

# Experimentelle Untersuchungen an zugbeanspruchten Schrägschraubverbindungen mit Bezug auf Versagen des Holzbauteils

M-4-01/2015



**Laura Brandl**  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz





Laura Brandl, BSc

# **Experimentelle Untersuchungen an zugbeanspruchten Schrägschraubverbindungen mit Bezug auf Versagen des Holzbauteils**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

Eingereicht an der  
**Technischen Universität Graz**

Betreuer  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
DI Andreas Ringhofer  
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, Jänner 2015





# **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

Ich bedanke mich bei Univ.Prof. Dipl.Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer für die Unterstützung bei der Entstehung dieser Arbeit und die interessanten Vorträge im Rahmen der Lehrveranstaltungen, welche meine Begeisterung für den Holzbau immer größer werden ließen.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Dipl.Ing. Andreas Ringhofer für die hervorragende Betreuung und Unterstützung bei der Erstellung dieser Masterarbeit.

Bei den Mitarbeitern des Institutes für Holzbau und Holztechnologie, sowie der holz.bau forschungs gmbh, im Besonderen Dipl.Ing. Manfred Augustin, bedanke ich mich herzlich für die anregenden Gespräche und Vorschläge zu dieser Arbeit.

Weiters bedanke ich mich bei TM Ing. Bernd Heissenberger, der mich in der Vorbereitung und Durchführung der Versuche maßgeblich unterstützte. Außerdem möchte ich mich bei Dipl.Ing. Bastian Valentin Wilding und Thomas Markus Laggner für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche bedanken.

Meinen Studienkollegen danke ich an dieser Stelle für die schöne, lustige und lehrreiche Zeit an der TU Graz.

Der größte Dank gilt meinen Eltern Karin und Hannes Brandl, die mir das Studium ermöglicht haben und mir immer mit Rat und Tat zur Seite stehen und eine verlässliche Stütze in meinem Leben sind. Auch meinen Geschwistern Christina und Lukas möchte ich einen großen Dank aussprechen.

Zu guter Letzt danke ich meinem Freund Renè, der immer hinter mir steht und an mich glaubt.



## Kurzfassung

Durch die ständige Weiterentwicklung selbstbohrender Holzschrauben erweiterten sich im Laufe der letzten Jahre ihre Einsatzgebiete. Aufgrund der hohen axialen Beanspruchbarkeit von Schrauben werden sie für Stahl-Holz-Verbindungen im modernen Ingenieurholzbau immer häufiger bei Anschlüssen mit in Krafrichtung angeordneten Verbindungsmitteln eingesetzt. Diese Verbindungsart ermöglicht zugbeanspruchte Verbindungen, welche hohe Kräfte übertragen und so weitgespannte Tragwerke ermöglichen.

Da die unterschiedlichen Tragmechanismen und Versagensmodi der Verbindungsmittel bereits ausreichend erforscht wurden, beschäftigt sich diese Arbeit mit dem bisher weniger beachteten Thema Nettoquerschnittsversagen. Erste Untersuchungen an Schraubenverbindungen zeigten im Falle von Nettoquerschnittsversagen bisher als unüblich angesehene Bruchbilder, welche in der bisherigen Nachweisführung nicht ausreichend abgedeckt sind.

Um diesen Versagensmodus und das bisherige Nachweisformat zu überprüfen wurden experimentelle Untersuchungen an unterschiedlich geschwächten Probekörpern in Form von ein- und mehrschnittigen Stahlblech-Holz-Verbindungen durchgeführt.

Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass das bisherige Nachweisformat zu überdenken ist. Für den Nettoquerschnittsnachweis ist eine Nettoquerschnittsfläche zu berücksichtigen, welche sich aus der Bruttoquerschnittsfläche mit Abzug der projizierten Fläche der Schrauben, ohne Berücksichtigung eventueller Überlappungen zusammensetzt.

## Abstract

Due to the ongoing development of self-tapping screws over the years, their range of applications has expanded significantly. They are being used in modern timber engineering for steel-to-timber connections with fasteners in force direction, because of the axial strength of screws. These type of connections allow tensile stressed joints, which can transfer high forces thus allowing wide-span structures.

The different bearing mechanism and failure modes are already sufficiently investigated. This master thesis focuses on net-cross-section failure modes which has found little attention to date.

Experimental studies with different weakened test specimen were carried out, to investigate the failure mode and the consequences on the current design requirements. Single shear and multi shear connections were examined.

The results suggest, that the current design requirements should be modified. In case of net-cross-section verifications a net-cross-sectional area as result of the gross-section area reduced by the projected surface of screws, without compliance possible overlaps, has to be considered.



# Inhaltsverzeichnis

<b>KAPITEL 1: ALLGEMEINES ZUM VERBINDUNGSTYP</b> .....	<b>1</b>
1-1 VOLLGEWINDEHOLZSCHRAUBEN .....	1
1-2 SCHRÄGSCHRAUBVERBINDUNGEN .....	6
1-2.1 Allgemeines.....	6
1-2.2 Wirkprinzip .....	7
<b>KAPITEL 2: NETTO-QUERSCHNITTSFLÄCHEN</b> .....	<b>9</b>
2-1 ALLGEMEINES .....	9
2-2 NETTOQUERSCHNITTSFLÄCHEN AUS VERBINDUNGSMITTELN.....	10
2-2.1 Normung.....	10
2-2.2 Bemessungshandbücher .....	10
2-2.3 Forschung .....	11
2-2.4 Nettoquerschnittsflächen bei Schrägschraubverbindungen.....	12
2-3 EINFLUSS VON ÄSTEN AUF NETTOQUERSCHNITTSVERSAGEN.....	15
<b>KAPITEL 3: OFFENE FRAGESTELLUNGEN UND PRÜFKONZEPