3,8 | 7,5 | 5,3 | 3,1 | 7,8 | 4,7 |

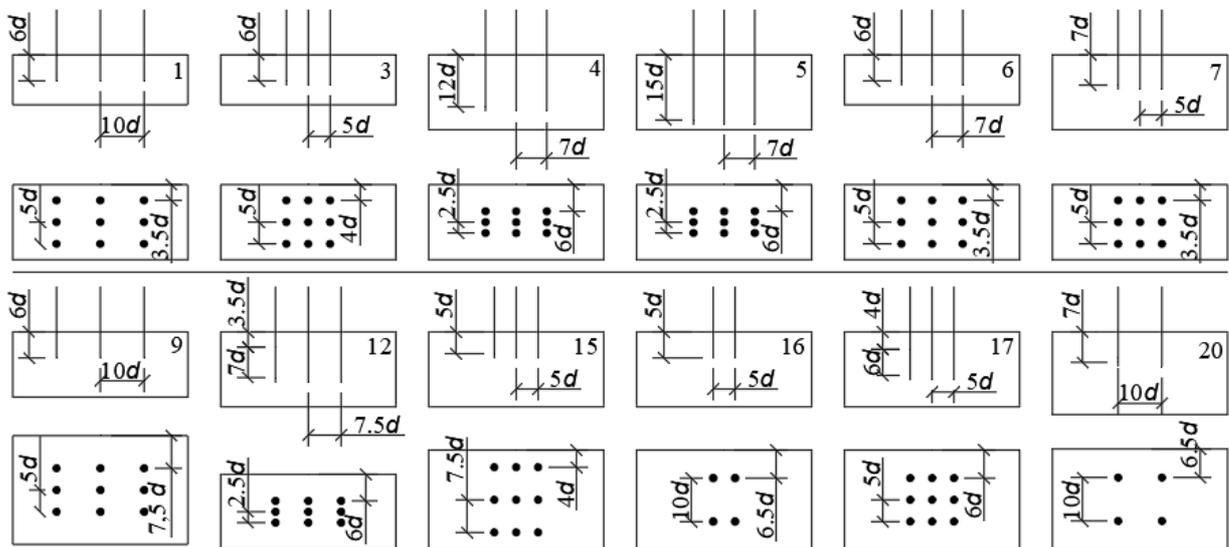


Abbildung 4-10 Piktogramme der Serien mit Ausziehversagen

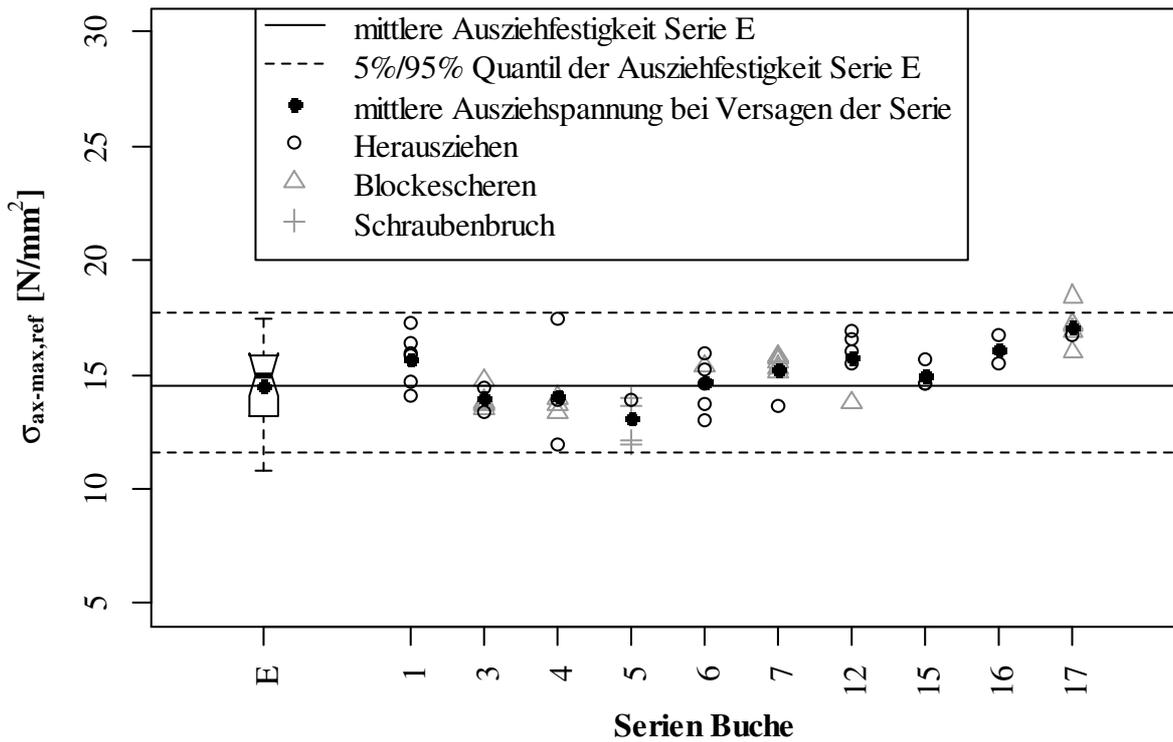


Abbildung 4-11 Auszieh Widerstand und -festigkeit bzw. maximale Kraft und Ausziehspannung zum Versagenszeitpunkt Serien in Buche mit Ausziehversagen

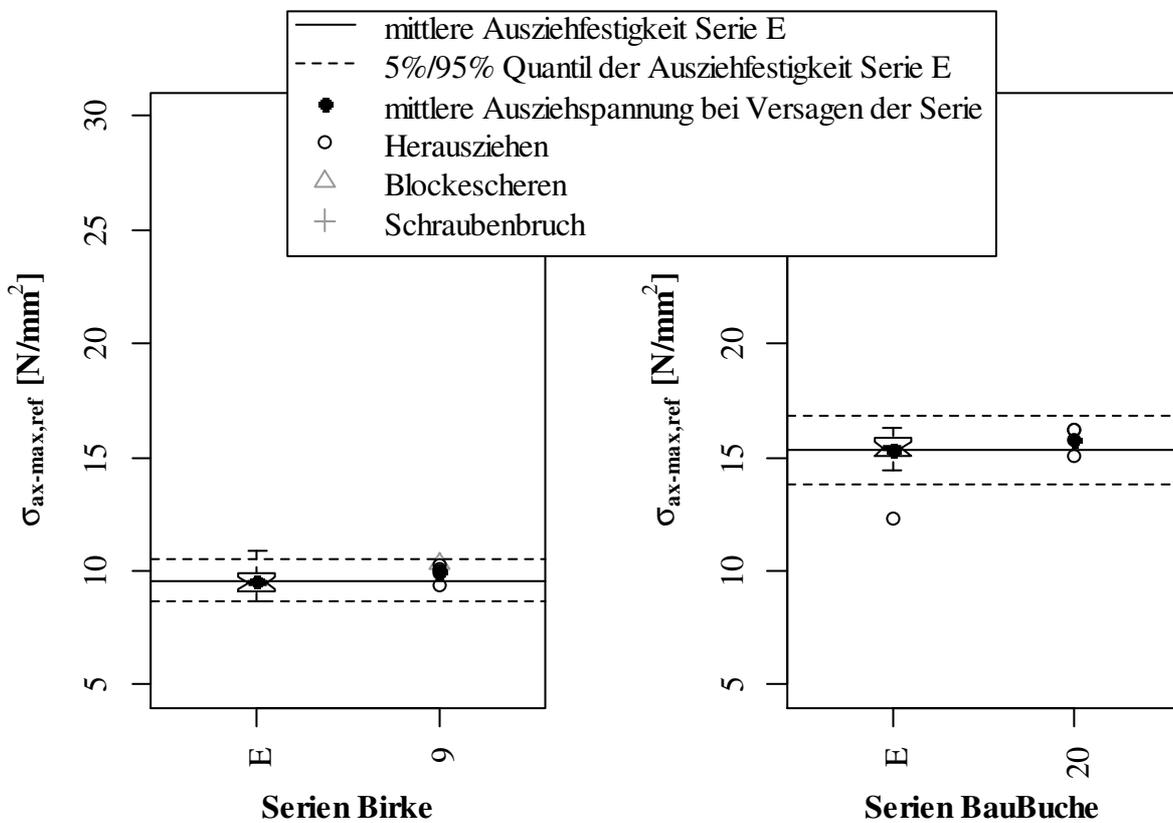


Abbildung 4-12 Auszieh Widerstand und -festigkeit bzw. maximale Kraft und Ausziehspannung zum Versagenszeitpunkt Serien in Birke und BauBuche mit Ausziehversagen

Alle Serien mit überwiegend beobachtetem Ausziehversagen erreichten auf Niveau des Charakteristischen Wertes und des Mittelwertes die volle Kapazität des n -fachen Widerstandes der Einzelschraube. Die Serie 5 verzerrt die Grafik, da ein enger Abstand geprüft wurde und vorwiegend Schraubenbruch auftrat. Bei den Serien 4 und 7, mit geringerem Abstand, fand überwiegend Blockscheren statt. Jedoch ist festzuhalten, dass die Serien trotz geringeren Abständen bezogen auf den Mittelwert nicht gravierend abfallen.

Betrachtet man die Abstände und die Versagensmechanismen der vorliegenden Daten, geht daraus hervor, dass durch die Regelung der Abstände zwischen den Schrauben a_1 und a_2 der Versagensmechanismus Herausziehen nicht ausreichend definiert werden kann. Im Zusammenhang damit wurde bei Serie 6 mit den Schraubenabständen $a_1 = 7 d$ und $a_2 = 5 d$ in fünf von sechs Fällen Herausziehen und in einem von sechs Fällen Blockscheren beobachtet, wobei die mittlere maximale Ausziehspannung auf dem Mittelwertniveau der Einzelschraube lag, siehe Abbildung 4-11. Bei Serie 17, mit Schraubenabständen von $a_1 = 5 d$ und $a_2 = 5 d$, tritt bei nur einem von sechs Prüfungen ein Herausziehen der Schrauben auf, dennoch wurde dabei die höchste maximale Ausziehspannung bei Versagen des Prüfumfanges erzielt. Die Prüfkörper der Serie 17 wurden mit einer Einbindetiefe von 32 mm vorgebohrt, um die Querkomponente durch entsprechendes Vorholz besser im Probekörper aufnehmen zu können, wie in Abbildung 3-3 dargestellt. Es ist aus der Literatur (Pirnbacher [57]) und auf Basis von Ausziehprüfungen an Einzelschrauben bekannt, dass ein entsprechendes Vorholz die Leistungsfähigkeit der Schraube auf Herausziehen erhöht. Pirnbacher [57] hat bezüglich der Einbindetiefe Prüfungen durchgeführt. Das Ergebnis daraus war, dass bis zu einer Einbindetiefe von $2 d$ die Ausziehfestigkeit ansteigt, ab dieser Einbindetiefe jedoch nicht mehr ansteigt. Folglich ist für die Bewertung der Serie 17 ein anderer Referenzwert auf Basis von Ausziehprüfungen an Einzelschrauben heranzuziehen, als durch die Referenzserie BU intendiert. Ein diesbezüglicher Referenzwert ist gegenwertig nicht vorliegend und noch in ergänzenden Prüfungen zu ermitteln.

Mittels der Serie 15 und 16 wurde untersucht, ab welchem Abstand a_2 ein Reihenscheren der Gruppe auftreten kann oder ob dieser Effekt nur bei einer einzelnen Schraubenreihen eintreten kann. Analog zu den Reihenprüfungen mit Rollschubversagen wurde $a_1 = 5 d$ gewählt. Bei Serie 15 wurde a_2 mit $7,5 d$ und bei Serie 16 wurde a_2 zwischen $7,5 d$ und $10 d$ variiert. Bei Serie 15 war die Schraubenanzahl neun und bei Serie 16 wurde sie auf sechs und vier reduziert. Das Resultat war, dass bei Serie 15 und 16 das Herausziehen der Schraube und Aufspalten des Holzes beobachtet wurde. Zusätzlich wurde bei Serie 15 beobachtet, dass ein Teil des Holzes zwischen den Schrauben nahe der Oberfläche ca. $1 d$ bei einem von drei Prüfungen mitherausgezogen wurde. Somit konnte mit der Prüfkfiguration kein Reihenscheren festgestellt werden.

Wie bei Buche führt die Anordnung $a_1 = 7 d$ und $a_2 = 5 d$ auch bei Birke in der Serie 9 zum Ausziehversagen. Betrachtet man die Ausziehspannung bei Versagen in Abbildung 4-12, liegt der Mittelwert der Gruppe knapp über der Ausziehfestigkeit der Einzelschraube. Laut Tabelle 4-6 kann festgehalten werden, dass n_{ef} auf charakteristischen und Mittelwert Niveau über 1,0 liegt. Bei Serie 9 hat ein Prüfkörper auf Blockscheren versagt. Dabei wurde kein Abfall der Ausziehspannung bei Versagen beobachtet

In der Abbildung 4-12 ist auf der rechten Seite das Resultat der BauBuche Prüfungen dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass trotz Vergrößerung der Abstände zwischen den Schrauben der Versagensmechanismus Herausziehen zunächst nicht erreicht wurde. Bei einem $a_1 = 7 d / 7,5 d$ und $a_2 = 5 d / 7,5 d$ wurde reines Blockscheren beobachtet. Erst bei Serie 20 mit einer Gruppengröße von 4 Schrauben und ein Abstand von $a_1 = a_2 = 10 d$, trat reines Herausziehen der Schrauben auf.

Die Serien 4, 5 und 7 versagten überwiegend auf Blockscheren. Sie sind aber aufgrund des dennoch beobachteten Versagensmechanismus Herausziehen auch tabellarisch und graphisch angeführt. Die Serien hatten die Abstände zwischen den Schrauben $a_1 = a_2 = 5 d$ (Serie 7) und $a_2 = 2,5 d$ (Serie 4 und 5). Durch den untersuchten Abstand wurde nicht die volle Leistungsfähigkeit je Schraube auf Herausziehen innerhalb der Verbindung erreicht, weshalb diese Serien auch nicht zur Auswertung von n_{ef} beitragen.

Zur Betrachtung von n_{ef} werden die Serien 1, 6, 12 für Buche, 9 für Birke und 20 für BauBuche herangezogen. Es wurden alle Werte in den jeweiligen Serien rohdichtekorrigiert und mit der Maximum-Likelihood-Methode für rechtszensierte und lognormalverteilte Daten auf den variierenden Versagensmechanismus angepasst, um sie bei der Berechnung miteinbeziehen zu können. Betrachtet man das zugehörige n_{ef} auf charakteristischem Niveau, so befinden sich alle Prüfungen über $n_{ef, char} \geq 1,0 \times n$ und

auf dem Niveau des Mittelwertes über $n_{ef,mean} \geq 1,0 \times n$. Die Werte der jeweiligen Serie sind in Tabelle 4-7 und in Tabelle 4-6 dargestellt. Somit ist die Regelung $n_{ef} = n^{0,9}$ laut Eurocode 5 [1] für die vorliegenden Daten konservativ.

4-5.2 SERIEN MIT BLOCKSCHERVERSAGEN

Bei der Auswertung der Versagensmechanismen war auffällig, dass je nach Abstand zwischen den Schrauben quer zur Faserrichtung a_2 das Rissbild unterschiedlich war. Entweder waren bei einer Schraubengruppe mit drei Reihen und einem $a_2 < 5d$ zwei Risse in vertikaler Richtung jeweils entlang der äußeren Schraubenreihen in Faserrichtung, wie in Abbildung 4-13 rechts, oder bei einem $a_2 \geq 5d$ drei Risse in vertikaler Richtung, wie in Abbildung 4-13 links dargestellt. Zusätzlich ist ein Querschnitt knapp über der Schraubenspitze bei beiden Fällen sichtbar. Somit kann festgehalten werden, dass bei $a_2 < 5d$ das Versagen als ein Block stattfindet und bei $a_2 \geq 5d$ sich der Prüfkörper zusätzlich in der Mitte spaltet. In der weiteren Auswertung werden beide Fälle dem Blockscherversagen zugeordnet und nicht weiter unterschieden.



Abbildung 4-13 Rissbild abhängig vom Abstand a_2 : Drei Risse entlang jeder Schraubenreihe in Faserrichtung (links) und zwei Risse entlang der äußeren Schraubenreihen (rechts)

In Folgendem werden alle Serien angeführt, welche zumindest teilweise auf Blockscheren versagten. Die Festigkeitswerte dazu finden sich für Buche in Tabelle 4-7 und für Birke und BauBuche in Tabelle 4-6.

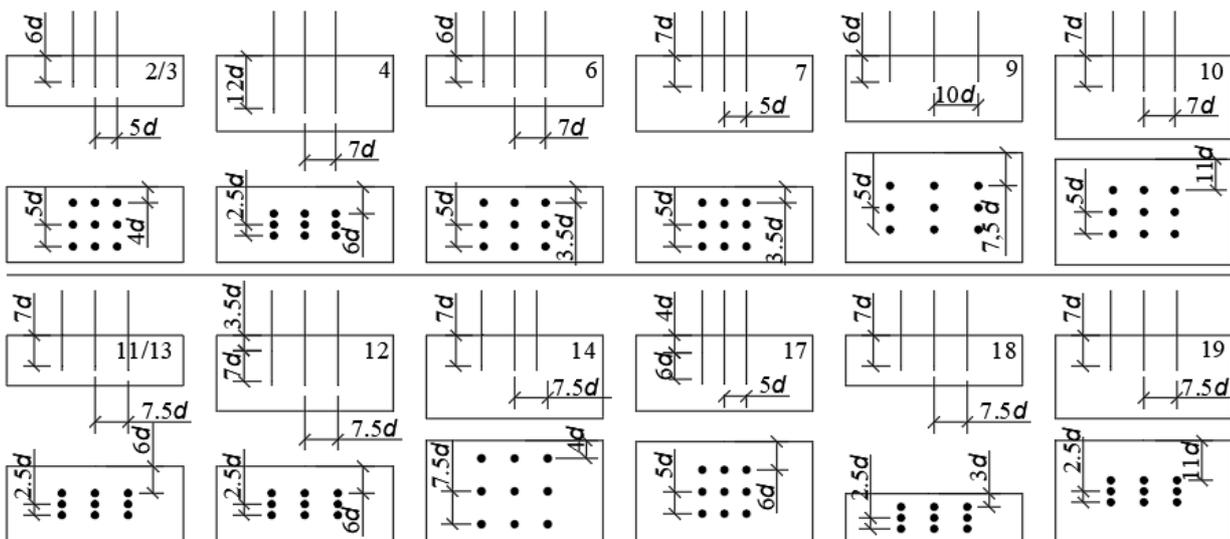


Abbildung 4-14 Piktogramme der Serien mit Blockscherversagen

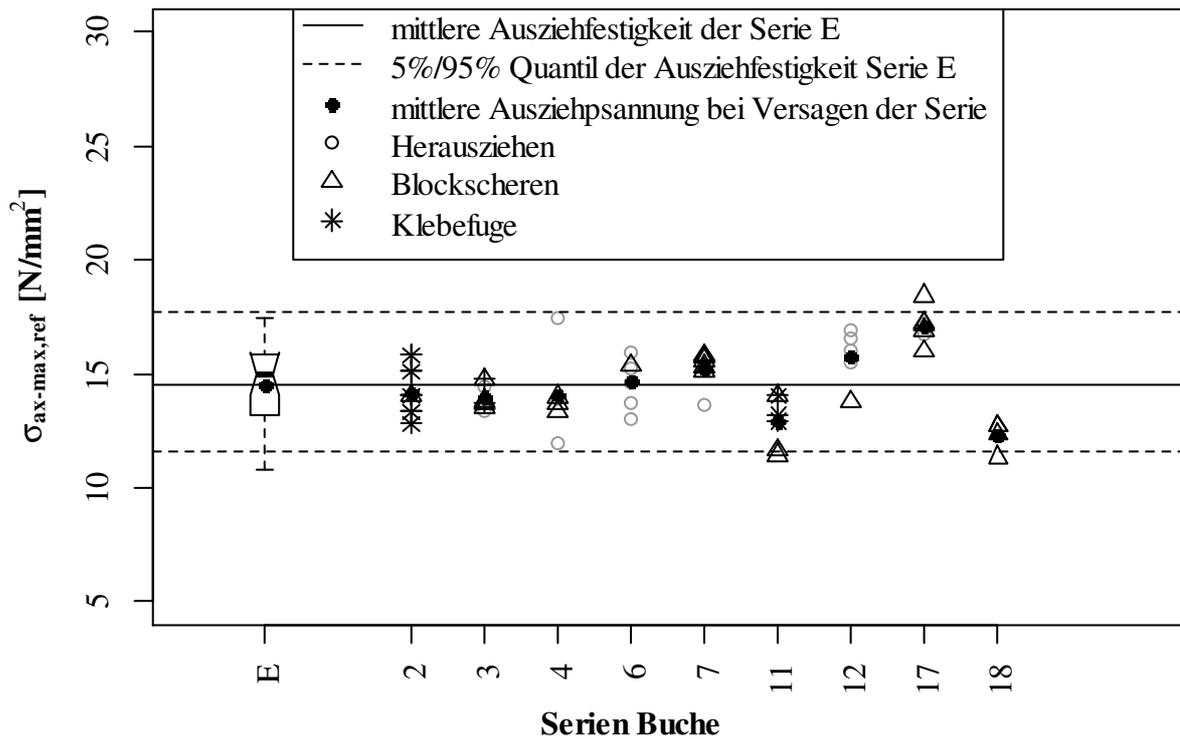


Abbildung 4-15 Ausziehwidestand und -festigkeit bzw. maximale Kraft und Ausziehspannung zum Versagenszeitpunkt Serien in Buche mit Blockscherversagen

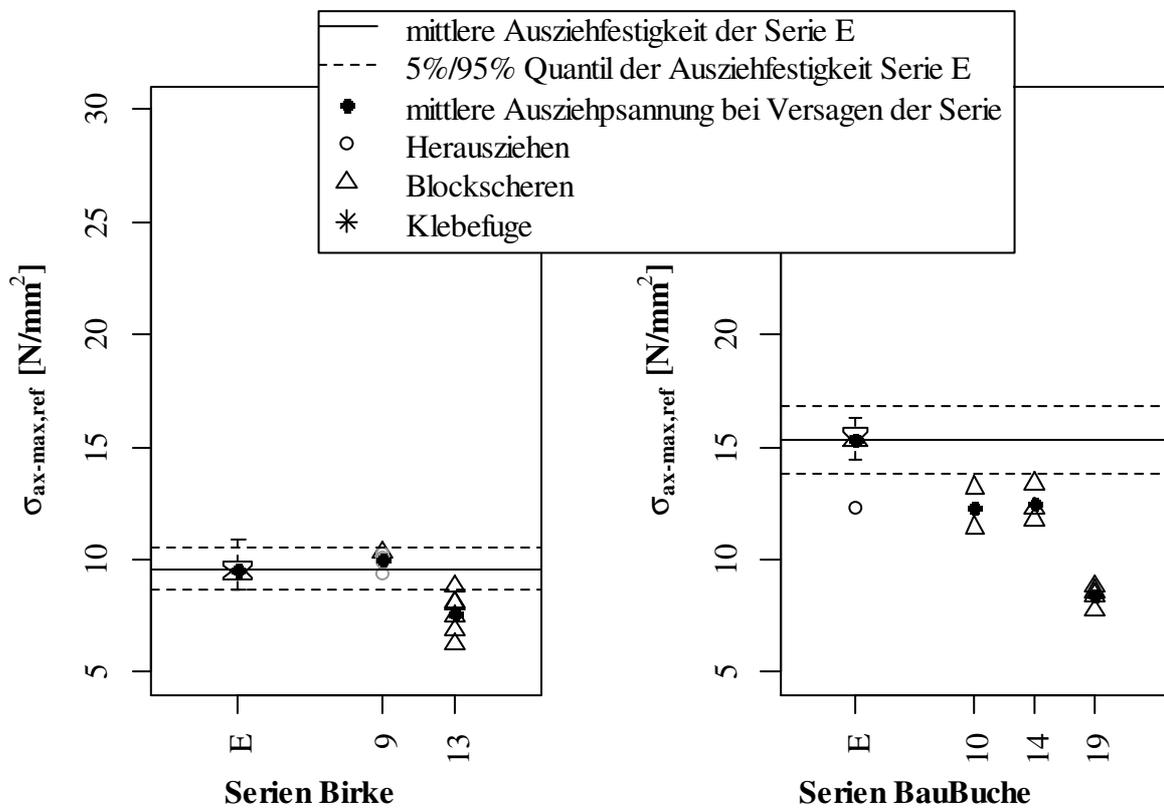


Abbildung 4-16 Ausziehwidestand und -festigkeit bzw. maximale Kraft und Ausziehspannung zum Versagenszeitpunkt Serien in Birke und BauBuche mit Blockscherversagen

Die Serien 2, 3 und 17 wurden mit $a_1 = 5 d$ und $a_2 = 5 d$ ausgeführt und weisen den Versagensmechanismus Blockscheren auf. Diese Abstände sind laut ETA-12/0373 [39] allerdings zulässig. Darin wird auf die Bemessung nach Eurocode 5 [1] hingewiesen. Dies ist für die Anwendung insofern problematisch, sofern das Blockscherversagen die Tragfähigkeit signifikant mindert, da nicht auf ein Blockscherversagen in der ETA [39] hingewiesen wird. In diese Serien wird jedoch die Regelung im Eurocode 5 [1] mit $n_{ef} = n^{0,9}$ eingehalten.

Im Eurocode 5 [1] werden $a_1 = 7 d$ und $a_2 = 5 d$ als Mindestzwischenabstände angeführt. Bei Ausführung dieser Abstände in Serie 6 wurde jedoch auch bei einem von sechs Prüfkörpern Blockscheren beobachtet. Problematisch wäre auch hier, wenn ein Abfallen der Tragfähigkeit durch das Blockscherversagen zu beobachten wäre, denn im Eurocode 5 [1] wird nur ein Hinweis auf diesen Versagensmechanismus angeführt, jedoch keine Nachweisprozedur. Der Prüfkörper erreichte mit Blockscherversagen das Mittelwertniveau der Ausziehfestigkeit der Einzelschraube. Bei erlaubten Mindestabständen kann durchaus Blockscherversagen auftreten, jedoch ist im Umfang dieser Prüfungen kein Abfall der Ausziehfestigkeit zu beobachten.

Werden Serie 2 und Serie 3 auf Basis der Ausziehspannung bei Versagen verglichen, so ist nur der Auflagerabstand unterschiedlich. Dieser beträgt bei Serie 2: $l_a = 240 \text{ mm}$ und bei Serie 3: $l_a = 180 \text{ mm}$. Werden die Ergebnisse verglichen, so ist bei Serie 3 nur bei 4 von 6 Prüfungen Blockscheren zu beobachten, bei Serie 2 treten hingegen bei allen Prüfungen Blockscheren mit teilweisem Versagen der Klebefuge auf. Dabei liegen die Mittelwerte der Ausziehspannung bei Versagen und die Rohdichte beider Serien sehr nahe beieinander und es kann kein Unterschied dahingehend festgestellt werden. Somit liegt nahe, dass der Abstand zum Auflager einen möglichen Einfluss auf den Versagensmodus hat, aber für eine klare Aussage weitere Untersuchungen erfordert.

Um das Versagen auf Querkzug knapp über der Schraubenspitze auszuschließen, wurde Serie 12 durchgeführt. Sie kann mit Serie 11 verglichen werden, da diese dieselben Abstände sowie das gleiche l_{ef} aufweist. Der Unterschied liegt darin, dass bei Serie 12 die Schrauben durchgeschraubt wurden. Somit wird in Serie 12 ein größeres Holzvolumen beansprucht und eine höhere Tragfähigkeit erwartet. Dies spiegelt sich auch in den beobachteten Versagensmechanismen und den damit zusammenhängenden Widerständen wider, siehe auch Abbildung 4-15. Der berechnete Wert der mittleren Ausziehfestigkeit von Serie 12 liegt mit $16,1 \text{ N/mm}^2$ höher als jener der Serie 11 mit $12,9 \text{ N/mm}^2$.

Die Auswirkung der Verringerung des Randabstandes $a_{2,c}$ wurde in Serie 18 untersucht und mit Serie 11 verglichen. Dazu wurde im Gegensatz zur Prüfkörperform von Serie 11 mit einer Breite von 138 mm ein Prüfkörper mit einer Breite von 88 mm herausgeschnitten und mit derselben Anordnung der Schrauben geprüft. Somit wurde der Abstand zwischen Schraube und Rand $a_{2,c}$ von 49 mm ($\sim 6 d$) in Serie 11 auf 24 mm ($3 d$) in Serie 18 verringert. Verglichen mit der Serie 11, welche einen Wert der mittleren Ausziehspannung bei Versagen von $12,9 \text{ N/mm}^2$ besitzt, weist Serie 18 mit $12,3 \text{ N/mm}^2$ eine um $4,7 \%$ geringeren Wert auf. Damit können die Regelwerke mit $a_{2,CG} = 4 d$ bestätigt werden.

In Abbildung 4-16 links werden die Serien in Birke dargestellt, welche u. a. auf Blockscheren versagt haben. Bei Serie 9 wurden die Abstände $a_1 = 7 d$ und $a_2 = 5 d$ und bei Serie 13 $a_1 = 7 d$ und $a_2 = 2,5 d$ geprüft. Vergleicht man die beiden Serien, so ist ein Zusammenhang zwischen dem engeren Abstand a_2 und dem Abfall der Ausziehfestigkeit erkennbar.

Die Serien in BauBuche sind in Abbildung 4-16 rechts gezeigt. Dabei ist erkennbar, dass ein deutlicher Abfall in der Ausziehtragfähigkeit der Gruppe gegenüber jener der Einzelschrauben vorhanden war. Es wirkt sich auch hier der Abstand zwischen den Schrauben auf den Auszieh Widerstand aus. Serie 14 mit den Abständen $a_1 = 7,5 d$ und $a_2 = 7,5 d$ weist die höchsten Widerstände auf, gefolgt von Serie 10 mit $a_1 = 7 d$ und $a_2 = 5 d$ und abschließend Serie 19 mit $a_1 = 7,5 d$ und $a_2 = 2,5 d$, bei der die geringsten Widerständen auf verzeichnet werden.

4-5.3 SERIEN MIT SCHRAUBENBRUCH

Zu erwähnen ist, dass nach der durchgeführten Vorbemessung nach Gleichung (3.3) mit Schraubenbruch ab $l_{ef} = 12 d$ zu rechnen ist. Die Serie 4 mit einer Einschraubtiefe von $l_{ef} = 96 \text{ mm} = 12 d$ versagte nicht auf Schraubenbruch, sondern auf Herausziehen. Es wurde mit dem Schraubenabstand $a_1 = 7 d$ und $a_2 = 2,5 d$ nur ein $F_{ax-max,mean} = 186 \text{ kN}$ erreicht, welches deutlich unter dem Niveau für die Serien Schraubenbruch $F_{ax-max,mean} = 228 \text{ kN}$ liegt. Die Serie wurde deshalb bereits im vorherigen Abschnitt 4-5.1 ausgewertet.

Auf Grund der geringen Streuung der Festigkeit von Stahl ist auch bei den Serien, welche durch Stahlbruch versagt haben, die Streuung der Maximalkraft der Verbindung sehr gering. Die Ergebnisse in Tabelle 4-9 repräsentieren alle Prüfkörper aus Buche, bei denen Stahlbruch aufgetreten ist. Bei Serie 5 wurde ein Prüfkörper, bei dem kein Stahlbruch aufgetreten ist, für den Vergleich aussortiert. Der Vollständigkeit halber ist dieser in der graphischen Darstellung der Ergebnisse in Abbildung 4-17 jedoch dargestellt. Die Serie mit der Bezeichnung S weißt die Stahlzugprüfungen aus und beschreibt die reine Stahlzugtragfähigkeit

Tabelle 4-9 Festigkeitswerte der Serien für Schraubenbruch

| | [Einheit] | S | 5 | 8 |
|---------------------|-----------|------|------|------|
| Versagen | [-] | - | 4xS | 6xS |
| | [-] | - | 1xH | - |
| Anzahl PK | [-] | - | 5 | 6 |
| l_{ef} | [mm] | - | 120 | 120 |
| n | [-] | - | 6 | 6 |
| $F_{ax-max,mean}$ | [kN] | 36,5 | 228 | 227 |
| $F_{ax-max,mean}/n$ | [kN] | 36,5 | 38 | 37,8 |
| CoV | [%] | 0,56 | 0,32 | 0,91 |
| $F_{max,05}$ | [kN] | 36,0 | 226 | 222 |

Zwischen den beiden Serien, mit einem $l_{ef} = 120 \text{ mm}$ sind nur die Abstände zwischen den Schrauben und zum Rand unterschiedlich, wobei bei Serie 5 diese $a_1 = 7 d$, $a_2 = 2,5 d$ ($a_1 \times a_2 = 17,5 d^2$) und $a_{2,c} = 49 \text{ mm}$ und bei Serie 8 $a_1 = 5 d$, $a_2 = 3,5 d$ ($a_1 \times a_2 = 17,5 d^2$) und $a_{2,c} = 41 \text{ mm}$ betragen. Die Schraubengruppe zeigt eine etwas höhere Tragfähigkeit $F_{max,mean}/n = 37,8 \text{ kN}$ bis zum Stahlbruch als die der Einzelschraube $F_{max,mean} = 36,5 \text{ kN}$. Damit liegt der Wert der Gruppe um 4 % höher.

Auffällig ist, dass die Einzelschrauben eine geringere Stahlzugtragfähigkeit als die Gruppen aufweisen. Dies ist durch die Schraubenherstellung erklärbar und stellt sich wie folgt dar: In der Herstellung wird von der Spitze her für ein sogenanntes Startgewinde flachgewalzt und erst danach erfolgt nach einem bestimmten Abstand ein rollgewaltes Gewinde. Im flachgewalzten Bereich entstehen durch die Walzbacken herstellungsbedingt kleine Einkerbungen (Fertigungsungängen) an der Schraube zwischen den Gewindegängen, am sogenannten Gewindegrund. Diese treten im rollgewalzten Abschnitt jedoch nicht auf und reduzieren somit Kerbspannungen bei der Beanspruchung auf Zug. Je nach Schraubentyp kann dieser Bereich unterschiedlich lang sein und beträgt bei der Hardwood Screw [39] in etwa 100 mm.

Stahlzugtragfähigkeit pro Schraube

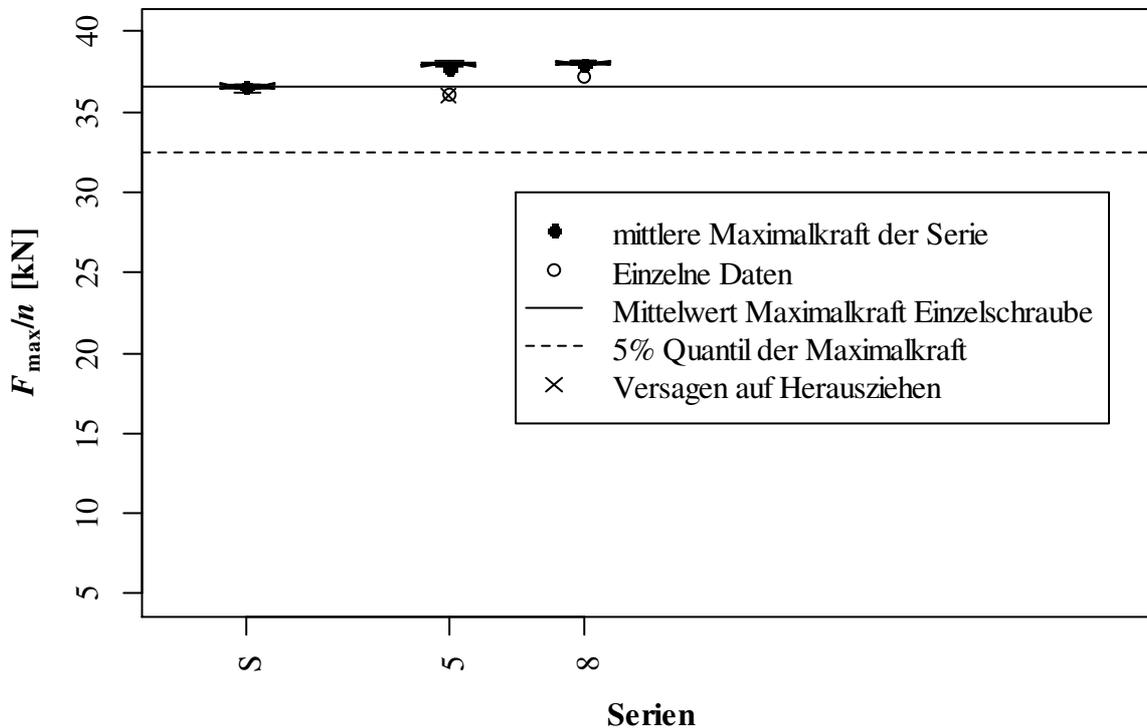


Abbildung 4-17 Stahlzugtragfähigkeit pro Schraube der Serien mit Schraubenbruch

Die Schrauben versagten bei der Einzelprüfung im flachgewalzten, die Schrauben bei der Gruppenprüfung im rollgewalzten Bereich. Die entsprechenden Schrauben sind in Abbildung 4-18 gezeigt. Oben ist im Bild die Schraube aus der Gruppenprüfung abgelichtet, darunter die Schraube aus den Referenzprüfungen. Im unteren Teil der Abbildung 4-18 sind die Schrauben mit einer Gewindelänge von 300 mm und 100 mm zu sehen. Aus internen Untersuchungen geht hervor, dass die Festigkeit im flachgewalzten Bereich um etwa 6 % geringer ist als im rollgewalzten Bereich. Dies entspricht in etwa der Größenordnung des Unterschiedes, der in den Prüfungen auftrat. Die Differenz zwischen den Mittelwerten der Stahlzugtragfähigkeit der Gruppe und der Einzelschraube wird auf die unterschiedlichen Bruchbereiche zurückgeführt. Da alle Schrauben zeitgleich versagten, wird davon ausgegangen, dass alle Schrauben ihre volle Tragfähigkeit erreichten und folglich auch den Festigkeitswert der Einzelschraube. Eine entsprechende Überprüfung dazu ist noch ausständig.



Abbildung 4-18 Schraubenbruchbereiche, Vergleich Referenz (zweite von oben) Gruppe (oben)

4-6 BLOCKSCHERMODEL

Um die Ergebnisse mit dem Modell von Mahlknecht und Brandner [10] vergleichen zu können, wurden die Parameter der Prüfkongfigurationen in das Modell eingegeben. Dabei wird im Folgenden die maximale Tragfähigkeit der Verbindung aus den Gruppenprüfungen und die des Blockschermodells gegenübergestellt. Für das Modell werden Mittelwerte der aufgelisteten Materialparameter benötigt. Diese sind in Tabelle 4-10 angeführt.

Tabelle 4-10 *Materialparameter Blockschermodell*

| Holzart | [Einheit] | BU | BB | BI |
|---|----------------------|--|------------|------------|
| $E_{0,mean}$ | [N/mm ²] | 18130 [58] | 16800 [54] | 15000 [36] |
| $E_{90,mean}$ | [N/mm ²] | 1200 [17] | 470 [54] | 650 [36] |
| $G_{0,mean}$ | [N/mm ²] | 1100 [58] | 850 [54] | 850 [36] |
| $G_{90,mean}$ | [N/mm ²] | 370 [59] | 155 [60] | 175 [36] |
| Querzugfestigkeit $f_{t,90,mean}$ | [N/mm ²] | $\frac{18,1}{(\frac{A_i}{100})^{0,319}}$ [17] | 2 [54] | 0,6 [36] |
| Rollschubfestigkeit $f_{r,mean}$ | [N/mm ²] | 6 [59] | 5,5 [60] | 2 [36] |
| Schubfestigkeit $f_{v,mean}$ | [N/mm ²] | 10 [58] | 6,25 [54] | 4,5 [36] |

Für die Berechnung werden Parameter für die Lastverteilung benötigt. Die entsprechenden Werte aus Mahlknecht und Brandner [10] sind in der Tabelle 4-11 zusammengestellt.

Tabelle 4-11 *Parameter der Lastverteilung Blockschermodell Mahlknecht und Brandner [10]*

| | Einheit | Eingangsgröße |
|------------|---------|---------------|
| $C_{t,90}$ | [-] | 0,5 |
| C_r | [-] | 0,9 |
| C_s | [-] | 0,9 |
| X_r | [mm] | 2,5 x d |
| X_s | [mm] | 5 x d |

Als Ergebnis der Berechnung werden die Werte in Tabelle 4-12 und Tabelle 4-13 verglichen. Darin sind die Serien, worin nicht mehr als die Hälfte der Prüfkörper auf Blockscheren versagt hat, in **Grau** gezeigt. Zusätzlich zur Ausziehtragfähigkeit der Prüfkörper ist auch die Ausziehtragfähigkeit der Referenzprüfung mit n Schrauben multipliziert angeführt.

Tabelle 4-12 Vergleich Maximalkraft nach Blockschermodell mit Serien in Buche

| Serie | Vers. | l_{ef} | $F_{ax-max,ref,single} \times n \times$ ($l_{ef,gruppe} / l_{ef,single}$) | $F_{ax-max,ref,mean,MLEre}$ | CoV [$F_{ax-max,ref,mean}$] | $F_{max,BS-M}$ | $F_{max}/F_{max,BS-M}$ |
|---------|--------------|----------|--|-----------------------------|----------------------------------|----------------|------------------------|
| Einheit | [-] | [mm] | [kN] | [kN] | [%] | [kN] | [-] |
| 1 | 6×H | 48 | 157 | 171 | 7,3 | 146 | 1,17 |
| 2 | 6×B | 48 | 157 | 154 | 7,8 | 104 | 1,48 |
| 3 | 4×B & 2×H | 48 | 157 | 152 | 3,6 | 104 | 1,46 |
| 4 | 3×H & 3×B | 96 | 210 | 203 | 13,0 | 127 | 1,60 |
| 5 | 4×S & 1×H | 120 | 262 | 237 | 7,6 | 163 | 1,46 |
| 6 | 5×H & 1×B | 56 | 184 | 187 | 7,6 | 141 | 1,33 |
| 7 | 5×B & 1×H | 56 | 184 | 194 | 5,5 | 121 | 1,60 |
| 8 | 6×S | 120 | 262 | 236 | 7,2 | 173 | 1,36 |
| 11 | 5×B & 1×K | 56 | 184 | 163 | 8,9 | 109 | 1,50 |
| 12 | 4×H & 1×B | 64 | 210 | 233 | 8,2 | 163 | 1,43 |
| 17 | 5×B & 1×H | 48 | 157 | 187 | 4,7 | 173 | 1,08 |
| 18 | 4×B | 56 | 184 | 155 | 5,3 | 109 | 1,43 |

Tabelle 4-13 Vergleich Maximalkraft nach Blockschermodell mit Serien in Birke und BauBuche

| Serie | Vers. | l_{ef} | $F_{ax-max,ref,single} \times n \times$ ($l_{ef,gruppe} / l_{ef,single}$) | $F_{ax-max,ref,mean,MLEre}$ | CoV [$F_{ax-max,ref,mean}$] | $F_{max,BS-M}$ | $F_{max}/F_{max,BS-M}$ |
|---------|--------------|----------|--|-----------------------------|----------------------------------|----------------|------------------------|
| Einheit | [-] | [mm] | [kN] | [kN] | [%] | [kN] | |
| 9 (BI) | 5×H & 1×B | 56 | 121 | 127 | 12,3 | 57 | 2,22 |
| 13 (BI) | 6×B | 56 | 121 | 96 | 5,6 | 41 | 2,34 |
| 10 (BB) | 2×B | 56 | 194 | 156 | 3,6 | 77 | 2,03 |
| 14 (BB) | 2×B | 56 | 194 | 162 | 13,0 | 67 | 2,42 |
| 19 (BB) | 4×B | 56 | 194 | 106 | 5,6 | 67 | 1,58 |
| 20 (BB) | 4×H | 56 | 86 | 89 | 3,5 | 69 | 1,29 |

Die Auszieh Widerstände aus dem Modell weichen für Buche, bezogen auf die Blockscheren relevanten Serien, im Mittel um den Faktor 1,5 ab. Die Auszieh Widerstände für BauBuche weichen um 1,6 - 2,4 und für Birke um 2,34 im Mittel ab. Die Ergebnisse, welche in Tabelle 4-12 und Tabelle 4-13 angeführt sind, zeigen, dass das Blockschermodell hinsichtlich Zuverlässigkeit eine konservative Prognose bezüglich der zu erwartenden Auszieh Widerstände abgibt.

Die genaue Betrachtung und Auswertung der Daten in Bezug auf das Blockschermodell nach Mahlknecht und Brandner [10] ist nicht Teil dieser Arbeit und wird in weiterführenden Untersuchungen zum Thema Blockschermodell behandelt werden.

4-7 STEIFIGKEIT

4-7.1 STEIFIGKEIT DER VERBINDUNG – PRÜFUNG MIT NAHEM AUFLAGER

Die Gesamtsteifigkeit der Verbindung K_{ges} wurde aus der Differenz der Wegmessung oben und unten mittels Gleichung (3.9) berechnet. Dabei fließen die Kraftgrößen und die Weggrößen ein. Das Steifigkeitsmodell wird als seriell betrachtet und ist in Abbildung 4-19 vereinfacht dargestellt. Die Steifigkeit K_1 ist im Prinzip die Summe der parallel wirkenden Schraubenschäfte und kann mit Gleichung (4.1) berechnet werden. Die Biegesteifigkeit des Prüfkörpers K_3 wird aufgrund des nahen Auflagers und dem in Relation dazu großen Querschnitt des Prüfkörpers als vernachlässigbar angenommen. Jedoch wurde bei einer genaueren späteren Betrachtung beobachtet, dass wenige Prüfkörper an den äußeren Auflagerrändern abgehoben sind. Die Steifigkeit $2 K_4$ entsteht aus der Querdruckverformung (Einpressung) durch die beidseitige Lagerung des Prüfkörpers. Für das vereinfachte Modell werden dazu die Daten der Querdruckmessung (Weg rel) ausgewertet.

Die Steifigkeit der eigentlichen Schraubengruppe bzw. der in das Holz eingebundenen Schraubenanteile, entspricht in der Kette der Steifigkeit K_2 . Da die anderen Federsteifigkeiten theoretisch oder aus Messdaten berechnet (K_1 und K_4) oder als hoch angenommen werden können (K_3), kann mithilfe der Gleichung (4.2) die Steifigkeit der Gruppe rückgerechnet werden.

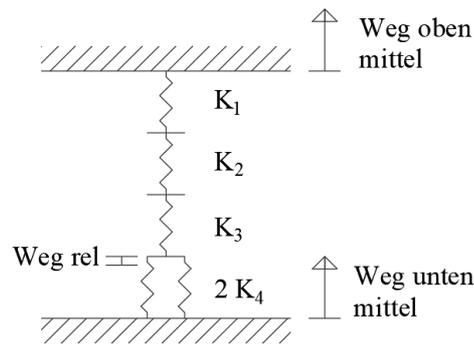


Abbildung 4-19 Steifigkeitsmodell der Verbindung

Dabei sind:

- K_1 die Steifigkeit der Summe der Schraubenschäfte
- K_2 die Steifigkeit der Ausziehbeanspruchung
- K_3 die Biegesteifigkeit des Prüfkörpers
- K_4 die Querdrucksteifigkeit

$$K_1 = n \frac{E_s A_s}{l} \quad (4.1)$$

$$K_2 = 1 / \left(\frac{1}{K_{ges}} - \frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_3} - \frac{1}{2K_4} \right) \quad (4.2)$$

Aus den Prüfdaten wurden die Mittelwerte der Gesamtsteifigkeit K_{ges} im Bereich von 26 kN/mm bis 85 kN/mm berechnet. Die verfügbaren Steifigkeitswerte sind innerhalb der Serie relativ konstant mit einem CoV von maximal 10 %. Die Mittelwerte der Steifigkeitsdaten der jeweiligen Serien wurden untereinander, in Bezug auf die Versagensmechanismen, Gruppengröße, PK-Biegesteifigkeit und Schraubenanordnung verglichen.

In Bezug auf die Prüfkörper aus Buche weisen diese eine Steifigkeit im Bereich von 40 kN/mm bis 55 kN/mm auf, mit Ausnahme der Serie 17, welche eine Einbindetiefe der Schrauben von 32 mm und eine Steifigkeit von 81 kN/mm bezogen auf den Mittelwert der Serie zeigt. Ansonsten wurden keine Auffälligkeiten beobachtet.

Die beiden Serien aus Birke zeigen eine Steifigkeit von 40 kN/mm und 74 kN/mm. Dabei wurde bei Serie 9, die auf Ausziehen versagte, eine höhere Steifigkeit festgestellt, als bei Serie 13, die auf Blockscheren versagte. Dieser Unterschied kann aber auch andere Ursachen haben, wie z. B. der Einbau des Prüfkörpers in die Prüfmaschine. So wurde Serie 9 parallel und Serie 13 normal zur Traverse eingebaut. Des Weiteren wurden die Abstände zwischen den Serien variiert.

Die Serien aus BauBuche weisen eine Steifigkeit von 30 kN/mm und 70 kN/mm auf. Dabei weist die Serie, welche auf Ausziehen versagt hat, die geringste Steifigkeit auf.

Die erhaltenen Daten werden als wertvoll erachtet, da sie in den späteren Prüfungen der Schraubengruppe im Einfeldträger als Vergleichsdaten herangezogen werden.

4-7.2 QUERDRUCKSTEIFIGKEIT AM AUFLAGER

Zusätzlich zur Steifigkeit der Verbindung wurde auch noch die Querdrucksteifigkeit am Auflager ausgewertet. Dazu wurden, wie in Abbildung 4-20 gezeigt, auf beiden Seiten des Prüfkörpers Wegaufnehmer angebracht, um die vertikale Einpressung des Prüfkörpers gegen das Auflager messen zu können. Zwischen dem Anschraubpunkt und der Auflagerkante war in vertikaler Richtung ein Abstand von 1,4 cm und in horizontaler Richtung ein Abstand von 1,0 cm gegeben.

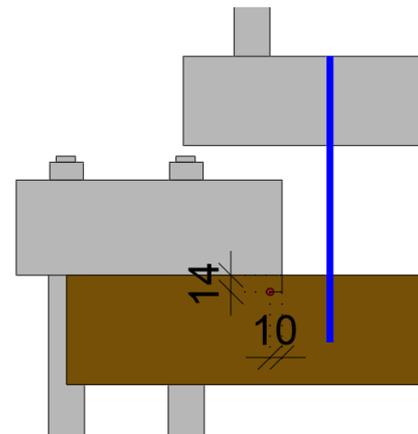


Abbildung 4-20 Wegaufnehmer Querdruck (links) und Skizze Position Wegaufnehmer rel (rechts)

Die Auswertung der Querdrucksteifigkeit am Auflager hat sich als schwierig erwiesen, da das geforderte Bestimmtheitsmaß von $R = 0,999$ für eine lineare Regression im augenscheinlich linear-elastischen Bereich der Kraft-Verformungsbeziehung nur selten erreicht wurde. Deshalb konnten einige Werte in der weiteren Bewertung nicht inkludiert werden. Von insgesamt 99 Messungen konnten nur 46 in die weitere Auswertung mitaufgenommen werden. Aufgrund der hohen Anzahl an Prüfungen wurde diese Bewertung nur für die Prüfkörper aus Buchen-Brettschichtholz durchgeführt.

Um die Zuverlässigkeit der Messungen zu überprüfen, wurde ein Modell in Dlubal RFEM [12] erstellt und die Ergebnisse daraus mit den Prüfungen verglichen. Dazu wurde ein vereinfachtes 2D Modell mit linear-elastischem Verhalten modelliert, bei dem mögliche relevante Einflüsse, durch Variation dieser, berücksichtigt wurden. Der Prüfkörper wurde als Fläche mit orthotropen Eigenschaften modelliert. Im Vorfeld wurden Auflager-, Beanspruchungs- und Kontaktbedingungen der Flächen und Linien bei gleichbleibenden Materialeigenschaften variiert und die Auswirkungen auf das Berechnungsergebnis betrachtet. Dabei wurde festgestellt, dass der Stahlrahmen sehr massiv ist und als fixes Lager beschrieben werden kann. Die Einwirkung wurde als Linienlast entlang l_{ef} je Schraube angesetzt. Der größte Einfluss auf die numerischen Ergebnisse wurde durch Variation der Materialparameter hervorgerufen. Des Weiteren wurde eine Linienfreigabe zwischen Prüfkörper und Stahlplatte eingeführt, um bei Zugbeanspruchung ein mögliches Abheben des Prüfkörpers nicht zu verhindern. In Abbildung 4-21 ist das unverformte Ausgangsmodell dargestellt, auf der linken Seite ist die Laststufe mit 30 kN abgebildet, auf der rechten Seite das gleiche Modell mit einer Laststufe von 90 kN auf die Schraubengruppe.



Abbildung 4-21 RFEM Modell; Vergleich mit Serie 8, Belastung links 30 kN, Belastung rechts 90 kN

Als Parameter mit dem größten Einfluss auf das absolute Maß der Verformung in z -Richtung stellte sich der Schubmodul G_{xy} , der E-Modul in Faserrichtung E_x und der E-Modul quer zur Faserrichtung E_y heraus. Die dazu benötigten Werte wurden in der folgenden Literatur recherchiert. Der Schubmodul $G_{xy,mean}$ wurde zunächst mit 1082 N/mm^2 und der E-Modul parallel zur Faser $E_{x,mean}$ mit 18130 N/mm^2 von Erhart et al. [58] übernommen. Der E-Modul normal zur Faser $E_{y,mean}$ wurde mit 690 N/mm^2 aus der Zulassung für Brettschichtholz aus Buche [28] herangezogen.

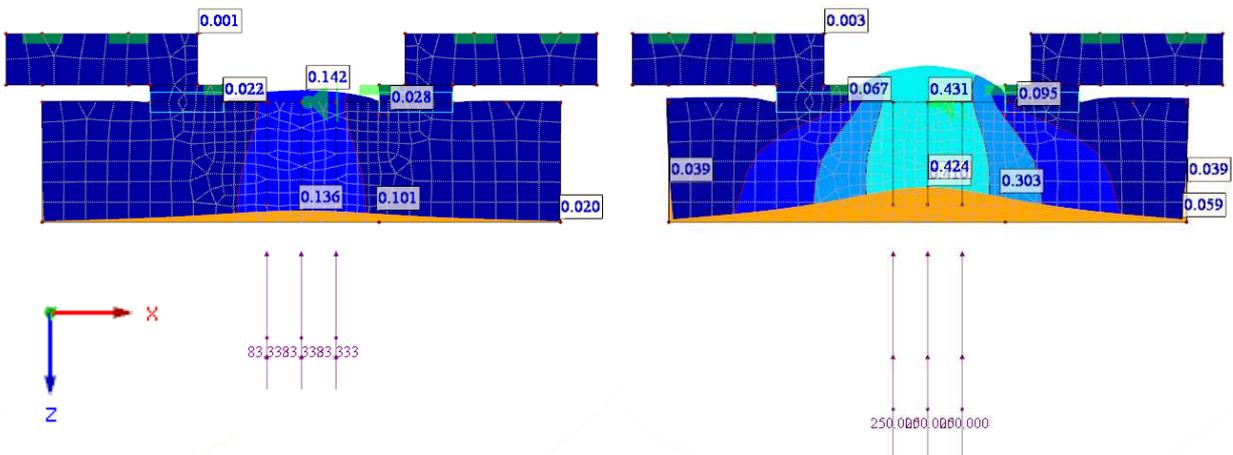


Abbildung 4-22 RFEM Modell; Vergleich mit Serie 8, Ergebnisse der Berechnung, Verformung in z -Richtung

Für den Vergleich zwischen dem RFEM Modell und den Prüfungen werden die Serien 3, 4 und 8 ausgewählt, da dort gut auswertbare Daten bezüglich der Querdruckverformungen vorhanden waren. Es wurde, wie in den Prüfungen, derselbe Lastniveaubereich (30 kN und 90 kN) betrachtet und mit der Gleichung (3.9) die Steifigkeit berechnet. Im Vergleich wurden die Steifigkeitswerte aus dem ersten Bereich K_I (Belastung), dem zweiten Bereich K_{II} (Wiederbelastung) und der FE-Simulation K_{fe} gegenübergestellt, siehe Tabelle 4-14.

Tabelle 4-14 *Querdrucksteifigkeit Vergleich der Mittelwerte der Serien mit dem FE-Modell unter Annahme der Materialparameter aus der Literatur*

| Serie | 3 | 4 | 8 |
|------------------|------|------|------|
| K_I [kN/mm] | 935 | 1199 | 1283 |
| K_{II} [kN/mm] | 1162 | 1242 | 1281 |
| K_{fe} [kN/mm] | 956 | 729 | 896 |

Es wurde weiters versucht Materialeigenschaften festzulegen, um die Ergebnisse den Prüfungen anzunähern. Dabei wurde der Schubmodul G_{xy} mit 1082 N/mm^2 , der E-Modul parallel zur Faser E_x mit 18130 N/mm^2 und der E-Modul normal zur Faser E_y mit 850 N/mm^2 angenommen.

Tabelle 4-15 *Querdrucksteifigkeit Vergleich der Mittelwerte der Serien mit dem FE-Modell und Annahme der Materialparameter zur Annäherung an die Prüfergebnisse*

| Serie | 3 | 4 | 8 |
|------------------|------|------|------|
| K_I [kN/mm] | 935 | 1199 | 1283 |
| K_{II} [kN/mm] | 1162 | 1242 | 1281 |
| K_{fe} [kN/mm] | 1204 | 875 | 1224 |

Bei der Auswertung aller Daten der Buchenbrettschichtholzprüfungen ergibt sich einen Wertebereich für die Querdrucksteifigkeit zwischen 411 KN/mm und 1760 kN/mm . Innerhalb einer Serie variiert die Steifigkeit mit einem Variationskoeffizienten von bis zu 30 %. Es kann keine allgemein gültige Aussage über die Querdrucksteifigkeit von Buchenholz in einem Winkel von 90° zur Faser getroffen werden und nur für jede spezielle Prüfkongfiguration die Steifigkeit ermittelt werden. Weitere Untersuchungen dahingehend werden auch bei dem Prüfaufbau des Einfeldträgers durchgeführt und mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen.

KAPITEL 5: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Folgenden wird eine abschließende Betrachtung der im Zuge der Masterarbeit durchgeführten Prüfungen, der erhaltenen Ergebnisse und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsprojekte gegeben.

Ziel der Forschungsarbeit war es, bei einer Verbindung mit einer rechtwinklig zur Faser liegenden axial beanspruchten Schraubengruppe in Hartlaubholz die Versagensmechanismen sowie den Widerstand zu untersuchen und die Anwendbarkeit vorhandener Modelle, erarbeitet für Nadelholz, für Produkte aus Hartlaubholz zu betrachten.

5-1 ZUSAMMENFASSUNG DER PRÜFUNGEN

Im Zuge der Prüfdurchführung wurden insgesamt 69 Referenzprüfungen mit einer Einzelschraube, 27 Prüfungen mit einer Reihenkonfiguration und 99 Prüfungen mit einer Gruppenkonfiguration ausgeführt. Die Gruppengröße bestand beim Großteil der Prüfungen aus 9 Schrauben. Es wurden auch Prüfungen mit 6 und 4 Schrauben durchgeführt. Dabei wurden die rechtwinklig zur Faser eingedrehten Schrauben in den Holzarten Buche, Birke und Furnierschichtholz aus Buche (Produkt BauBuche) geprüft. Das verwendete Material aus Buchenholz wies hohe Qualität auf. Die Birkenlamellen waren größtenteils Kernbretter mit einem Farbkern. Die Lamellen aus Buchen- und Birkenholz wurden zu Duo- und Trio-Trägern verklebt. Die Prüfungen wurden in einem „kleinen“ Prüfaufbau durchgeführt, wobei die Öffnungslänge zwischen den beiden Auflagern im Maximalfall 240 mm betrug. Die Prüfkörper hatten eine Länge von 600 mm, eine Breite zwischen 138 mm und 200 mm und eine Höhe zwischen 92 mm und 160 mm. Die verwendete Schraube RAPID® Hardwood [39] ist speziell für Hartlaubholz entwickelt und kann durch ihre hohe Zugtragfähigkeit sowie ihren hohen Torsionswiderstand in Hartlaubholzprodukten auch ohne Vorbohren eingesetzt werden. Es wurden Teilgewindeschrauben mit dem Durchmesser 8 mm mit einer Länge von 240 / 100 mm, 400 / 100 mm oder 400 / 300 mm verwendet. Die eingedrehten Schraubengruppen wurden gleichmäßig mit einer Zugkraft beansprucht. Dabei waren die möglichen Versagensmechanismen: Herausziehen, Schraubenbruch, Blockscheren und Reihenscheren der Gruppe. Das Aufspalten des Prüfkörpers trat nicht als maßgebliches Versagen, sondern zusätzlich zu den Versagensmechanismen auf.

Nach der Prüfdurchführung wurden die Holzfeuchte und die Rohdichte jedes Prüfkörpers bestimmt, sowie jeder Prüfkörper aufgeschnitten und das Rissbild dokumentiert. Im Prüfprotokoll wurden Auffälligkeiten der Prüfung, des Kraft-Weg-Verlaufes, des Rissbildes und sonstige Beobachtungen notiert und bei der Beurteilung der Daten und Ergebnisse mit einbezogen.

5-2 WICHTIGE ERKENNTNISSE

In wenigen Vorversuchen wurde der Abstand von den Schrauben zum Hirnholz $a_{1,c} = 5 d$ und von den Schrauben zum Rand $a_{2,c} = 3,5 d$ als geeignet befunden, damit **keine Spaltrisse** beim Eindrehen der Schrauben zum Rand hin auftreten. Dabei wurde auch beobachtet, dass mit höherer Eindrehgeschwindigkeit die Spaltneigung des Holzes zunimmt. In den Prüfungen wurden deshalb die Schrauben mit einer Eindrehgeschwindigkeit von ca. 60 bis 85 U/min eingedreht.

Im Eurocode 5 [1] wird die minimale effektive Einschraubtiefe mit $l_p \geq 6 d$ angegeben. In der Vorbemessung der Serien in Buchenholz wurde mit den vorliegenden Materialdaten ein benötigtes $l_{ef} \geq 12 d$ errechnet, um Schraubenbruch hervorzurufen. Bei der Durchführung der Prüfungen wurde jedoch ein $l_{ef} \geq 14 d$ benötigt, um Schraubenbruch sicherzustellen. Das heißt, dass bei der verwendeten Schraube mit $d = 8$ mm und dem verwendeten Buchenholz ein Bereich zwischen $6 d \leq l_{ef} \leq 14 d$ zu betrachten ist.

Bei der Durchführung der **Reihenprüfungen** wurden mit $n = 2$ oder 3 Schrauben hintereinander die Abstände in Faserrichtung zwischen $a_1 = 5 d$, $7 d$ und $10 d$ variiert, wobei die Schraube analog zu den Referenzprüfungen mit der Einzelschraube durch den Prüfkörper durchgeschraubt wurde und die Spitze aus dem Prüfkörper hinausragte. Der Prüfkörper bestand aus einer Lamelle Buchenholz. Ab dem Abstand $a_1 = 7 d$ zwischen den Schrauben trat nur Ausziehversagen auf. Unter Berücksichtigung des Konfidenzintervalls des Medians der betrachteten Serien konnte ab dem Abstand $a_1 = 7 d$ kein Unterschied zu der Einzelschraube festgestellt werden. Damit wurde die volle Tragfähigkeit auf dem Niveau des Mittelwertes der Schrauben für den Versagensmechanismus Ausziehen erreicht. Bei der Serie mit dem Abstand $a_1 = 5 d$ wurde das Versagen auf Rollschub beobachtet, das zu einem im Mittel um 20 % verringerten Widerstand führte. Weiters ergab eine Reduktion der Prüfkörperbreite von 160 mm auf 48 mm ($a_{2,c} = 3 d$) keinen nennenswerten Unterschied zur Vergleichsserie.

Um die Frage zu beantworten, ob das Rollschubversagen auch bei einer **mehrröhigen Gruppe** auftreten kann, wurde derselbe Abstand $a_1 = 5 d$ und dieselbe Einschraubtiefe bei einer Serie mit großen Abständen a_2 von bis zu $10 d$, aber diesmal mit Schraubenspitze im Prüfkörper, durchgeführt. Der steifere Prüfkörper führte dazu, dass kein Rollschubversagen auftrat, sondern die Schrauben aus dem Holz gezogen wurden.

Bei den Gruppenprüfungen wurde die Kraft-Verformungskurve und das **Rissbild** im Querschnitt zur Beurteilung des Versagensmechanismus herangezogen. Während bei Ausziehversagen keine oder nur oberflächliche Risse entlang der Schraubenreihen erkennbar waren, war beim Blockscherversagen der typische Querschnitt knapp oberhalb der Schraubenspitzen und Risse entlang der Schraubenreihen in Faserrichtung sichtbar. Bei näherer Betrachtung zeigten jene Prüfkörper mit $a_2 < 5 d$ nur vertikale Risse entlang der beiden äußeren Schraubenreihen, jene mit $a_2 \geq 5 d$ einen zusätzlichen Riss entlang der mittleren Schraubenreihe. Bei der weiteren Auswertung des Blockscherversagens wurde zwischen den beiden erwähnten Rissbildern nicht differenziert.

Bei den durchgeführten **Gruppenprüfungen in Buche und Birke** trat bei dem Abstand zwischen den Schrauben gemäß Eurocode 5 [1] $a_1 = 7 d$ und $a_2 = 5 d$ und der Einschraubtiefe l_{ef} für potentielles Ausziehversagen bei fünf von sechs Prüfungen der Versagensmechanismus auch vorwiegend auf. Die Widerstände lagen dabei auf dem Widerstandsniveau der auf Ausziehen versagten Einzelschraube. Diverse **ETAs** von selbstbohrenden Schrauben für den Holzbau (z. B. ETA-12/0373 [39]) erlauben die Abstände $a_1 \geq 5 d$ und $a_2 \geq 2,5 d$ ($3,5 d$), wenn gleichzeitig die Bedingung $a_1 \times a_2 = 25 d^2$ ($21 d^2$) erfüllt ist. Diese Angaben resultieren aus Einschraubprüfungen gemäß EAD 130118-01-0603 [24]. Serien in Buche, die diese Bedingungen erfüllen, weisen vorwiegend Blockscherversagen auf. Dennoch liegt der Widerstand dieser Kurzzeitprüfungen auf dem Niveau der Einzelschraube.

Auch engere Abstände wurden untersucht, $a_2 = 2,5 d$ mit $a_1 = 7,5 d$. Diese zeigten, dass durch eine Einbindelänge von $l_{emb} = 4 d$ der Widerstand erhöht werden kann und sich gleichzeitig auch das Versagen von vorwiegend Blockscheren auf vorwiegend Herausziehen ändert, da zur Abtragung der Beanspruchung mehr Volumen für die Gruppe greifbar wird.

Im Zusammenhang der Abstände zwischen den Schrauben mit der Einschraubtiefe werden auch jene Serien mit Schraubenbruch diskutiert. Die Gruppen mit den Abständen $a_1 \times a_2 = 7 d \times 2,5 d = 17,5 d^2$ und $5 d \times 3,5 d = 17,5 d^2$ führten trotz der kompakten Anordnung der Schrauben zum Versagen auf Stahlzugtragfähigkeit.

Zusammengefasst kann für Buche und Birke gesagt werden, dass bei Einhaltung der Mindestabstände zwischen den Schrauben mit allen Versagensmechanismen gerechnet werden muss. Bezüglich des Widerstandes sind aber im Gegensatz zu Fichtenholz, siehe Mahlknecht und Brandner 2019 [10], zumindest bei den hier untersuchten Gruppenanordnungen zwischen dem Auszieh- und Blockscherversagen keine Unterschiede in der mittleren Tragfähigkeit gegenüber jener der Einzelschraube mal der Anzahl der Schrauben in der Gruppe erkennbar.

Im Eurocode 5 [1] wird die **effektiv wirksame Verbindungsmittelanzahl** mit $n_{ef} = n^{0,9}$ angegeben. Dies entspricht bei einer Gruppe von $n = 9$ Schrauben einem $n_{ef} = 7,2$. In allen Prüfungen in Buche und Birke mit maßgeblichen Ausziehversagen lag $n_{ef,05}$ auf dem charakteristischen Niveau über $1,0 n$ ($n_{ef} = 9,0$) und im Vergleich der Mittelwerte bei $n_{ef,mean} = 1,0 n$ ($n_{ef} = 9,0$). Aufgrund dessen, dass die Bruchstelle bei

Stahlversagen der Einzelschraube an einer anderen Stelle als bei der Gruppe auftrat, ergaben sich für die Gruppe höhere Werte der Tragfähigkeit als bei der Einzelschraube, welche sich durch eine unterschiedliche Stahlzugtragfähigkeit an den Bruchstellen erklären lässt. So ist davon auszugehen, dass alle Schrauben in der Gruppe ihre Stahlzugtragfähigkeit erreicht haben. Weitere Untersuchungen sind dazu noch ausständig. Dennoch liegt diesbezüglich die Regelung im Eurocode 5 [1] für die verwendeten Holzarten jedenfalls auf der sicheren Seite.

Beim Furnierschichtholz aus Buche (**BauBuche**) treffen die oben genannten Beobachtungen des Zusammenhangs zwischen Versagensmodi, geometrischer Anordnung der Gruppen und Widerstand nicht zu. Bei BauBuche trat erst ab einer Gruppengröße von vier Schrauben und den Abständen $a_1 = a_2 = 10 d$ bei $l_{ef} = 7 d$ das Versagen Herausziehen auf. Sowohl der charakteristische als auch der Mittelwert vergleichen mit den Referenzwerten der Einzelschraube ergab eine Erhöhung der effektiv wirksamen Verbindungsmittelanzahl in der Gruppe $n_{ef,mean}$ und $n_{ef,05}$ von etwa 10 %. Die Prüfungen an Gruppen mit geringeren Zwischenabständen führten zum Versagen durch Blockscheren verbunden mit einem deutlich reduzierten Widerstand im Vergleich zum potenziellen Auszieh Widerstand. Bei den nach Eurocode [1] zulässigen Mindestabständen lag der mittlere Widerstand der Gruppe rund 20 % unter dem Referenzwert der Einzelschraube.

In einer Finite Elemente (FE) Untersuchung in dem Statik Programm RFEM [12] wurde die Plausibilität der Querdrucksteifigkeitsmessung näher betrachtet. Die Prüfkonfiguration wurde mittels eines 2D Modelles angenähert. Darin wurden die Prüfkörper als Fläche mit orthotropen Eigenschaften abgebildet. Durch die Variation der Eingangsgrößen wurden die relevanten Materialeigenschaften erkannt und der Literatur entnommen. Ausschlaggebend war der Schubmodul $G_{xy,mean}$ (1082 N/mm², Erhart et al. [58]), der E-Modul parallel zur Faser $E_{x,mean}$ (18130 N/mm², Erhart et al. [58]) und der E-Modul normal zur Faser $E_{y,mean}$ (690 N/mm², Zulassung für Brettschichtholz aus Buche [28]). Es wurden drei Serien mit dem Modell verglichen. Je nach Konfiguration der Abstände und Einschraubtiefen der Prüfungen wurde mit der Variation des Parameters $E_{y,mean}$ zwischen 690 N/mm² und 850 N/mm² eine Übereinstimmung mit der Querdrucksteifigkeit in den Prüfungen erreicht.

5-3 AUSBLICK

Im Umfang der Forschungsarbeit des Institutes für Holzbau und Holztechnologie zu axial belasteten Schraubengruppen in Hartlaubholz ist im Rahmen des Forschungsvorhabens `hardwood_joint` - Innovative Verbindungslösungen für Bauteile aus Hartholz zudem geplant, die Ergebnisse der Zusammenhänge zwischen Versagensmechanismen und Gruppenanordnungen aus dieser Masterarbeit entsprechend an Einfeldträgern mit einer Länge bis zu 3 m zu überprüfen. Damit wird das Ziel verfolgt, bei entsprechender Einbindetiefe l_{emb} auch am Einfeldträger Ausziehversagen bzw. Schraubenbruch zu erreichen. Der Einfluss der entstehenden Biegespannungen soll im Vergleich des nahen Auflagers mit den Trägern mit $L = 2.360$ mm und $L = 3.000$ mm stattfinden. Auch der Einfluss l_p / H wird untersucht bzw. validiert. In dem großen Prüfaufbau werden auch die Ergebnisse bzgl. der Steifigkeit überprüft.

Die effektive Einschraubtiefe und der Versagensmechanismus weisen einen Zusammenhang in dieser Arbeit auf. Daraus kann eine Abgrenzung des Versagensmechanismus Blockscheren für Verbindungen mit geringen Abständen zwischen den Verbindungsmitteln ermöglicht werden. Dies erfordert eine dreidimensionale Betrachtung der Verbindungsmittelanordnung.

Ein möglicher Einfluss des Aufspaltens auf die Ausziehfestigkeit der Schraube bezogen auf die Referenzprüfungen und Gruppenprüfungen ist zu untersuchen. Da im Zusammenhang mit den Referenzprüfungen nicht klar festgestellt werden konnte, inwieweit die Schraubenspitze mitträgt, sollten dazu noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Weiters ist die Beeinflussung der Tragfähigkeit durch ein Aufspalten des Prüfkörpers, welches durch Belastung hervorgerufen wurde, näher zu betrachten.

Der genaue Zusammenhang der Eindrehgeschwindigkeit und Spaltneigung von Hartlaubholz ist genauer zu untersuchen. Gegebenenfalls kann durch langsames Eindrehen eine Erhöhung des Ausziehwiderstandes und eine Verringerung der Spaltneigung erreicht werden. Jedoch stellt sich die Frage, ob eine Vorgabe bezüglich der Eindrehgeschwindigkeit einer Schraube praxisrelevant ist.

Die durchgeführten Prüfungen weisen nur die Kurzzeittragfähigkeit der Verbindung aus. Deshalb sollte auch eine Langzeitbetrachtung der Tragfähigkeit durchgeführt werden, um die Tragfähigkeit auch bei längerer Beanspruchung zu bewerten und die gegebenen Regelungen nach Eurocode 5 [1] und diverse ETAs überprüfen zu können.

ANHANG A LITERATURVERZEICHNIS

- [1] ÖNORM EN 1995-1-1; Eurocode 5 Bemessung und Konstruktion von Holzbauten, Austrian Standards Institute, 2015.
- [2] „Bundesforschungszentrum für Wald,“ 2011. [Online]. Available: <http://www.bfw.ac.at/>. [Zugriff am 10 Juni 2020].
- [3] „Bundeswaldinventur Deutschland,“ 2012. [Online]. Available: <https://bwi.info/>. [Zugriff am 10 Juni 2020].
- [4] K. Schweiger, Axial beanspruchte Schraubengruppen in Laubholz – Hirnholzanschluss und geneigt angeordnete Schraubengruppen, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2020 in Bearbeitung.
- [5] D. M. Carradine, M. P. Newcombe und A. H. Buchanan, Using screws for structural applications in laminated veneer lumber, Schweiz: CIB-W18/42-7-7, 2009.
- [6] D. Schoenmakers, Fracture and failure mechanisms in timber loaded perpendicular to the grain by mechanical connections, Netherlands: Ipskamp Drukkers B.B., Enschede, 2010.
- [7] S. Plieschounig, Ausziehverhalten axial beanspruchter Schraubengruppen, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2010.
- [8] U. Mahlknecht, Untersuchung von rechtwinklig zur Faser eingebrachten, axial beanspruchten Schraubengruppen im Vollholz und Brettsper Holz, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2011.
- [9] U. Mahlknecht, R. Brandner, A. Ringhofer und G. Schickhofer, Resistance and failure modes of axially loaded groups of screws, RILEM, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2013.
- [10] U. Mahlknecht und R. Brandner, Block shear failure mechanism of axially-loaded groups of screws, Graz, Jour, 2019.
- [11] H. Blaß und M. Flaig, Blockscheren von Holzbauteilen im Verbindungsbereich axial beanspruchter Vollgewindeschrauben, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2019.
- [12] RFEM 5.17.01 Student, Dlubal Software GmbH.
- [13] R. Mombächer, Holz-Lexikon: Nachschlagewerk für die Holz- und Forstwirtschaft, Stuttgart: DRW-Verl., 1988.
- [14] B. Wittchen, E. Josten und T. Reiche, Holzfachkunde, Wiesbaden: Strauss Offsetdruck, 2006.
- [15] R. Wagenführ, Holzatlas, München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2007.
- [16] Holz als konstruktiver Baustoff, Bonn, Deutschland: Holzabsatzfonds, 2008.
- [17] U. Hübner, Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile, Graz: Technische Universität Graz, 2013.
- [18] S. Aicher und D. Ohnesorge, Shear strength of glued laminated timber made from European beech timber, Germany: Springer - Verlag 2010, 2011.

- [19] G. Marten, Spalten und Tragfähigkeit von Nagelverbindungen, Fortschritte und Forschung im Bauwesen, Reihe D, Berichte des Beirates für Bauforschung beim Bundesminister für Wohnungsbau, Heft 9, 1953.
- [20] K. Egner, Verhalten von Nagelverbindungen mit dicken Drahtstiften, Fortschritte und Forschung im Bauwesen, Reihe D, Berichte des Beirates für Bauforschung beim Bundesminister für Wohnungsbau, Heft 9, Versuche für den Holzbau, 1953.
- [21] J. Ehlbeck und W. Siebert, Ermittlung von Mindestholzabmessungen und Mindestnagelabständen bei Nagelverbindungen mit europäischem Douglasienholz, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1988.
- [22] H. J. Blaß und M. Schmid, Spaltgefahr von Nadelhölzern, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, 2002.
- [23] M. Schmid, Anwendung der Bruchmechanik auf Verbindungen mit Holz, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, 2002.
- [24] EAD 130118-01-0603; Screws for use in timber constructions, European Organisation for Technical Assessments EOTA, 2019.
- [25] E.-C. M., Leistungsfähige Verbindungen des Ingenieurholzbaus - Einsatzmöglichkeiten für Nadel- und Laubholz, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2015.
- [26] I. Burgert, A. Bernasconi, K. Niklas und D. Eckstein, The Influence of Rays on the Transverse Elastic Anisotropy in Green Wood of Deciduous Trees, Hamburg; New York: Holzforschung / Vol.55 / 2001 / No.5, 2001.
- [27] ÖNORM EN 338; Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen;, Wien: Austrian Standards Institute, 2016.
- [28] Z-9.1-679; BS-Holz aus Buche und BS-Holz Buche-Hybridträger und zugehörige Bauarten, Wuppertal, Deutschland: Deutsches Institut für Bautechnik, 2019.
- [29] ÖNORM DIN 4074-5; Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit, Teil 5: Laubschnittholz, Wien : Austrian Standards Institute, 2009.
- [30] Informationsdienst Holz: Herstellung und Eigenschaften von geklebten Vollholzprodukten, Wuppertal: Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V., 2019.
- [31] R. Pollmeier, Produktion und Weiterverarbeitung von Buchen-Furnierschichtholz, Deutschland, Creuzburg: 20. Internationales Holzbau-Forum IHF 2014, 2014.
- [32] Z-9.1-837; Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz, Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2013.
- [33] ETA-14/0354; Träger BauBuche GL75, Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2018.
- [34] T. Ehrhart, European Beech Glued Laminated Timber, Zürich: ETH Zürich, 2019.
- [35] ÖNORM EN 14080; Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen, Wien: Austrian Standards Institute, 2013.
- [36] H. N. TIMBER, „Brettschichtholz Birke,“ [Online]. Available: https://www.hasslacher.com/data/_dateimanager/broschuere/HNT_News_Birke_BSH_DE_Web.pdf. [Zugriff am 24.08.2020].
- [37] „Pollmeier,“ 2018. [Online]. Available: www.pollmeier.com. [Zugriff am 10. Juni 2020].

- [38] R. Brandner, A. Ringhofer und T. Reichinger, Performance of axially-loaded self-tapping screws in hardwood: Properties, Graz, Ried im Innkreis, 2018.
- [39] ETA-12/0373; Schmid Schrauben Hainfeld GmbH, Österreichisches Institut für Bautechnik, 2017.
- [40] U. Mahlknecht und R. Brandner, Untersuchung des mechanischen Verhaltens von Schrauben - Verbindungsmittelgruppen in VH, BSH und BSP, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2013.
- [41] U. Mahlknecht, R. Brandner und M. Augustin, Block shear failure mode of axially loaded groups of screws, Wien: WCTE 2016, World Conference on Timber Engineering, 2016.
- [42] ÖNORM EN 26891: 1991-08-01; Holzbauwerke; Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln; Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens (ISO 6891:1983).
- [43] Produktinformation PI 416 1.0107 - Blatt 1 und Blatt 2; Stand-Prüfmaschinen Z050 bis Z250 der Allround-Line Zwick GmbH & Co. KG, Ulm.
- [44] ÖNORM EN 1382; Holzbauwerke - Prüfverfahren - Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmitteln, Wien: Austrian Standards Institute, 2016.
- [45] ÖNORM EN 1383; Holzbauwerke - Prüfverfahren - Prüfung von Holzverbindungsmitteln auf Kopfdurchziehen, Wien: Austrian Standards Institute, 2016.
- [46] G. Pirnbacher, Biegesteife Verbindungen im Holzbau, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 2005.
- [47] Dynea, „Prefere 4546, Flüssiger Melamin-Harnstoff Klebstoff für die Holzindustrie,“ [Online]. Available: www.dynea.com. [Zugriff am April 2019].
- [48] R. Brandner, „Properties of axially loaded self-tapping screws with focus on application in hardwood,“ in *Wood Material Science & Engineering*, Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2019.
- [49] ÖNORM EN 1382; Holzbauwerke - Prüfverfahren - Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmitteln, Wien: Austrian Standards Institute, 1999.
- [50] ÖNORM EN 384; Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte, Austrian Standards Institute, 2016.
- [51] ÖNORM EN 13183-1; Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren, Wien: Austrian Standards Institute, 2004.
- [52] ÖNORM EN 14358; Holzbauwerke - Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte, Wien: Austrian Standards Institute, 2016.
- [53] F. Kollmann, „Über die Sorption von Holz und ihre exakte Bestimmung,“ in *Holz als Roh- und Werkstoff*, München, Holzforschung München, 1959.
- [54] Pollmeier, Leistungserklärung BauBuche GL75 (PM – 008 – 2018), Creuzburg: Pollmeier, 2018.
- [55] M. Frese, Density variations in beech LVL: influence on insertion moment and withdrawal capacity of screws, Inter / 52-07-03, 2019.
- [56] T. Erhart und R. Brandner, Rolling shear: Test configurations and properties of some European soft- and hardwood species, Jour, 2019.

- [57] G. Pirnbacher, Base parameters of self-tapping screws, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2009.
- [58] T. Erhart, R. Steiger, P. Palma und A. Frangi, Mechanical properties of European beech glued laminated timber, INTER, 2018.
- [59] S. Aicher, C. Zachary und M. Hirsch, Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations, Stuttgart: De Gruyter, 2016.
- [60] V. Hütter, Bestimmung der Rollschubfestigkeiten und -steifigkeiten von Furnierschichthölzern aus Laubholz, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2017.

ANHANG B ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | | |
|----------------|--|----|
| Abbildung 1-1 | Hirnholzanschluss, $\alpha = 0^\circ$, $\gamma = \alpha$, freie Oberfläche | 2 |
| Abbildung 1-2 | Queranschluss, $\alpha = 90^\circ$, $\gamma = \alpha$, freie Oberfläche..... | 3 |
| Abbildung 1-3 | Anschluss mit geneigt angeordneten Schrauben und freier Oberflächenverformung, $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, $\gamma = \alpha$ | 3 |
| Abbildung 1-4 | Anschlüsse mit geneigt angeordneten Schrauben und gesperrter Oberflächenverformung, $\gamma \neq \alpha$ | 3 |
| Abbildung 2-1 | Darstellung fakultativer Farbkern des verwendeten Birkenholzes..... | 7 |
| Abbildung 2-2 | Zweidimensionale Modellannahme mit den auf die Gewindeflanke wirkenden Kräfte (Enders-Comberg [25]) | 8 |
| Abbildung 2-3 | Graphische Darstellung der geometrischen Parameter im Eurocode 5 [1]..... | 12 |
| Abbildung 2-4 | Aufspalten bei Beanspruchung, Draufsicht (links) und Querschnitt eines Prüfkörpers mit mittigem Spaltriss (rechts) | 13 |
| Abbildung 2-5 | Schraubenbruch durch Überschreitung der Stahlzugfestigkeit (links) und typisches Kraft-Wegdiagramm (Serie 5/2) (rechts), BSH-Buche | 14 |
| Abbildung 2-6 | Ausziehversagen (links) und typisches Kraft-Wegdiagramm (Serie 1/3) (rechts), BSH-Buche..... | 15 |
| Abbildung 2-7 | Versagensmechanismus Reihenscheren: bei 3×1 R5d (links), Prüfkongfiguration dazu mit Rollschubbereich (rechts)..... | 15 |
| Abbildung 2-8 | Querzugversagen (links) und typisches Kraft-Zeitdiagramm (rechts), BSH Fichte; aus Mahlknecht und Brandner [40] | 16 |
| Abbildung 2-9 | Blockscherversagen (links) und typisches Last-Verformungsdiagramm (Serie 19/4) (rechts), BauBuche | 17 |
| Abbildung 2-10 | Skizze der lastabtragenden Flächen bei einem Schraubenpaar, Plieschounig [7]..... | 18 |
| Abbildung 2-11 | Kenngrößen zum Blockschermodell nach Mahlknecht und Brandner [10] | 20 |
| Abbildung 2-12 | Schematische Darstellung des Belastungsverlaufes und des sequentiellen Versagens einzelner Flächen einschließlich Lastumlagerungen im Zuge des Blockscherversagens | 21 |
| Abbildung 3-1 | Geometrieparameter Gruppe, Darstellung Schnitt (links) und Grundriss (rechts)..... | 26 |
| Abbildung 3-2 | Geometrische Parameter Schraube im Holz..... | 26 |
| Abbildung 3-3 | Einschraubtiefen Referenz (links); Serie 12(Mitte); Serie 17 (rechts)..... | 26 |
| Abbildung 3-4 | Zuschnitt Prüfkörper BauBuche Gruppe | 28 |
| Abbildung 3-5 | Zuschnitt Prüfkörper BauBuche Einzel..... | 28 |
| Abbildung 3-6 | Zuschnitt Prüfkörper Buche Gruppe, Breite $b = 210$ mm | 28 |
| Abbildung 3-7 | Zuschnitt Prüfkörper Buche Gruppe, Breite $b = 140$ mm | 28 |
| Abbildung 3-8 | Zuschnitt Prüfkörper Buche Einzel | 29 |
| Abbildung 3-9 | Zuschnitt Prüfkörper Birke Gruppe..... | 29 |
| Abbildung 3-10 | Zuschnitt Prüfkörper Birke Einzel | 29 |
| Abbildung 3-11 | Lagerung Klimakammer (links), Verklebung der Prüfkörper in der Presse (rechts) .. | 30 |
| Abbildung 3-12 | Prüfaufbau für Einzelausziehprüfungen (links) und Schraubenreihen (rechts)..... | 31 |
| Abbildung 3-13 | Gesamter Aufbau der Gruppenprüfung (links), Nahaufnahme Schraubengruppe, Lagerung und Wegaufnehmer oben (rechts) | 32 |
| Abbildung 3-14 | Darstellung des Aufbaus und der Position der Wegaufnehmer..... | 32 |
| Abbildung 3-15 | Wegaufnehmer Oben, Unten und Wegaufnehmer Querdruck | 33 |
| Abbildung 3-16 | Eindreihen der Schraube mit Einschraubhilfe..... | 36 |
| Abbildung 3-17 | Exemplarischer Prüfablauf einer Gruppenprüfung aus Serie 6; $a_1 = 7$ d, $a_2 = 5$ d, $l_{ef} = 56$ mm, $v = 1,0$ mm/min..... | 37 |
| Abbildung 3-18 | Aufgeschnittener Prüfkörper | 38 |
| Abbildung 3-19 | Quantifizierung des Klebefugenversagens | 39 |
| Abbildung 3-20 | Auswertung Anteil Klebefugenversagen, halbe Fläche zwischen Mitte der Schraubengruppe und Auflagerrand..... | 39 |

| | | |
|----------------|---|----|
| Abbildung 3-21 | Auswertung Anteil Klebefugenversagen, halbe Fläche innerhalb der Schraubengruppe | 40 |
| Abbildung 3-22 | Weg-Kraft -Diagramm für die Bestimmung der Steifigkeiten K_I und K_{II} einer Gruppenprüfung aus Serie 6; $a_1 = 7 d$, $a_2 = 5 d$, $l_{ef} = 56 \text{ mm}$, $v = 1,0 \text{ mm/min}$ | 43 |
| Abbildung 4-1 | Boxplot der mittleren Holzfeuchte aller Serien in Buche..... | 47 |
| Abbildung 4-2 | Boxplot der mittleren Holzfeuchte aller Serien in Birke (links) und BauBuche (rechts) | 47 |
| Abbildung 4-3 | Querschnitte für die Herstellung der Prüfkörper BauBuche, links: Gruppe, rechts: Einzel | 48 |
| Abbildung 4-4 | Boxplot der mittleren Rohdichte ρ_{12} aller Serien in Buche | 49 |
| Abbildung 4-5 | Boxplot der mittleren Rohdichte ρ_{12} aller Serien in Birke (links) und BauBuche (rechts) | 49 |
| Abbildung 4-6 | Ausziehfestigkeit aller Einzelschraubenprüfungen verglichen mit Berechnung nach Brandner et al. [38], Brandner [48] und Hübner [17] | 51 |
| Abbildung 4-7 | Piktogramme Variation Reihenprüfungen | 52 |
| Abbildung 4-8 | Boxplot der Ausziehfestigkeiten aller Prüfungen an Schraubenreihen | 53 |
| Abbildung 4-9 | Rollschubversagen bei Serie R5d mit $a_1 = 5 d$ | 54 |
| Abbildung 4-10 | Piktogramme der Serien mit Ausziehversagen..... | 57 |
| Abbildung 4-11 | Ausziehwiderstand und -festigkeit bzw. maximale Kraft und Ausziehspannung zum Versagenszeitpunkt Serien in Buche mit Ausziehversagen..... | 58 |
| Abbildung 4-12 | Ausziehwiderstand und -festigkeit bzw. maximale Kraft und Ausziehspannung zum Versagenszeitpunkt Serien in Birke und BauBuche mit Ausziehversagen..... | 58 |
| Abbildung 4-13 | Rissbild abhängig vom Abstand a_2 : Drei Risse entlang jeder Schraubenreihe in Faserrichtung (links) und zwei Risse entlang der äußeren Schraubenreihen (rechts) | 60 |
| Abbildung 4-14 | Piktogramme der Serien mit Blockscherversagen | 60 |
| Abbildung 4-15 | Ausziehwiderstand und -festigkeit bzw. maximale Kraft und Ausziehspannung zum Versagenszeitpunkt Serien in Buche mit Blockscherversagen | 61 |
| Abbildung 4-16 | Ausziehwiderstand und -festigkeit bzw. maximale Kraft und Ausziehspannung zum Versagenszeitpunkt Serien in Birke und BauBuche mit Blockscherversagen..... | 61 |
| Abbildung 4-17 | Stahlzugtragfähigkeit pro Schraube der Serien mit Schraubenbruch | 64 |
| Abbildung 4-18 | Schraubenbruchbereiche, Vergleich Referenz (zweite von oben) Gruppe (oben)..... | 64 |
| Abbildung 4-19 | Steifigkeitsmodell der Verbindung | 68 |
| Abbildung 4-20 | Wegaufnehmer Querdruck (links) und Skizze Position Wegaufnehmer rel (rechts).. | 69 |
| Abbildung 4-21 | RFEM Modell; Vergleich mit Serie 8, Belastung links 30 kN, Belastung rechts 90 kN | 70 |
| Abbildung 4-22 | RFEM Modell; Vergleich mit Serie 8, Ergebnisse der Berechnung, Verformung in z-Richtung..... | 70 |

ANHANG C PRÜFDATEN JE PRÜFKÖRPER

Tabelle 5-1 Prüfdaten der Prüfkörper Gruppe

| Serie | Nr. | Prüfkörper | F_{max} | σ_{ax} | $\sigma_{ax,ref}$ | K_I | $K_{I,rel}$ | K_{II} | $K_{II,rel}$ | Versagen Auswertung | F_{Ist} | ρ_{I2} | u | Holzart |
|-------|-----|--------------------------------|-----------|----------------------|-------------------|---------|-------------|----------|--------------|---------------------|-----------|----------------------|-------|---------|
| [-] | [-] | [-] | [kN] | [N/mm ²] | [kN/mm] | [kN/mm] | [kN/mm] | [kN/mm] | [kN/mm] | [-] | [kN] | [kg/m ³] | [%] | [-] |
| 1 | 1 | BU-9-148-a10d-a5d-01-T280-3-4 | 169,3 | 15,6 | 14,7 | - | - | - | - | H+A | 76,08 | 757 | 10,4% | BU |
| 1 | 2 | BU-9-148-a10d-a5d-02-T274-1-2 | 156,9 | 14,5 | 15,9 | 53 | - | 53 | - | H+A | 152,9 | 687 | 10,2% | BU |
| 1 | 3 | BU-9-148-a10d-a5d-03-T248-3-4 | 146,4 | 13,5 | 14,1 | 53 | - | 54 | - | H | - | 708 | 12,0% | BU |
| 1 | 4 | BU-9-148-a10d-a5d-04-T267-3-4 | 174,0 | 16,0 | 15,9 | 54 | - | 53 | - | H | 121,8 | 732 | 10,5% | BU |
| 1 | 5 | BU-9-148-a10d-a5d-05-T276-1-2 | 131,6 | 12,1 | 17,3 | 58 | - | 52 | 838 | H | 102 | 584 | 9,4% | BU |
| 1 | 6 | BU-9-148-a10d-a5d-06-T222-1-2 | 197,3 | 18,2 | 16,4 | 56 | 926 | 57 | 1004 | H+A | 154,7 | 777 | 10,8% | BU |
| 2 | 1 | BU-9-148-a5d-a5d-01-T229-3-4 | 166,2 | 15,3 | 13,3 | 46 | 801 | 47 | 826 | B+K | 157,2 | 795 | 11,9% | BU |
| 2 | 2 | BU-9-148-a5d-a5d-02-T230-1-2 | 154,8 | 14,3 | 15,8 | 44 | - | 46 | - | B+K | - | 683 | 11,2% | BU |
| 2 | 3 | BU-9-148-a5d-a5d-03-T232-1-2 | 138,9 | 12,8 | 12,8 | 45 | - | 48 | - | B+K | 118,9 | 728 | 11,3% | BU |
| 2 | 4 | BU-9-148-a5d-a5d-04-T237-1-2 | 156,5 | 14,4 | 14,1 | 48 | - | 49 | - | B | 113,7 | 740 | 9,2% | BU |
| 2 | 5 | BU-9-148-a5d-a5d-05-T280-1-2 | 158,5 | 14,6 | 14,0 | 48 | - | 50 | 1200 | B+K | - | 747 | 10,4% | BU |
| 2 | 6 | BU-9-148-a5d-a5d-06-T228-1-2 | 155,4 | 14,3 | 15,1 | 46 | - | 48 | 701 | B+K | 103,8 | 705 | 10,9% | BU |
| 3 | 1 | BU-9-148-a5d-a5d-01-T228-3-4 | 145,1 | 13,4 | 13,5 | 48 | - | 48 | 1377 | B | - | 723 | 10,9% | BU |
| 3 | 2 | BU-9-148-a5d-a5d-02-T243-1-2 | 146,6 | 13,5 | 14,4 | 50 | 810 | 49 | - | H | - | 700 | 9,1% | BU |
| 3 | 3 | BU-9-148-a5d-a5d-03-T235-1-2 | 174,6 | 16,1 | 13,4 | 48 | 1083 | 50 | - | H | - | 817 | 12,0% | BU |
| 3 | 4 | BU-9-148-a5d-a5d-04-T231-1-2 | 156,4 | 14,4 | 14,8 | 49 | 823 | 49 | - | B | - | 718 | 10,6% | BU |
| 3 | 5 | BU-9-148-a5d-a5d-05-T267-1-2 | 149,9 | 13,8 | 13,8 | 50 | 930 | 50 | 1021 | B | 121,2 | 728 | 10,6% | BU |
| 3 | 6 | BU-9-148-a5d-a5d-06-T229-1-2 | 164,4 | 15,1 | 13,7 | 48 | 1033 | 48 | 1088 | B | - | 774 | 11,8% | BU |
| 4 | 1 | BU-6-196-a7d-a25d-01-T245 | 182,2 | 12,6 | 13,7 | 39 | - | 42 | - | B | - | 691 | 10,0% | BU |
| 4 | 2 | BU-6-196-a7d-a25d-02-T273-299 | 197,6 | 13,7 | 14,0 | 41 | 1116 | 42 | 1104 | B | - | 718 | 10,6% | BU |
| 4 | 3 | BU-6-196-a7d-a25d-03-T255-001 | 188,3 | 13,0 | 13,9 | 41 | - | 43 | - | H+A | 183,6 | 699 | 9,3% | BU |
| 4 | 4 | BU-6-196-a7d-a25d-04-T250-221 | 161,7 | 11,2 | 11,9 | 41 | 1237 | 40 | - | H+A | - | 700 | 10,3% | BU |
| 4 | 5 | BU-6-196-a7d-a25d-05-T299-001 | 199,8 | 13,8 | 17,4 | 41 | - | 42 | - | H+A | - | 630 | 10,8% | BU |
| 4 | 6 | BU-6-196-a7d-a25d-06-T256 | 188,3 | 13,0 | 13,3 | 41 | 1247 | 42 | 1382 | B | - | 717 | 10,5% | BU |
| 5 | 1 | BU-6-1120-a7d-a25d-01-T295-242 | 216,2 | 11,9 | 13,9 | 47 | 1347 | 43 | 1217 | H+A | - | 663 | 10,8% | BU |
| 5 | 2 | BU-6-1120-a7d-a25d-02-T255-254 | 227,6 | 12,6 | 14,0 | 42 | 1310 | 44 | - | S | - | 681 | 9,4% | BU |
| 5 | 3 | BU-6-1120-a7d-a25d-03-T286 | 229,2 | 12,7 | 13,6 | 45 | 1258 | 48 | 1104 | S | - | 697 | 9,6% | BU |
| 5 | 4 | BU-6-1120-a7d-a25d-04-T278 | 228,8 | 12,6 | 12,0 | 40 | 752 | 45 | 661 | S | - | 755 | 10,6% | BU |
| 5 | 5 | BU-6-1120-a7d-a25d-05-T277 | 227,8 | 12,6 | 12,1 | 45 | 1529 | 50 | 1313 | S | - | 745 | 10,6% | BU |
| 6 | 1 | BU-9-156-a7d-a5d-01-T265-3-4 | 185,0 | 14,6 | 15,3 | 53 | 599 | 55 | - | H+A | - | 709 | 10,1% | BU |
| 6 | 2 | BU-9-156-a7d-a5d-02-T248-1-2 | 154,1 | 12,2 | 13,1 | 54 | 1228 | 51 | - | H+A | - | 697 | 12,1% | BU |
| 6 | 3 | BU-9-156-a7d-a5d-03-T222-3-4 | 200,9 | 15,9 | 13,7 | 63 | 1262 | 65 | 1411 | H+A | 161,5 | 798 | 11,5% | BU |
| 6 | 4 | BU-9-156-a7d-a5d-04-T290-3-4 | 236,0 | 18,6 | 15,4 | 53 | - | 53 | 898 | B | 228 | 822 | 11,0% | BU |
| 6 | 5 | BU-9-156-a7d-a5d-05-T243-3-4 | 189,3 | 14,9 | 15,9 | 53 | 822 | 54 | 771 | H+A | - | 700 | 9,1% | BU |
| 6 | 6 | BU-9-156-a7d-a5d-06-T232-3-4 | 184,5 | 14,6 | 14,6 | 55 | 1011 | 55 | 890 | H+A | - | 728 | 11,3% | BU |

| Serie | Nr. | Prüfkörper | F_{max} | σ_{ax} | $\sigma_{ax,ref}$ | K_I | $K_{I,rel}$ | K_{II} | $K_{II,rel}$ | Versagen Auswertung | F_{Ist} | $\rho/2$ | u | Holzart |
|-------|-----|--------------------------------|-----------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------|----------------------|-------|---------|
| [-] | [-] | [-] | [kN] | [N/mm ²] | [kN/mm ²] | [-] | [kN] | [kg/m ³] | [%] | [-] |
| 7 | 1 | BU-9-156-a5d-a5d-01-T264 | 192,2 | 15,2 | 15,6 | 55 | 1309 | 57 | 1151 | B | - | 717 | 10,3% | BU |
| 7 | 2 | BU-9-156-a5d-a5d-02-T223-295 | 172,9 | 13,7 | 15,8 | 56 | 922 | 55 | 900 | B | - | 665 | 10,6% | BU |
| 7 | 3 | BU-9-156-a5d-a5d-03-T286 | 188,5 | 14,9 | 15,7 | 56 | 1275 | 57 | - | B | - | 704 | 10,4% | BU |
| 7 | 4 | BU-9-156-a5d-a5d-04-T242 | 154,2 | 12,2 | 13,6 | 59 | - | 54 | - | H | - | 678 | 11,9% | BU |
| 7 | 5 | BU-9-156-a5d-a5d-05-T250 | 152,1 | 12,0 | 15,1 | 59 | 1176 | 55 | - | B | - | 630 | 9,3% | BU |
| 7 | 6 | BU-9-156-a5d-a5d-06-T223 | 163,0 | 12,9 | 15,3 | 55 | 979 | 54 | 959 | B | - | 654 | 11,2% | BU |
| 8 | 1 | BU-6-1120-a5d-a35d-01-T225 | 228,4 | 12,6 | 13,6 | 42 | 1172 | 44 | 1216 | S+A | - | 696 | 10,7% | BU |
| 8 | 2 | BU-6-1120-a5d-a35d-02-T292-246 | 223,5 | 12,3 | 14,0 | 40 | 1238 | 43 | 1383 | S+ | - | 672 | 10,0% | BU |
| 8 | 3 | BU-6-1120-a5d-a35d-04-T238 | 227,8 | 12,6 | 12,7 | 40 | 852 | 42 | 930 | S | - | 722 | 11,6% | BU |
| 8 | 4 | BU-6-1120-a7d-a35d-05-T236 | 227,4 | 12,6 | 13,0 | 39 | 1333 | 42 | 1353 | S | - | 712 | 9,3% | BU |
| 8 | 5 | BU-6-1120-a7d-a35d-06-T279 | 229,2 | 12,7 | 13,5 | 41 | 1269 | 44 | 1051 | S | - | 699 | 10,7% | BU |
| 8 | 6 | BU-6-1120-a7d-a35d-07-T260 | 228,6 | 12,6 | 11,4 | 41 | 1833 | 44 | 1759 | S | - | 778 | 10,6% | BU |
| 9 | 1 | BI-9-156-a7d-a5d-01-T7-2 | 132,1 | 10,4 | 9,9 | 71 | 1204 | 72 | 1121 | H+A | - | 607 | 10,6% | BI |
| 9 | 2 | BI-9-156-a7d-a5d-02-T2-3 | 131,3 | 10,4 | 10,2 | 75 | 843 | 71 | 816 | H+A | - | 593 | 10,8% | BI |
| 9 | 3 | BI-9-156-a7d-a5d-03-T1-6 | 123,0 | 9,7 | 10,0 | 76 | - | 75 | 1470 | H+A | - | 578 | 10,8% | BI |
| 9 | 4 | BI-9-156-a7d-a5d-04-T5-8 | 146,6 | 11,6 | 10,1 | 81 | - | 79 | 865 | H+A | - | 641 | 10,9% | BI |
| 9 | 5 | BI-9-156-a7d-a5d-05-T4-6 | 121,2 | 9,6 | 9,4 | 68 | 655 | 71 | 660 | H+A | 117,15 | 595 | 10,9% | BI |
| 9 | 6 | BI-9-156-a7d-a5d-06-T8 | 166,9 | 13,2 | 10,3 | 84 | 1151 | 82 | 1109 | B | - | 686 | 11,0% | BI |
| 10 | 1 | BB-9-156-a7d-a5d-01-T1-2 | 169,6 | 13,4 | 13,2 | 79 | 574 | 84 | 519 | B | 151,8 | 795 | 7,2% | BB |
| 10 | 2 | BB-9-156-a7d-a5d-02-T2-1 | 152,9 | 12,1 | 11,4 | 62 | 519 | 66 | 475 | B | 139,92 | 815 | 7,3% | BB |
| 11 | 1 | BU-9-156-a75d-a25d-01-T294 | 183,7 | 14,5 | 14,1 | 40 | 1455 | 41 | 1642 | B | - | 743 | 10,7% | BU |
| 11 | 2 | BU-9-156-a75d-a25d-02-T252 | 158,3 | 12,5 | 14,1 | 38 | - | 39 | - | B+K | 131,37 | 677 | 12,0% | BU |
| 11 | 3 | BU-9-156-a75d-a25d-03-T269 | 156,3 | 12,3 | 11,7 | 41 | - | 42 | - | B | - | 755 | 10,5% | BU |
| 11 | 4 | BU-9-156-a75d-a25d-04-T274-3-4 | 158,9 | 12,5 | 13,2 | 41 | - | 41 | - | B+K | 98,34 | 706 | 10,1% | BU |
| 11 | 5 | BU-9-156-a75d-a25d-05-T235-3-4 | 184,6 | 14,6 | 12,9 | 42 | - | 42 | - | K | 155,95 | 786 | 11,8% | BU |
| 11 | 6 | BU-9-156-a75d-a25d-06-T244 | 148,8 | 11,8 | 11,4 | 43 | - | 44 | - | B | - | 742 | 9,4% | BU |
| 12 | 1 | BU-9-156-a75d-a25d-07-T294 | 210,8 | 16,6 | 16,9 | 46 | - | 42 | - | H+A | 100 | 722 | 10,5% | BU |
| 12 | 2 | BU-9-156-a75d-a25d-08-T290-1-2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | - | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0,0% | BU |
| 12 | 3 | BU-9-156-a75d-a25d-09-T276-3-4 | 155,5 | 12,3 | 16,6 | 40 | - | 39 | - | H+A | 94 | 604 | 9,3% | BU |
| 12 | 4 | BU-9-156-a75d-a25d-10-T252-1-2 | 178,0 | 14,1 | 15,5 | 46 | - | 44 | - | H+A | 104 | 685 | 11,9% | BU |
| 12 | 5 | BU-9-156-a75d-a25d-10-T269-3-4 | 190,6 | 15,0 | 13,8 | 45 | - | 42 | - | B | 173,48 | 770 | 10,7% | BU |
| 12 | 6 | BU-9-156-a75d-a25d-12-T265-1-2 | 199,0 | 15,7 | 16,1 | 49 | 1157 | 47 | - | H+A | 102 | 719 | 10,2% | BU |
| 13 | 1 | BI-9-156-a75d-a25d-01-T1 | 94,0 | 7,4 | 8,0 | 39 | - | 40 | - | B | 91,85 | 560 | 10,9% | BI |
| 13 | 2 | BI-9-156-a75d-a25d-02-T3 | 105,6 | 8,3 | 8,1 | 37 | - | 41 | - | B | - | 599 | 11,0% | BI |
| 13 | 3 | BI-9-156-a75d-a25d-03-T6 | 88,6 | 7,0 | 6,8 | 40 | - | 39 | - | B | 81,1 | 597 | 10,7% | BI |
| 13 | 4 | BI-9-156-a75d-a25d-04-T5 | 80,4 | 6,3 | 6,2 | 39 | - | 32 | - | B | 79,42 | 596 | 12,1% | BI |
| 13 | 5 | BI-9-156-a75d-a25d-05-T4 | 107,6 | 8,5 | 7,5 | 41 | - | 42 | - | B | 92,97 | 637 | 11,3% | BI |
| 13 | 6 | BI-9-156-a75d-a25d-06-T2 | 101,7 | 8,0 | 8,8 | 43 | - | 40 | - | B | - | 556 | 10,9% | BI |

| Serie | Nr. | Prüfkörper | F_{max} | σ_{ax} | $\sigma_{ax,ref}$ | K_I | $K_{I,rel}$ | K_{II} | $K_{II,rel}$ | Versagen Auswertung | F_{1st} | ρ_{12} | u | Holzart |
|-------|-----|--------------------------------|-----------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------|----------------------|-------|---------|
| [-] | [-] | [-] | [kN] | [N/mm ²] | [kN/mm ²] | [-] | [kN] | [kg/m ³] | [%] | [-] |
| 14 | 1 | BB-9-156-a75d-a75d-01-T1-3 | 162,6 | 12,8 | 12,3 | 45 | 1214 | 45 | - | B | - | 811 | 7,2% | BB |
| 14 | 2 | BB-9-156-a75d-a75d-02-T3-3 | 181,9 | 14,4 | 13,4 | 47 | 1871 | 49 | 1952 | B | 163,49 | 824 | 7,3% | BB |
| 14 | 3 | BB-9-156-a75d-a5d-03-T2-3 | 161,6 | 12,8 | 11,8 | 41 | 641 | 43 | - | B | - | 828 | 7,2% | BB |
| 15 | 1 | BU-9-140-a5d-a75d-01-T200-216 | 112,7 | 12,5 | 14,7 | 49 | 1413 | 45 | - | H+A | 107,41 | 659 | 10,1% | BU |
| 15 | 2 | BU-9-156-a5d-a75d-02-T200-177 | 169,5 | 13,4 | 15,7 | 47 | - | 47 | - | H+A | - | 660 | 10,0% | BU |
| 15 | 3 | BU-9-156-a5d-a75d-03-T193-186 | 184,1 | 14,5 | 14,6 | 59 | 2196 | 64 | 1894 | H+A | - | 726 | 10,3% | BU |
| 16 | 1 | BU-6-140-a5d-a75d-01-T220 | 97,2 | 16,1 | 15,5 | 58 | 1079 | 59 | 965 | H+A | 88,39 | 748 | 10,2% | BU |
| 16 | 2 | BU-4-140-a5d-a10d-01-T205 | 67,5 | 16,8 | 16,7 | 39 | - | 38 | 412 | H | 61,17 | 731 | 10,5% | BU |
| 17 | 1 | BU-9-156+4d-a75d-a25d-01-T202 | 236,9 | 18,7 | 16,9 | 81 | - | 83 | - | B | 195,36 | 776 | 10,2% | BU |
| 17 | 2 | BU-9-156+4d-a75d-a25d-02-T186 | 185,6 | 14,7 | 16,0 | 81 | - | 79 | - | B | 172,69 | 690 | 10,4% | BU |
| 17 | 3 | BU-9-156+4d-a75d-a25d-03-T214 | 239,5 | 18,9 | 17,2 | 82 | 1743 | 85 | - | B | 215,13 | 773 | 10,2% | BU |
| 17 | 4 | BU-9-156+4d-a75d-a25d-04-T207 | 208,8 | 16,5 | 16,7 | 80 | - | 80 | - | H | 181,1 | 722 | 10,7% | BU |
| 17 | 5 | BU-9-156+4d-a75d-a25d-05-T206 | 224,7 | 17,7 | 18,4 | 81 | - | 83 | 1847 | B | 189,43 | 712 | 10,1% | BU |
| 17 | 6 | BU-9-156+4d-a75d-a25d-06-T181 | 228,5 | 18,0 | 17,2 | 82 | - | 85 | - | B | 192,44 | 750 | 10,6% | BU |
| 18 | 1 | BU-9-156-a75d-a25d-01-T244-1-2 | 164,5 | 13,0 | 12,7 | 55 | - | 57 | 982 | B | 123,84 | 739 | 9,3% | BU |
| 18 | 2 | BU-9-156-a75d-a25d-02-T230 | 134,6 | 10,6 | 12,4 | 44 | - | 49 | - | B | 104,25 | 663 | 11,3% | BU |
| 18 | 3 | BU-9-156-a75d-a25d-03-T237 | 147,9 | 11,7 | 11,3 | 57 | 941 | 56 | - | B | 106,27 | 743 | 10,4% | BU |
| 18 | 4 | BU-9-156-a75d-a25d-04-T231 | 156,9 | 12,4 | 12,7 | 54 | - | 56 | 964 | B | 115,22 | 718 | 10,4% | BU |
| 19 | 1 | BB-9-156-a75d-a25d-01-T2-2 | 118,2 | 9,3 | 8,8 | 61 | - | 62 | - | B | 112,93 | 817 | 7,4% | BB |
| 19 | 2 | BB-9-156-a75d-a25d-02-T1-1 | 115,5 | 9,1 | 8,4 | 61 | - | 64 | - | B | 109,43 | 830 | 7,3% | BB |
| 19 | 3 | BB-9-156-a75d-a25d-03-T4-3 | 116,5 | 9,2 | 8,6 | 65 | - | 64 | - | B | 103,23 | 822 | 7,5% | BB |
| 19 | 4 | BB-9-156-a75d-a25d-04-T3-1 | 103,9 | 8,2 | 7,7 | 56 | 477 | 57 | - | B | 102,99 | 818 | 7,4% | BB |
| 20 | 1 | BB-4-156-a10d-a10d-01-T4-1 | 94,4 | 16,8 | 15,8 | - | - | - | - | H+A | 74,45 | 818 | 7,1% | BB |
| 20 | 2 | BB-4-156-a10d-a10d-02-T4-1 | 89,8 | 16,0 | 15,0 | 29 | 55 | 37 | 110 | H+A | 88,98 | 818 | 7,1% | BB |
| 20 | 3 | BB-4-156-a10d-a10d-03-T3-02 | 96,3 | 17,1 | 16,2 | 38 | - | 39 | - | H+A | - | 815 | 7,1% | BB |
| 20 | 4 | BB-4-156-a10d-a10d-04-T3-02 | 96,2 | 17,1 | 16,2 | 26 | 43 | 36 | 95 | H+A | - | 815 | 7,1% | BB |

Tabelle 5-2 *Prüfdaten der Prüfkörper Referenzprüfungen*

| Serie | Nr. | Prüfkörper | F_{max} | σ_{ax} | $\sigma_{ax,ref}$ | Versagen Auswertung | ρ_{12} | u | Holzart |
|-------|-----|--------------|-----------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|-------|---------|
| [-] | [-] | [-] | [kN] | [N/mm ²] | [kN/mm ²] | [-] | [kg/m ³] | [%] | [-] |
| BU | 1 | 90_BU_1_T013 | 17,4 | 14,1 | 15,8 | H | 701 | 9,9% | BU |
| BU | 2 | 90_BU_1_T054 | 18,0 | 14,6 | 15,2 | H | 718 | 10,4% | BU |
| BU | 3 | 90_BU_1_T042 | 16,6 | 13,5 | 10,8 | H | 780 | 10,7% | BU |
| BU | 4 | 90_BU_1_T026 | 19,3 | 15,7 | 11,9 | H | 792 | 11,3% | BU |
| BU | 5 | 90_BU_1_T010 | 18,1 | 14,7 | 14,4 | H | 731 | 10,4% | BU |
| BU | 6 | 90_BU_1_T038 | 22,6 | 18,4 | 15,1 | H | 772 | 11,2% | BU |
| BU | 7 | 90_BU_1_T041 | 14,9 | 12,1 | 17,5 | H | 648 | 10,6% | BU |
| BU | 8 | 90_BU_1_T030 | 15,9 | 12,9 | 16,9 | H | 668 | 10,7% | BU |
| BU | 9 | 90_BU_1_T045 | 16,8 | 13,6 | 15,2 | H | 703 | 12,6% | BU |
| BU | 10 | 90_BU_1_T004 | 17,2 | 14,0 | 13,3 | H | 738 | 10,0% | BU |
| BU | 11 | 90_BU_1_T046 | 16,2 | 13,2 | 14,9 | H | 699 | 10,9% | BU |
| BU | 12 | 90_BU_1_T012 | 14,5 | 11,8 | 16,6 | H | 652 | 10,9% | BU |
| BU | 13 | 90_BU_1_T040 | 19,1 | 15,5 | 13,1 | H | 767 | 10,2% | BU |
| BU | 14 | 90_BU_1_T016 | 18,9 | 15,3 | 15,9 | H | 718 | 10,9% | BU |
| BU | 15 | 90_BU_1_T050 | 18,7 | 15,2 | 12,9 | H | 765 | 10,8% | BU |
| BU | 16 | 90_BU_1_T002 | 17,7 | 14,4 | 15,9 | H | 704 | 10,3% | BU |
| BU | 17 | 90_BU_1_T018 | 16,5 | 13,4 | 15,4 | H | 696 | 10,1% | BU |
| BU | 18 | 90_BU_1_T053 | 16,5 | 13,4 | 13,6 | H | 724 | 11,7% | BU |
| BU | 19 | 90_BU_1_T033 | 17,9 | 14,5 | 13,6 | H | 742 | 10,8% | BU |
| BU | 20 | 90_BU_1_T060 | 16,8 | 13,6 | 11,6 | H | 764 | 10,2% | BU |
| BI | 1 | 90_BI_1_T01a | 9,0 | 8,3 | 9,1 | H | 556 | 10,7% | BI |
| BI | 2 | 90_BI_1_T02b | 9,3 | 8,6 | 9,0 | H | 572 | 10,5% | BI |
| BI | 3 | 90_BI_1_T03b | 9,8 | 9,0 | 9,8 | H | 557 | 10,9% | BI |
| BI | 4 | 90_BI_1_T04b | 9,6 | 8,9 | 9,2 | H | 575 | 10,7% | BI |
| BI | 5 | 90_BI_1_T05b | 10,4 | 9,6 | 10,9 | H | 544 | 10,9% | BI |
| BI | 6 | 90_BI_1_T06b | 9,8 | 9,1 | 9,2 | H | 585 | 10,6% | BI |
| BI | 7 | 90_BI_1_T07b | 9,4 | 8,7 | 8,8 | H | 581 | 11,4% | BI |
| BI | 8 | 90_BI_1_T08b | 10,2 | 9,4 | 9,2 | H | 597 | 10,4% | BI |
| BI | 9 | 90_BI_1_T09b | 12,9 | 11,9 | 10,3 | H | 646 | 10,9% | BI |
| BI | 10 | 90_BI_1_T10a | 8,7 | 8,1 | 8,7 | H | 563 | 10,6% | BI |
| BI | 11 | 90_BI_1_T11b | 10,6 | 9,8 | 9,5 | H | 600 | 10,8% | BI |
| BI | 12 | 90_BI_1_T12b | 9,8 | 9,1 | 9,5 | H | 574 | 10,5% | BI |
| BI | 13 | 90_BI_1_T13b | 9,9 | 9,2 | 9,5 | H | 577 | 10,5% | BI |
| BI | 14 | 90_BI_1_T14b | 13,3 | 12,3 | 9,9 | H | 673 | 10,6% | BI |

| Serie | Nr. | Prüfkörper | F_{max} | σ_{ax} | $\sigma_{ax,ref}$ | Versagen Auswertung | ρ_{12} | u | Holzart |
|-------|-----|---------------|-----------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|-------|---------|
| [-] | [-] | [-] | [kN] | [N/mm ²] | [kN/mm ²] | [-] | [kg/m ³] | [%] | [-] |
| BI | 15 | 90_BI_1_T16b | 9,6 | 8,9 | 9,1 | H | 580 | 10,5% | BI |
| BI | 16 | 90_BI_1_T17b | 10,2 | 9,4 | 9,6 | H | 581 | 10,3% | BI |
| BI | 17 | 90_BI_1_T18b | 10,3 | 9,5 | 9,2 | H | 603 | 10,5% | BI |
| BI | 18 | 90_BI_1_T19b | 12,4 | 11,5 | 10,1 | H | 637 | 10,7% | BI |
| BI | 19 | 90_BI_1_T20b | 10,2 | 9,4 | 9,6 | H | 582 | 10,6% | BI |
| BI | 20 | 90_BI_1_T21b | 11,4 | 10,5 | 10,5 | H | 592 | 10,9% | BI |
| BB | 7 | 90_BB_1_T1a-1 | 21,6 | 14,8 | 14,4 | H | 802 | 8,5% | BB |
| BB | 8 | 90_BB_1_T1a-2 | 23,1 | 15,8 | 15,4 | H | 802 | 8,5% | BB |
| BB | 5 | 90_BB_1_T1b-1 | 24,3 | 16,7 | 16,2 | H | 803 | 8,5% | BB |
| BB | 6 | 90_BB_1_T1b-2 | 23,3 | 16,0 | 15,5 | H | 803 | 8,5% | BB |
| BB | 3 | 90_BB_1_T1c-1 | 24,0 | 16,5 | 15,9 | H | 806 | 8,4% | BB |
| BB | 4 | 90_BB_1_T1c-2 | 23,8 | 16,3 | 15,8 | H | 806 | 8,4% | BB |
| BB | 1 | 90_BB_1_T1d-1 | 22,9 | 15,7 | 16,0 | H | 780 | 8,3% | BB |
| BB | 2 | 90_BB_1_T1d-2 | 22,0 | 15,1 | 15,3 | H | 780 | 8,3% | BB |
| BB | 13 | 90_BB_1_T1e-1 | 20,9 | 14,3 | 15,0 | H | 765 | 8,5% | BB |
| BB | 14 | 90_BB_1_T1e-2 | 22,7 | 15,6 | 16,3 | H | 765 | 8,5% | BB |
| BB | 11 | 90_BB_1_T1f-1 | 22,2 | 15,2 | 15,6 | H | 777 | 8,5% | BB |
| BB | 12 | 90_BB_1_T1f-2 | 21,6 | 14,8 | 15,2 | H | 777 | 8,5% | BB |
| BB | 9 | 90_BB_1_T6a-1 | 18,8 | 12,9 | 12,3 | H | 812 | 8,1% | BB |
| BB | 10 | 90_BB_1_T6a-2 | 22,9 | 15,7 | 15,0 | H | 812 | 8,1% | BB |
| BB | 17 | 90_BB_1_T6c-1 | 22,3 | 15,3 | 16,0 | H | 766 | 8,0% | BB |
| BB | 18 | 90_BB_1_T6c-2 | 21,1 | 14,5 | 15,1 | H | 766 | 8,0% | BB |
| BB | 19 | 90_BB_1_T6d-1 | 21,0 | 14,4 | 14,7 | H | 778 | 8,8% | BB |
| BB | 20 | 90_BB_1_T6d-2 | 21,5 | 14,7 | 15,0 | H | 778 | 8,8% | BB |
| BB | 15 | 90_BB_1_T6f-1 | 22,3 | 15,3 | 15,2 | H | 790 | 8,2% | BB |
| BB | 16 | 90_BB_1_T6f-2 | 23,1 | 15,8 | 15,8 | H | 790 | 8,2% | BB |
| BUd | 1 | 90_BU_1_T08 | 22,7 | 18,4 | 16,1 | H | 759 | - | BU |
| BUd | 2 | 90_BU_1_T07 | 18,9 | 15,3 | 11,4 | H | 797 | - | BU |
| BUd | 3 | 90_BU_1_T04 | 18,2 | 14,8 | 14,0 | H | 738 | 10,0% | BU |
| BUd | 4 | 90_BU_1_T12 | 19,2 | 15,6 | 22,0 | H | 652 | 10,9% | BU |
| BUd | 5 | 90_BU_1_T010 | 17,1 | 13,9 | 13,6 | H | 731 | 10,4% | BU |
| BUd | 6 | 90_BU_1_T011 | 19,9 | 16,2 | 13,3 | H | 772 | - | BU |
| BUd | 7 | 90_BU_1_T03 | 18,5 | 15,0 | 18,1 | H | 686 | - | BU |
| BUd | 8 | 90_BU_1_T09 | 19,5 | 15,8 | 11,2 | H | 810 | - | BU |

| Serie | Nr. | Prüfkörper | F_{max} | σ_{ax} | $\sigma_{ax,ref}$ | Versagen Auswertung | ρ_{12} | u | Holzart |
|--------------|-----|----------------------|-----------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|-------|---------|
| [-] | [-] | [-] | [kN] | [N/mm ²] | [kN/mm ²] | [-] | [kg/m ³] | [%] | [-] |
| BUd | 9 | 90_BU_1_T05 | 23,6 | 19,2 | 21,6 | H | 700 | - | BU |
| R5d | 1 | 90_BU_3_47_T070 | 42,4 | 11,5 | 11,2 | R | 733 | 11,5% | BU |
| R5d | 2 | 90_BU_3_47_T075 | 39,7 | 10,7 | 14,2 | R | 666 | 9,9% | BU |
| R5d | 3 | 90_BU_3_47_T095 | 43,0 | 11,6 | 12,0 | R | 720 | 9,9% | BU |
| R5d | 4 | 90_BU_3_47_T090 | 47,8 | 12,9 | 11,3 | R+A | 757 | 10,6% | BU |
| R5d | 5 | 90_BU_3_47_T072 | 50,3 | 13,6 | 9,5 | R+A | 812 | 10,9% | BU |
| R7d | 1 | 90_BU_2_47_a7d_T077 | 28,8 | 11,7 | 14,1 | H+A | 685 | 10,8% | BU |
| R7d | 2 | 90_BU_2_47_a7d_T069 | 33,5 | 13,6 | 12,3 | H+A | 749 | 11,3% | BU |
| R7d | 3 | 90_BU_2_47_a7d_T066 | 37,3 | 15,1 | 10,7 | H+A | 809 | 11,8% | BU |
| R8d | 1 | 90_BU_2_47_a8d_T098 | 34,0 | 13,8 | 13,5 | H+A | 732 | 10,1% | BU |
| R8d | 2 | 90_BU_2_47_a8d_T061 | 30,5 | 12,4 | 13,7 | H+A | 704 | 10,2% | BU |
| R8d | 3 | 90_BU_2_47_a8d_T074 | 36,2 | 14,7 | 11,8 | H+A | 778 | 10,7% | BU |
| R10d | 1 | 90_BU_2_47_a10d_T088 | 33,8 | 13,7 | 14,9 | H+A | 708 | 9,9% | BU |
| R10d | 2 | 90_BU_2_47_a10d_T083 | 37,0 | 15,0 | 12,0 | H+A | 779 | 11,0% | BU |
| R10d | 3 | 90_BU_2_47_a10d_T093 | 31,0 | 12,6 | 12,5 | H+A | 729 | 10,7% | BU |
| R10d | 4 | 90_BU_2_47_a10d_T073 | 29,8 | 12,1 | 13,5 | H+A | 702 | 11,1% | BU |
| R10d | 5 | 90_BU_2_47_a10d_T064 | 30,4 | 12,3 | 13,3 | H+A | 711 | 12,2% | BU |
| R10d | 6 | 90_BU_2_47_a10d_T087 | 31,3 | 12,7 | 14,5 | H+A | 698 | 10,8% | BU |
| R10d | 7 | 90_BU_2_47_a10d_T083 | 31,9 | 13,0 | 11,6 | H+A | 752 | 11,5% | BU |
| R10d | 8 | 90_BU_2_47_a10d_T098 | 34,0 | 13,8 | 12,2 | H+A | 754 | 10,7% | BU |
| R10d | 9 | 90_BU_2_47_a10d_T081 | 33,0 | 13,4 | 13,0 | H+A | 734 | 10,1% | BU |
| R10d | 10 | 90_BU_2_47_a10d_T065 | 39,5 | 16,0 | 9,4 | H+A | 858 | 11,2% | BU |
| R10db | 1 | 90_BU_2_47_a10d_T093 | 28,1 | 11,4 | 11,3 | H+A | 729 | 10,7% | BU |
| R10db | 2 | 90_BU_2_47_a10d_T088 | 33,3 | 13,5 | 14,7 | H+A | 708 | 9,9% | BU |
| R10db | 3 | 90_BU_2_47_a10d_T065 | 36,3 | 14,7 | 8,7 | H+A | 858 | 11,2% | BU |
| R10db | 4 | 90_BU_2_47_a10d_T081 | 30,4 | 12,3 | 11,9 | H+A | 734 | 10,1% | BU |
| R10db | 5 | 90_BU_2_47_a10d_T083 | 29,7 | 12,1 | 9,6 | H+A | 779 | 11,0% | BU |
| R10db | 6 | 90_BU_2_47_a10d_T098 | 32,6 | 13,2 | 11,7 | H+A | 754 | 10,7% | BU |
| S | 1 | - | 36,7 | - | - | S | - | - | S |
| S | 2 | - | 36,6 | - | - | S | - | - | S |
| S | 3 | - | 36,6 | - | - | S | - | - | S |
| S | 4 | - | 36,4 | - | - | S | - | - | S |
| S | 5 | - | 36,7 | - | - | S | - | - | S |
| S | 6 | - | 36,2 | - | - | S | - | - | S |

ANHANG D PROTOKOLLE

Tabelle 5-3 Prüfprotokoll Referenzprüfung Einzelschraube

| | | | | | |
|---|--------------------|---|-----------------|--|---|
|  | | | | |  |
| Referenzprüfungen Einzelschraube – 90° zur Faser | | | | | |
| Projektnummer: | | ForestValue Projekt hardwood joint | | Datum: | 24.02.2020 |
| Prüfkörper: | | Buche, Birke, BauBuche, Stahlzugfest. | | Bearb.: | UM, Luef |
| Notizen / Skizzen / Normen / Messgeräte | | Lagerung bei Normklima 20°C / 65 % seit 26.08.2019 - | | | |
| | | Prüfkörper für Referenzprüfungen mit Einzelschraube 90° - Anschluss Normal zur Faser Einfeld Lagerung | | | |
| | | push-pull Prüfkonfiguration, Ausziehprüfung nach ON EN 1382:1999 (90sec+/-30sec), weggesteuert Abreibwiderstand des Kopfes oder Zugtragfähigkeit des Schaftes nach ON EN 1383 (10sec+/-5sec) | | | |
| | | TG 8x240/100 mm, je Prüfung eine neue Schraube, Schrauben langsam eingedreht 60-80 U/min, Öffnung Stahlplatte d = 6d | | | |
| lfd.Nr. | Probekörper | F_{max} | Versagen | Anmerkung | |
| [-] | [-] | [kN] | [-] | | |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | 8x400/100, 8x395/100, 8x240/100 nach Schraubenschachtel zu schließen kommen alle von selber Charge. | |
| 11 | 90_BU_1_T013 | 17,40 | H | Buche F _{est,90} = 20,6 kN; v = 0,9 mm/min; Vorkraft 50 N; nicht vorgebohrt & durchgeschraubt l= 49 mm; F _{max} nach ~ 170sec, PK 49x160x160mm | |
| 12 | 90_BU_1_T054 | 18,00 | H | v = 1,8 mm/min, F _{max} bei ~ 90sec | |
| 13 | 90_BU_1_T042 | 16,60 | H | | |
| 14 | 90_BU_1_T026 | 19,30 | H | | |
| 15 | 90_BU_1_T010 | 18,10 | H | | |
| 16 | 90_BU_1_T038 | 22,60 | H | | |
| 17 | 90_BU_1_T041 | 14,90 | H | | |
| 18 | 90_BU_1_T020 | | H | Schraube in Mini-Ast, F _{max} = 24,60 kN; Aussortiert | |
| 19 | 90_BU_1_T030 | 15,90 | H | | |
| 20 | 90_BU_1_T045 | 16,80 | H | | |
| 21 | 90_BU_1_T004 | 17,20 | H | | |
| 22 | 90_BU_1_T046 | 16,20 | H | | |
| 23 | 90_BU_1_T012 | 14,50 | H | | |
| 24 | 90_BU_1_T040 | 19,10 | H | | |
| 25 | 90_BU_1_T016 | 18,90 | H | | |
| 26 | 90_BU_1_T050 | 18,70 | H | | |
| 27 | 90_BU_1_T002 | 17,70 | H | | |
| 28 | 90_BU_1_T018 | 16,50 | H | | |
| 29 | 90_BU_1_T053 | 16,50 | H | | |
| 30 | 90_BU_1_T033 | 17,90 | H | | |
| | 90_BU_1_T060 | 16,80 | H | | |
| 31 | 90_BI_1_T01a | 9,00 | H | Birke F _{est,90} = 13,4 kN; v = 2,0 mm/min; Vorkraft 50 N; nicht vorgebohrt & durchgeschraubt l = 43 | |

| | | | | |
|----|---------------|-------|---|---|
| | | | | mm; T01-a, Schraube 3x eingedreht, F_{max} bei 65sec |
| 32 | 90_BI_1_T02b | 9,25 | H | T01b, F_{max} bei 60 sec, PK 80x43x156mm |
| 33 | 90_BI_1_T03b | 9,75 | H | $v = 1,3$ mm/min; F_{max} bei 100s |
| 34 | 90_BI_1_T04b | 9,62 | H | Schraube liegt ausmittig in Öffnung der Stahlplatte |
| 35 | 90_BI_1_T05b | 10,40 | H | |
| 36 | 90_BI_1_T06b | 9,84 | H | |
| 37 | 90_BI_1_T07b | 9,36 | H | |
| 38 | 90_BI_1_T08b | 10,20 | H | |
| 39 | 90_BI_1_T09b | 12,90 | H | |
| 40 | 90_BI_1_T10a | 8,71 | H | |
| 41 | 90_BI_1_T11b | 10,60 | H | |
| 42 | 90_BI_1_T12b | 9,84 | H | Schraube leicht schräg eingedreht |
| 43 | 90_BI_1_T13b | 9,93 | H | |
| 44 | 90_BI_1_T14b | 13,30 | H | |
| 46 | 90_BI_1_T16b | 9,60 | H | |
| 47 | 90_BI_1_T17b | 10,20 | H | Einschraubzeit ~16sec --> 60 U/min |
| 48 | 90_BI_1_T18b | 10,30 | H | |
| 49 | 90_BI_1_T19b | 12,40 | H | Einschraubzeit ~12sec --> 80 U/min |
| 50 | 90_BI_1_T20b | 10,20 | H | Ast neben Schraube |
| 52 | 90_BI_1_T21b | 11,40 | H | |
| 53 | 90_BB_1_T1d-1 | 22,90 | H | BauBuche $F_{est,90} = 20,6$ kN; $v = 1,8$ mm/min; Vorkraft 50 N; nicht vorgebohrt & durchgeschraubt $l = 58$ mm; Teilweise zwei Schrauben in einen PK, F_{max} bei ~125sec |
| 54 | 90_BB_1_T1d-2 | 22,00 | | PK 58x160x200 mm, Schrauben nebeneinander mit Abstand $a_2 = 60$ mm, bei zweiter Schraube im PK langer Schlupf beim Prüfverlauf, wegen Faserhügel am Einschraubloch der ersten Schraube. |
| 55 | 90_BB_1_T1c-1 | 24,00 | H | Schrauben nebeneinander mit Abstand $a_2 = 40$ mm, Einschrauben: beim Austreten der Schr.spitze Oberflächenriss jeweils ca. 35mm von der Schr.achse weg. |
| 56 | 90_BB_1_T1c-2 | 23,80 | H | |
| 57 | 90_BB_1_T1b-1 | 24,30 | H | |
| 58 | 90_BB_1_T1b-2 | 23,30 | H | |
| 59 | 90_BB_1_T1a-1 | 21,60 | H | |
| 60 | 90_BB_1_T1a-2 | 23,10 | H | |
| 61 | 90_BB_1_T6a-1 | 18,80 | H | |
| 62 | 90_BB_1_T6a-2 | 22,90 | H | |
| 63 | 90_BB_1_T1f-1 | 22,20 | H | |
| 64 | 90_BB_1_T1f-2 | 21,60 | H | |
| 65 | 90_BB_1_T1e-1 | 20,90 | H | |
| 66 | 90_BB_1_T1e-2 | 22,70 | H | |
| 67 | 90_BB_1_T6f-1 | 22,30 | H | |
| 68 | 90_BB_1_T6f-2 | 23,10 | H | |
| | 90_BB_1_T6c-1 | 22,30 | H | |
| | 90_BB_1_T6c-2 | 21,10 | H | |
| | 90_BB_1_T6d-1 | 21,00 | H | Ast |
| | 90_BB_1_T6d-2 | 21,50 | H | |
| 68 | 90_BU_1_T08 | 22,70 | H | Buche $F_{est,90} = 17,5$ kN; $v = 1,8$ mm/min; Vorkraft 50 N; nicht vorgebohrt & Schraubenspitzen im PK $l_p = 57$ mm; PK Höhe 73 mm, T08-2, Vorspannen mit Vorkraft 50N gelockert, F_{max} kann verwendet werden, WA unten und oben mitgemessen, 05.03.2020 |

| | | | | |
|----|--------------|-------|---|---|
| 68 | 90_BU_1_T07 | 18,90 | H | ohne Vorkraft, |
| 68 | 90_BU_1_T04 | 18,20 | H | T04-4 |
| 68 | 90_BU_1_T12 | 19,20 | H | Catman-File mit T17 gespeichert |
| 68 | 90_BU_1_T010 | 17,10 | H | |
| 68 | 90_BU_1_T011 | 19,90 | H | |
| 68 | 90_BU_1_T03 | 18,50 | H | Zwickfile mit 06_T11-2 |
| 68 | 90_BU_1_T09 | 19,50 | H | ohne WA, Catman nicht gestartet, Zwick mit 08_T03 gespeichert |
| 68 | 90_BU_1_T05 | 23,60 | H | ohne WA, Catman nicht gestartet |

Tabelle 5-4 **Prüfprotokoll Reihenprüfung**

| | | | | |
|--|---------------------|---|-----------------|---|
|  Graz University of Technology | | | |  study research engineering test center |
| Gruppe 3x1- 90° zur Faser | | | | |
| Projektnummer: | | ForestValue Projekt hardwood_joint | | Datum: 26.11.2019 |
| Prüfkörper: | | Buche | | Bearb.: UM, Luef |
| Notizen / Skizzen / Normen / Messgeräte | | Lagerung bei Normklima 20°C / 65 % seit 26.08.2019 - | | |
| | | Prüfkörper für Referenzprüfungen mit Gruppe 3x1 90° - Anschluss Normal zur Faser Einfeld Lagerung | | |
| | | push-pull Prüfkonfiguration, Ausziehprüfung nach ON EN 1382:1999 (90sec+/-30sec), Weggesteuert | | |
| | | Abreißwiderstand des Kopfes oder Zugtragfähigkeit des Schaftes nach ON EN 1383 (10sec+/-5sec) | | |
| TG 8x240/100 mm, je Prüfung eine neue Schraube, Geschwindigkeit gewählt mit Ziel bei F_{max} $t > 90$ sec, Alle Buchenlamellen sind Seitenware, astfrei (Tischlerware) | | | | |
| lfd.Nr. | Probekörper | F_{max} | Versagen | Anmerkung |
| [-] | [-] | [kN] | [-] | |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | 8x400/100, 8x395/100, 8x240/100 nach Schraubenschachtel zu schließen kommen alle von selber Charge. |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| 6 | | | | |
| 7 | | | R | ...Rollschubversagen |
| 8 | | | A | ...Aufreißen - 1 Riss ausgehend von der Schraubenachse bis zur nächsten Schraube oder nicht ganz bis zur nächsten |
| 9 | | | | |
| 10 | | | | |
| 11 | 90_BU_3_47_T070 | 42,40 | R | Buche $F_{est,90} = 20,22$ kN; $v = 3,0$ mm/min; Vorkraft 70 N; nicht vorgebohrt & durchgeschraubt $l = 48$ mm; $a_1 = 5d$, Risse alle über ganze PK-Höhe, Anziehmoment 30Nm (Abstandshölzer leicht eingedrückt - Querdruck), Öffnung des Auflagers 160mm Abstand, |
| 12 | 90_BU_3_47_T075 | 39,70 | R | $v = 2,5$ mm/min |
| 13 | 90_BU_3_47_T095 | 43,00 | R | Anziehmoment 20Nm |
| 14 | 90_BU_3_47_T090 | 47,80 | A | Prüfkörper zwischen den Schrauben aufgerissen, über ganze PK-Höhe, ab jetzt Anziehmoment 10 Nm |
| 15 | 90_BU_3_47_T072 | 50,30 | R+H | Möglicherweise zuerst herausziehen, nach F_{max} Rollschub - |
| 16 | 90_BU_2_47_a7d_T077 | 28,80 | H+A | Gruppe 2x1, $v = 2,0$ mm/min, $a_1 = 7d$, Risse an Unterseite nicht sichtbar |
| 17 | 90_BU_2_47_a7d_T069 | 33,50 | H+A | Risse auf der Unterseite 2,5 cm zwischen Schrauben, jeweils 2 Schrauben (insg. 4) 40mm neben der geprüften Gruppe eingedreht, um zu kontrollieren ob auch Risse beim Einschrauben entstehen - aber keine Risse festgestellt (siehe Foto). |
| 18 | 90_BU_2_47_a7d_T066 | 37,30 | H+A | |

| | | | | |
|----|----------------------|-------|-----|---|
| 19 | 90_BU_2_47_a8d_T098 | 34,00 | H+A | leises Knaxen ab 16 kN hörbar, aber kein großer Knax. Aufspalten mit Ausziehversagen, Risse verlaufen entlang der Faserrichtung an zweiter Schraube vorbei (siehe Foto). Risse an Unterseite nicht sichtbar, $a_1 = 8d$ |
| 20 | 90_BU_2_47_a8d_T061 | 30,50 | H+A | bei ca. 22kN Knax mit sichtbaren Aufspalten an Oberfläche |
| 21 | 90_BU_2_47_a8d_T074 | 36,20 | H+A | Knax bei ca. 20kN mit sichtbarem Aufspalten an Oberfläche |
| 22 | 90_BU_2_47_a10d_T088 | 33,80 | H+A | Knaxt bei ca. 20kN mit sichtbarem Aufspalten an Oberfläche |
| 23 | 90_BU_2_47_a10d_T083 | 37,00 | H+A | leises Knaxen ab 25 kN, sichtbare Risse an Oberfläche, $a_1 = 10d$ |
| 24 | 90_BU_2_47_a10d_T093 | 31,00 | H+A | erster Knax bei ca. 22 kN, sichtbare Risse an Oberfläche |
| 25 | 90_BU_2_47_a10d_T073 | 29,80 | H+A | erster Knax bei ca. 24 kN, sichtbare Risse an Oberfläche |
| 26 | 90_BU_2_47_a10d_T064 | 30,40 | H+A | erster Knax bei ca. 20 kN, sichtbare Risse an Oberfläche; Riss auf einer Seite bis zum Ende des Prüfkörpers (siehe Foto)-nur auf Oberseite |
| 27 | 90_BU_2_47_a10d_T087 | 31,30 | H+A | leises Knaxen ab ca. 15 KN lauter Knax bei ca. 25 kN, sichtbare Risse an Oberfläche; |
| 28 | 90_BU_2_47_a10d_T083 | 31,90 | H+A | $v = 1$ mm/min, Knax bei ca. 27 kN, sichtbare Risse an Oberfläche |
| 29 | 90_BU_2_47_a10d_T098 | 34,00 | H+A | erster Einriss bei ca. 25 kN, sichtbare Risse an Oberfläche, kein Knax |
| 30 | 90_BU_2_47_a10d_T081 | 33,00 | H+A | erster Knax bei ca. 24 kN, sichtbare Risse an Oberfläche |
| 31 | 90_BU_2_47_a10d_T065 | 39,50 | H+A | leises Knaxen ab ca. 23 KN lauter Knax bei ca.33 kN, sichtbare Risse an Oberfläche; |
| 32 | 90_BU_2_47_a10d_T093 | 28,10 | H+A | $v = 1$ mm/min, Prüfkörperbreite $b=48$ mm, 27.2.2020 |
| 33 | 90_BU_2_47_a10d_T088 | 33,30 | H+A | kleine Schwindrisse vorhanden, da Endstück der Lamelle, Risse an Oberfläche ab ~ 12 kN, Risse bei F_{max} vorhanden, Bei großer Verformung nach F_{max} zusätzliches Aufspalten |
| 34 | 90_BU_2_47_a10d_T083 | | | 1 großer Schwindriss - beim Eindrehen aufgerissen - nicht geprüft |
| 35 | 90_BU_2_47_a10d_T065 | 36,30 | H+A | Bei F_{max} aufgerissen, dann aber doch wieder herausziehen |
| 36 | 90_BU_2_47_a10d_T081 | 30,40 | H+A | leichte Risse an Unterseite vom Eindrehen |
| 37 | 90_BU_2_47_a10d_T083 | 29,70 | H+A | Risse auf der Unterseite vom Eindrehen, Pk aus Lamellenstück T083 mit $v = 1,0$ mm/min |
| 38 | 90_BU_2_47_a10d_T098 | 32,60 | H+A | nach Prüf 20mm Risse an Unterseite |

Tabelle 5-5 **Prüfprotokoll Gruppenprüfung**

| | | | | | |
|--|-------------------------|---|-----------------|--|--------------|
|  Graz University of Technology | | | |  study research engineering test center | |
| Referenzprüfungen Gruppe 3x3 - Duo/Trio Träger - 90° zur Faser | | | | | |
| Projektnummer: | | ForestValue Projekt hardwood_joint | | Datum: 28.02.2020 | |
| Prüfkörper: | | Buche | | Bearb.: UM, Luef | |
| Notizen / Skizzen / Normen / Messgeräte | | Lagerung bei Normklima 20°C / 65 % seit 26.08.2019 - | | | |
| | | Prüfkörper für Referenzprüfungen mit Gruppe 3x3 90° - Anschluss Normal zur Faser Einfeld Lagerung | | | |
| | | push-pull Prüfkfiguration, Ausziehprüfung nach ON EN 1382:1999 (90sec+/-30sec), weggesteuert Abreißwiderstand des Kopfes oder Zugtragfähigkeit des Schaftes nach ON EN 1383 (10sec+/-5sec) | | | |
| | | je Prüfung eine neue Schraube, bei Bedarf zwei Runden angezogen mit 26 Nm | | | |
| lfd. Nr. | Probekörper | F_{max} | Versagen | Anmerkung | Serie |
| [-] | [-] | [kN] | [-] | | |
| | | | H | Herausziehen | |
| | | | A | Aufreißen | |
| | | | B | Blockscheren | |
| | | | S | Stahlbruch | |
| | | | WA | Wegaufnehmer nach Himmelsrichtungen | |
| 1 | 90_BU_9_148_a10d_a5d_01 | 168 | H+A | Buche, Anziehmoment 26 Nm, $F_{est,90} = 144$ kN; $v = 0,4$ mm/min; nicht vorgebohrt; $l_{ef+8mm} = 6d(48mm)+8mm$; $a1=10d$, $a2=5d$, $a2c=4d$; 2-lagiger Prüfkörper (h=92mm), T280-3/4, erste Prüf ohne WA, keine Risse bei $F_{1st} \sim 70kN$ außen erkennbar, bei ~ 150 kN reißt Schraubenreihe Nord leicht ein und bis F_{max} ganz auf, Klebefuge erst nach F_{max} aufgebrochen, Auflagerabstand 24cm; Schrauben 240mm | 1 |
| 2 | 90_BU_9_148_a10d_a5d_02 | 157 | H+A | T274-1/2, $v = 1,0$ mm/min, WA angebracht, WA-N und WA-SO nach Vorspannen neu eingestellt, bei jeder Schraube Risse sichtbar, bei 150 kN südliche Reihe aufgerissen, nördliche Reihe bei F_{max} gespalten | 1 |
| 3 | 90_BU_9_148_a10d_a5d_03 | 146 | H | WA-SO kleine Risse bei F_{max} , Nur Herausziehen, T248-3-4 | 1 |
| 4 | 90_BU_9_148_a10d_a5d_04 | 174 | H | Feine Risse Süden nahe F_{max} , nur Herausziehen, T267-3-4 | 1 |
| 5 | 90_BU_9_148_a10d_a5d_05 | 132 | H | T276-1-2, überall leichte Einrisse bei F_{max} , WA Querdruckpressung bis 80kN $\sim 0,05$ mm | 1 |
| 6 | 90_BU_9_148_a10d_a5d_06 | 197 | H+A | T222-1-2, leichte Riss bei F_{max} , kurz nach F_{max} Auspalten + Aufreißen der Klebefuge | 1 |
| 7 | | | | Aufpassen!! Alle Schrauben mit $a_1 = 80$ mm eingeschraubt, aber Matrix hat Abstand | |

| | | | | | |
|----|----------------------------|-----|-----|--|---|
| | | | | 84 mm. D.h. bei ganzer Reihe Schrauben leicht schräg eingedreht. | |
| 8 | 90_BU_9_148_a5d_a5d_01 | 167 | B | Bei 80 KN erster feiner Riss zwischen 2 Schrauben in N; Bei 115 KN Schrauben im N durchgehend aufgerissen; Bei 145 KN überall leichte Risse; Klebefuge aufgegangen; ev. Blockscheren, Fasern wurden zwischen den Schrauben leicht mitherausgezogen; T229-3-4, Auflagerabstand 24 cm, 02.03.2020, Klebefuge versagt; Schrauben 240 mm | 2 |
| 9 | 90_BU_9_148_a5d_a5d_02 | 155 | B | feine Rissbildung bei 60 KN im Nordwesten; bei 120 KN feine Risse in N und S; Bei F_{max} Risse zwischen allen Schrauben; Risse über und unter der Klebefuge; ev. Blockscheren T230-1-2 | 2 |
| 10 | 90_BU_9_148_a5d_a5d_03 | 139 | B | bei 60KN feine Risse in S; Bei 120 KN Risse N und S; bei F_{max} Klebefuge gerissen; T232-1-2, Klebefuge teilweise versagt | 2 |
| 11 | 90_BU_9_148_a5d_a5d_04 | 157 | B | T237-1/2, bereits nach Anziehen leicht angerissen, mehrfach angezogen, PK verdrehte sich beim Anziehen an einer Seite um 2cm auf einer Seite, WA unten S vergessen montieren, Risse entlang der Schr.reihen+Schraubenspitzen | 2 |
| 12 | 90_BU_9_148_a5d_a5d_05 | 159 | B | T280-1/2, bereits nach Anziehen leicht angerissen, Versagen equal, Klebefuge versagt | 2 |
| 13 | 90_BU_9_148_a5d_a5d_06 | 155 | B | 228-1-2; Aufreißen bereits bei Belastung beobachtet | 2 |
| 14 | 90_BU_9_148_a5d_a5d_o18_01 | 145 | B | T228-3-4; Öffnung auf 18 cm in Längsrichtung vermindert; spröder Bruch auf Querzug, Klebefuge versagt; Schrauben 240 mm | 3 |
| 15 | 90_BU_9_148_a5d_a5d_o18_02 | 147 | H | T243-1-2; Position für Wegaufnehmer Querdruck (Rel) verändert auf engere Öffnung Risse zwischen Schrauben Nord bis Entlastung; ab 120 KN Risse zwischen Schrauben; kein Versagen auf Querzug; kein Spröder Bruch | 3 |
| 16 | 90_BU_9_148_a5d_a5d_o18_03 | 175 | H | T235-1-2; Risse ab 100 KN in N; bei F_{max} nur Risse zwischen den Schrauben; kein Spröder Bruch; | 3 |
| 17 | 90_BU_9_148_a5d_a5d_o18_04 | 157 | B | Schraubengruppe N Risse schon bei 120 kN offen, T231,-1-2, 03.03.2020, Reihe Süd auch bei F_{max} gerissen, Höhe Schraubenspitzen aufgerissen | 3 |
| 18 | 90_BU_9_148_a5d_a5d_o18_05 | 150 | B | feine Risse schon bei 100kN sichtbar, T267-1-2 | 3 |
| 19 | 90_BU_9_148_a5d_a5d_o18_06 | 164 | B | T229-1-2 | 3 |
| 20 | 90_BU_6_196_a7d_a25d_01 | 182 | H+A | Buche $v = 1,0$ mm/min; nicht vorgebohrt; $l_{ef} = 12d(96mm)$; $a_1=7d$, $a_2=2,5d$; 3-Lagiger Prüfkörper; BU Risse schon bei 120 kN sichtbar, T245-1-2-3, Öffnungslänge 180 mm; Schrauben 400 Zwickfile gespeichert unter 90_BU_96_148_a7d_a25d_T245 | 4 |

| | | | | | |
|----|----------------------------------|-----|-----|---|---|
| 21 | 90_BU_6_196_a7d_a25d_02 | 198 | B | T273-3-4 und T299-1, $v = 1,6$ mm/min, Risse bei 170 kN schon gesehen, seitlich außen keine Risse gesehen | 4 |
| 22 | 90_BU_6_196_a7d_a25d_03 | 188 | H | T255-2-3-4 bei Erstbelastung Risse in N; | 4 |
| 23 | 90_BU_6_196_a7d_a25d_04 | 200 | A+H | T299-2-3-4; bei ca 150 KN Risse in Mitte; | 4 |
| 24 | 90_BU_6_196_a7d_a25d_05 | 162 | A+H | T250-4 T221-2-4; bei Erstbelastung Rissen in N; | 4 |
| 25 | 90_BU_6_196_a7d_a25d_06 | 188 | B | T256 1-2-3 bei Erstbelastung leichte Risse in N; | 4 |
| 26 | 90_BU_6_1120_a7d_a25d_01 | 216 | H | Einschraubtiefe vergrößert auf $(f_{tens})/(5\%Quantil,sgl)*49mm$ $15,2d$ --> PK-Höhe 138mm, deshalb $l_{ef} = 15d$ (120mm), $l_p = 128mm$, WA unten Süd hat bei ersten Belastungsast nicht gemessen, T295-3-4 T242-1, Reihe Nord schon bei 170 kN gespalten, 04.03.2020, $v = 1,6$ mm/min, roh~680kg/m ³ ; Schrauben 400mm | 5 |
| 27 | 90_BU_6_1120_a7d_a25d_02 | 228 | S | Nord und Süd-Reihe Risse bei 150 kn sichtbar, T255-1 T254-3-4, 5 Schrauben gerissen, roh~693kg/m ³ | 5 |
| 28 | 90_BU_6_1120_a7d_a25d_03 | 229 | S | T286-1, roh ~740kg/m ³ , feiner Riss Mitte durch Erstbelastung | 5 |
| 29 | 90_BU_9_156_a7d_a5d_01 | 185 | H+A | Duo; 265-3-4; Länge Öffnung 210mm, $a_1 = 7d$, $a_2 = 5d$, $l_{ef} = 56$ mm, $l_p = 64$ mm (l_{ef} erhöht wegen Querschnitt in Fuge) T265-3-4, $v = 1,0$ mm/min; Bei 120KN Riss N; bei F_{max} Risse S; Schrauben 240 mm | 6 |
| 30 | 90_BU_9_156_a7d_a5d_02 | 156 | H+A | T248-1-2; Risse Norden sichtbar 120 kN, bei F_{max} überall Risse | 6 |
| 31 | 90_BU_9_156_a7d_a5d_03 | 202 | H+A | T222-3-4; wegen Fehlstelle ausmittig eingebaut; bei 137 KN Risse in S; bei 160 KN Risse in S; Nach F_{max} versagen der Klebefuge; | 6 |
| 32 | 90_BU_9_156_a7d_a5d_04 | 236 | A+H | T290-3-4 Schrauben lassen sich nicht ganz eindrehen mit dem Drehmoment von 26 Nm; bei 185 KN leichte Rissbildung in N; | 6 |
| 33 | 90_BU_9_156_a7d_a5d_05 | 189 | A+H | T243-3-4; nach Erstbelastung leichte Risse in N; bei F_{max} Risse in N und S | 6 |
| 34 | 90_BU_9_156_a7d_a5d_06 | 184 | A+H | T232-3-4; nach 115 KN Risse in N; | 6 |
| 35 | 90_BU_9_156_a5d_a56d_01_T264 | 192 | H+A | T264-1-2-3, 150kN Riss im N und S, Riss + Knax nach F_{max} bei Abfall von ca. 10% von F_{max} , Trio-Träger | 7 |
| 36 | 90_BU_9_156_a5d_a56d_02_T223-295 | 173 | B | T223-4 T295-1-2, Knax und Risse im N ba ~ 105 kN, F_{max} Klebefuge, Biegezugriss an Oberfläche zwischen Schrauben | 7 |
| 37 | 90_BU_9_156_a5d_a56d_03_T286 | 188 | B | T286-2-3-4; Risse in N nach Erstbelastung; QZ-Riss bei F_{max} | 7 |
| 38 | 90_BU_9_156_a5d_a56d_04_T242 | 154 | H | T242-2-3-4 Risse überall schon bei 120 kN, Sekunden zum Einschrauben mitgezählt 8-10sec mit 16 Gewindegängen: 96 bis 120 U/min | 7 |
| 39 | 90_BU_9_156_a5d_a56d_05_T250 | 152 | B | T250-1-2-3, leichte Risse N nach Erstbelastung, Knax bei F_{max} , Risse an beiden Klebefugen N und an erster Klebefuge S sichtbar, obere Klebefuge N an Hirnholzecken dürfte bereits leicht | 7 |

| | | | | | |
|----|-----------------------------------|--------|---------------|--|----|
| | | | | eingerrissen gewesen sein. Links auf rechts Verklebung | |
| 40 | 90_BU_9_156_a5d_a56d_06_T223 | 163 | H+ev t. B? | Klebefugen $\sim 3 \times 1 \text{ cm}^2$ an Ecken offen, T223-1-2-3, $\sim 100 \text{ kN}$; überall feine Risse | 7 |
| 41 | 90_BU_6_156_a5d_a3,5d_01_T225 | 228 | S | Länge Öffnung 180 mm; 1 Wegaufnehmer erst nach vorspannen angeschlossen; drehen der Lochplatte gegen Uhrzeigersinn; Prüfung Trio Schraubenbruch 3x2; 5d 3,5d $l_{ef}=15d$; Glasplättchen sind bei Schraubenbruch abgefallen | 8 |
| 42 | 90_BU_6_156_a5d_a3,5d_02_T292-246 | 223 | S+H | Nur 2 von 6 Schrauben abgebrochen; Herausziehen der Restlichen Schrauben; Sehr spätes Versagen auf Schraubenbruch nach F_{max} | 8 |
| 43 | 90_BI_9_156_a7d_a5d_01_T7-2 | 132 | H+A | BIRKE, $v = 1 \text{ mm/min}$, $F_{est} = 15.3 \cdot 9 = 137 \text{ kN}$ Träger quer unter Lagerungsplatte da PK-Breite 210 mm, Öffnungslänge 210 mm, $l_{ef} + 8 = 56 + 8 = l_p = 64 \text{ mm}$, 3lagiger PK, Schr.spitze in Mitte der mittleren Lage, $a_1 = 7d$, $a_2 = 5d$, $a_{2,c} = 60 \text{ mm}$, Birkenlamellen bestehen vorwiegend aus Kernbrettern - WA siehe Skizze, Anziehen mit 20 Nm, 2 Runden Drehmoment anziehen, 06.03.2020 Knax bei 110 kN, Schr.reihe Westen und Mitte angerissen | 9 |
| 44 | 90_BI_9_156_a7d_a5d_02_T3-2 | 131,00 | H+A | leichte Entlastungsrisse an Oberfläche beim Eindrehen, T3-1-2 T2-1, bei 80kN Risse Oberfläche Ost und Mitte, Knax bei 120 kN evt. Schr.reihe West leicht aufgespalten | 9 |
| 45 | 90_BI_9_156_a7d_a5d_03_T1-6 | 123 | H+A | Riss entlang Reihe West durch anziehen, T1-2-2 und T6-2; Knax bei 90kN Riss in Reihe O; | 9 |
| 46 | 90_BI_9_156_a7d_a5d_04_T5-8 | 147 | H+A | T5-2, T8-1-2, Reihe Westen aufgespalten beim Anziehen, Weg unten N misst nicht mit | 9 |
| 47 | 90_BI_9_156_a7d_a5d_05_T4-6 | 121 | H+A | Überall Entlastungsrisse beim Anziehen, WA unten beide Daten kontrollieren | 9 |
| 48 | 90_BI_9_156_a7d_a5d_06_T8 | 167 | B | T8-4-5-3, Blockscheren, keine Risse an Seite sichtbar, sehr hohe Rohdichte | 9 |
| 49 | 90_BB_9_156_a7d_a5d_01_T1-02 | 170 | B | BauBuche, $v = 1 \text{ mm/min}$, $F_{est} = 22,3 \cdot 64 / 58 \cdot 9 = 225 \text{ kN}$ Träger quer unter Lagerungsplatte da PK-Breite 210 mm, Öffnungslänge 210 mm, $l_{ef} + 8 = 56 + 8 = l_p = 64 \text{ mm}$, $a_1 = 7d$, $a_2 = 5d$, $a_{2,c} = 60 \text{ mm}$, WA siehe Skizze BI, Anziehen mit 26 Nm, 06.03.2020, 26Nm anziehen Erstbelastung 110kN, Sek beim Einschrauben 11sec --> 85 U/min; Leichtes aufspalten bei Eindrehen / Vorspannen siehe Foto; Lauter Knax bei F_{1st} , dann Knistern des Herausziehens, T1-02 | 10 |
| 50 | 90_BB_9_156_a7d_a5d_02_T2-01 | 153 | B | It. Aussage von Luef: "ein zacher Kollege" - eine Schr. beim Eindrehen nach ca. 4mm eindrehen - Spitze abgebrochen. Also aus sym. Gründen mit 7 Schrauben geprüft, $F_{1st} \sim 150 \text{ kN}$, | 10 |
| 51 | 90_BU_9_156_a75d_a25d_01_T294-1-2 | 186 | B | Buche, $v = 1,0 \text{ mm/min}$, $F_{est} \sim 150 \text{ kN}$, Länge Öffnung 240 mm, $a_1 = 7,5d$, $a_2 =$ | 11 |

| | | | | | |
|----|-------------------------------------|------|-----|---|----|
| | | | | 2,5d, $a_{2,c} = 50$ mm, $l_{ef} = 56 + 8$ mm, T294-1-2, Orientierung + WA siehe Foto, 10.03.2020, 11: 39 Uhr, Knaxt bei 100 kN, Anziehen 26 NM, T; Duo | |
| 52 | 90_BU_9_156_a75d_a25d_02_T252 | 158 | B | T252-3-4 mit 02-T294 gespeichert, WA rel N vergessen, 12:18 Uhr | 11 |
| 53 | 90_BU_9_156_a75d_a25d_03_T269 | 156 | B | T269-1-2, 15:40 | 11 |
| 54 | 90_BU_9_156_a75d_a25d_04_T274 | 159 | B | T274-3-4 bereits nach Erstbelastung Risse in S; F_{1st} bei ca 100 KN Riss N in Grafik sichtbar; | 11 |
| 55 | 90_BU_9_156_a75d_a25d_05_T235-03-04 | 185 | B | nach einschrauben Risse in S; | 11 |
| 56 | 90_BU_9_156_a75d_a25d_06_T244 | 149 | B | T244-3-4; | 11 |
| 57 | 90_BU_9_156_a75d_a25d_07_T294-3-4 | 211 | H | $l_{emb} = 28$ mm $= 3,5d$, T294-3-4, 14:38 Uhr, F_{1st} bei 100kN, mittlere Reihe aufgerissen | 12 |
| 58 | 90_BU_9_156_a75d_a25d_08_T290-1-2 | 250 | - | extrem schwer einzudrehende Schrauben; kein Versagen nur aufspalten; Prüfmaschine unterbricht bei 250 KN, Aussortiert | 12 |
| 59 | 90_BU_9_156_a75d_a25d_09_T276-3-4 | 156 | H+A | F_{1st} bei ca 90KN Riss in M; | 12 |
| 60 | 90_BU_9_156_a75d_a25d_07_T252-1-2 | 178 | H+A | Wegaufnehmer unten S und rel S nicht montiert; F_{1st} bei ca. 105KN Riss in M; | 12 |
| 61 | 90_BU_9_156_a75d_a25d_07_T269-3-4 | 191 | B | Schraube im SO neben richtiger Lage ganz eingeschraubt, wieder herausgeschraubt und richtig eingeschraubt, eventuelle Schwächung; aufspalten N S bei ca 120KN; | 12 |
| 62 | 90_BU_9_156_a75d_a25d_07_T265-1-2 | 200 | H+A | F_{1st} bei ca 100KN Riss in M; | 12 |
| 63 | 90_BI_9_156_a75d_a25d_01_T1 | 96,2 | B | BIRKE, T1-3-4-5, 11.03.2020, 9:12 Uhr, $F_{est} \sim 150$ kN, Länge Öffnung 240 mm, $a_1 = 7,5d$, $a_2 = 2,5d$, $a_{2,c} = 50$ mm, $l_{ef} = 56 + 8$ mm, PK 3 lagig Höhe 120 mm, $F_{1st} \sim 90$ kN, PK 530 mm Länge, Abstand Befestigung Halterung WA rel: 20 mm und 10 mm, 20Nm | 13 |
| 64 | 90_BI_9_156_a75d_a25d_02_T3 | 132, | B | T3-3-4-5, 9:44 Uhr | 13 |
| 65 | 90_BI_9_156_a75d_a25d_03_T6 | 88,6 | B | Spaltet beim Anziehen im Süden, T6-3-4-5, Knax bei 80 kN Erster Belastungsast, 11:05 Uhr, F_{1st} bei 85 kN | 13 |
| 66 | 90_BI_9_156_a75d_a25d_04_T5 | 80,6 | B | mittlere Reihe beim Eindrehen aufgerissen. "ziemlich" genau Kern, T5-3-4-5, bei Erstbelastung 80 kN aufgespalten, trotzdem weiter gefahren (Steifigkeiten!!), nach Entlastung gesehen, dass Fasern an Auflagerkante abgeschnitten wurden | 13 |
| 67 | 90_BI_9_156_a75d_a25d_05_T4 | 108 | B | T4-3-4-5; F_{1st} bei ca 95 KN , Riss in N und S; | 13 |
| 68 | 90_BI_9_156_a75d_a25d_06_T2 | 102 | B | T2-3-4-5, 12:08 Uhr | 13 |
| 69 | 90_BB_9_156_a75d_a75d_01_Txx | 165 | B? | BauBuche Länge Öffnung 240 mm, $a_1 = 7,5d$, $a_2 = 7,5d$, $a_{2,c} = 30$ mm, $l_{ef} = 56 + 8$ mm, PK Höhe 160 mm, Spitzchen-ca. 3mm einer Sch.r beim Eindrehen abgerissen (siehe Foto), abgebrochene durch neue | 14 |

| | | | | | |
|----|-----------------------------------|------|-------|---|----|
| | | | | ersetzt; nach Be- und Entlastung bereits Risse zwischen den Schrauben; Querschnitt in S bei 160KN; T1-03, 26 Nm | |
| 70 | 90_BB_9_156_a10d_a75d_02_T3-3 | 182 | B? | bereits nach eindrehen Risse in N; | 14 |
| 71 | 90_BB_9_156_a7,5d_a5d_03_T2-3 | 162 | B | Umbau Aufbau um Prüfkörper quer einbauen zu können; $a_1=7,5d$, $a_2=5d$; Wegaufnehmer unten wurden im Uhrzeigersinn weitergedreht; | 14 |
| 72 | 90_BU_9_140_a5d_a75d_01_T200-216 | 115 | R+B | Buche, $v = 1,0$ mm/min, Länge Öffnung 180 mm, $a_1 = 5d$, $a_2 = 7,5d$, Ziel Rollschubversagen, $l_p=40+8$ mm, T200-2 T216-1-2, 12.03.2020 9:27 Uhr, leichte Risse nach Anziehen, 26 Nm, F_{1st} Reihen N und Mitte offen - kurz danach Querschnitt, nochmal Querschnitt (jeweils wo Prüfkurve senkrecht nach unten fällt nach F_{max} , Qz in Fuge | 15 |
| 73 | 90_BU_9_156_a5d_a75d_02_T200-177 | 169 | H | $l_p = 56+8$ mm, T200-1 T177-1-2, leichte Risse Oberfläche | 15 |
| 74 | 90_BU_9_146_a5d_a75d_03_T193-186 | 184 | H+R | T193-1-2 T186-2, 10:30 Uhr, Knax bei 178 kN (vermutlich Reihe aufgegangen) | 15 |
| 75 | 90_BU_6_140_a5d_a75d_01_T220 | 97,2 | R+B | T220-2, T201-2, T178-1, $n = 6$, 2 hintereinander in Faserrichtung mit $a_1 = 5d$, 3 nebeneinander quer zu Faserrichtung mit $a_2 = 60$ mm, $l_p = 40+8$ mm, Pk quer eingebaut, Verhältnis der Schubfläche zur Qz- bzw. Rs-Fläche groß, Ziel Rollschubversagen, 11:17 Uhr, Länge Öffnung 180 mm, F_{1st} bei 90 kN, F_{max} Reihen aufgerissen, nach F_{max} Riss (wo Prüfkurve senkrecht) in Klebefuge | 16 |
| 76 | 90_BU_6_140_a5d_a10d_01_T205 | 67,5 | H | $n = 4$, $a_1 = 5d$, $a_2 = 10d$, $l_p = 40+8$ mm, 12:30 Uhr, Prüfkörper quer eingebaut, Peak bei 62 kN (evt. Reihe gerissen); T209-02 T205-1-2 | 16 |
| | | | | Rollschubversagen nicht wirklich erreicht | |
| 77 | 90_BU_9_156+4d_a75d_a5d_01_T202 | 237 | H+Sp | Buche, $v = 1,0$ mm/min, Länge Öffnung 240 mm, $a_1 = 7,5d$, $a_2 = 2,5d$, $l_p=l_{ef} + l_{emb}=46+8$ mm+ 32mm, entsprechend 32 mm mit $d = 8$ mm vorgebohrt, $n=9$, T202-T194, F_{1st} bei 220 kN (mittlere Reihe aufgespalten), viele Schwindrisse in oberster Lamelle, Herausziehen | 17 |
| 78 | 90_BU_9_156+4d_a75d_a5d_02_T191 | 186 | H+Sp | Knax bei F_{max} und schräger Riss durch Mitte (siehe Foto); T191-01-01 176-02 | 17 |
| 79 | 90_BU_9_156+4d_a75d_a5d_03_T214 | 239 | H+Sp? | bei ca. 240 KN Klebefuge obere Klebefuge aufgerissen in N=nach F_{max} ; T194-02 214-01-02; Knax bei F_{max} | 17 |
| 80 | 90_BU_9_156+4d_a75d_a5d_04_T207 | 209 | H+Sp | T209-01 207-01-02; Knax bei F_{max} | 17 |
| 81 | 90_BU_9_156+4d_a75d_a5d_05_T206 | 225 | H+Sp | T206-1-2 188-12; Knax bei F_{max} ; | 17 |
| 82 | 90_BU_9_156+4d_a75d_a5d_06_T181 | 228 | H+Sp | T181-1-2 197-2; F_{1st} bei 205 KN Querschnitt in der Mitte aufgerissen; weiterer Knax bei 220 KN; | 17 |
| 83 | 90_BU_9_156_a75d_a25d_01_T244-1-2 | 165 | B | Buche, $v = 1,0$ mm/min, $F_{est} \sim 150$ kN, Länge Öffnung 240 mm, $a_1 = 7,5d$, $a_2 =$ | 18 |

| | | | | | |
|----|-----------------------------------|------|---|---|----|
| | | | | 2,5d, $a_{2,c} = 50$ mm, $l_{ef} = 56 + 8$ mm, 13.03.2020, 9:16 Uhr, Anziehen 26 NM, T; Duo breite 88mm; bereits nach eindrehen QS im Norden aufgerissen; | |
| 84 | 90_BU_9_156_a75d_a25d_02_T230 | 135 | B | T230, Peak bei 110 kN, nach Eindrehen Risse entlang der äußeren Schr.reihen | 18 |
| 85 | 90_BU_9_156_a75d_a25d_03_T237 | 148 | B | nach Eindrehen Risse entlang der äußeren Schr.reihen, T237 | 18 |
| 86 | 90_BU_9_156_a75d_a25d_04_T231 | 157 | B | T231, leichte Risse bei Vorspannen im N; 10:55 | 18 |
| 87 | 90_BB_9_156_a75d_a25d_01_T2-2 | 118 | B | BauBuche, $v = 1,0$ mm/min, $F_{est} \sim 150$ kN, Länge Öffnung 240 mm, $a_1 = 7,5d$, $a_2 = 2,5d$, $a_{2,c} = 50$ mm, $l_{ef} = 56 + 8$ mm, Anziehen 26 NM, T; | 19 |
| 88 | 90_BB_9_156_a75d_a25d_02_Txx | 116 | B | Schraube beim Eindrehen an der Spitze abgebrochen, neue Schraube eingedreht; ab ca 100 KN Rissbildung, T1-1 | 19 |
| 89 | 90_BB_9_156_a75d_a25d_03_Txx | 117 | B | T4-3 | 19 |
| 90 | 90_BB_9_156_a75d_a25d_04_Txx | 104 | B | T3-1 | 19 |
| 91 | 90_BU_6_1120_a5d_a35d_04_T238-268 | 228 | S | 31.03.2020, Dreiecksplatte getauscht, $a_1 = 5d$, $a_2 = 3,5d = 28$ mm, $l_p = 120 + 8$ mm, 10:13 Uhr, Anziehen 26 Nm, T238-3-4 T268-1, Weg oben O nicht fixiert, Niveau Erstbelastung leider 80 kN, $v = 1,0$ mm/min, 6 x Schraubenbruchist eigentlich der Prüfung Nr 03, aber bei 04 angefangen zu zählen und beibehalten, Länge Öffnung 180 mm, Files mit a7d-a35d gespeichert aber a5d-a35d geprüft; 3 | 8 |
| 92 | 90_BU_6_1120_a5d_a35d_05_T236 | 227 | S | Niveau Erstbelastung 110 kN, $v = 1,6$ mm/min, T236-1-2-3, 11:28 Uhr, bei beiden kaum Risse bei Erstbelastung, 15mm Weg (! Siehe Foto nach LE), 4 x Schr.bruch 4 | 8 |
| 93 | 90_BU_6_1120_a5d_a35d_06_T279 | 229 | S | T279, alle Schrauben gerissen 5 | 8 |
| 94 | 90_BU_6_1120_a5d_a35d_07_T260 | 228 | S | alle Schrauben gerissen, 6 | 8 |
| 95 | 90_BU_6_1120_a7d_a25d_04_T278 | 229 | S | alle Schrauben gerissen | 5 |
| 96 | 90_BU_6_1120_a7d_a25d_05_T277 | 228 | S | T277-2-3-4, WA-W beim Anziehen der Schrauben verschoben und wieder in Position gesetzt; <i>Da bei allen Prüfungen alle Schrauben gebrochen sind, wurde die letzte Prüfung nicht mehr durchgeführt.</i> | 5 |
| 97 | 90_BB_4_156_a10d_a10d_01_T4-1 | 94,4 | H | 01.04.2020, $a_1 = 10d$, $a_2 = 10d$, $l_p = 56 + 8$ mm, Länge Öffnung = 240 mm, Breite PK = 185 mm, Gruppe exzentrisch im PK, damit zweite Gruppe Platz hat, siehe Foto, TG 8x240/100 damit sich Prüfaufbau ausgeht, nicht vorgebohrt, Ziel: Herausziehen, $F_{est} \sim 80$ kN, Erstbelastung $F = 35$ kN Foto 1 nach eindrehen (Risse Einschraubkegel), Catman Start hat erst nach Vorspannen geklappt (F_{max} von Zwick-File!) Foto 2 nach Anziehen der | 20 |

| | | | | | |
|-----|--------------------------------|-------|---|--|----|
| | | | | Schrauben (Risse Einschraubkegel ~gleich wie Foto 1), Anziehmoment 26 Nm zu gering. Erst bei 34 Nm ließen sich Schr. gleichmäßig anziehen. Knistert ab 70 kN, Foto 3 bei ~ 85 kN, Foto 4 kurz nach F_{max} , Foto 5 nach Prüfung | |
| 98 | 90_BB_4_156_a10d_a10d_02_T4-1 | 89,90 | H | T4-1 benachbarte Seite, bewusst langsames Eindrehen, 30 Nm erforderlich, Foto 1 bei ~ 35 kN, Risse an Oberfläche zwischen Schrauben schon nach Einbringen, Foto 2 bei ~ 85 kN, Foto 3 nach Entlasten | 20 |
| 99 | 90_BB_4_156_a10d_a10d_03_Txx | 96,30 | H | Foto 1 nach Anziehen, "nur" Risskegel, lange Risse bei 60kN sichtbar, Foto 2 kurz nach F_{max} , T3-02, 34 Nm erforderlich | 20 |
| 100 | 90_BB_4_156_a10d_a10d_04_T3-02 | 96,10 | H | T3-02, wieder neben erster Gruppe (Abstand Gruppe Zentrum 21 cm), Risskegel nach Eindrehen, 30 Nm erforderlich, Foto 1 bei 15 kN, Risse zwischen Schr. Bei 75 kN sichtbar (Foto 2), Foto 3 nach Prüfung | 20 |

Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | F – Forschungsberichte
V – Vorträge, Tagungen | M – Masterarbeiten

Institutskennzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl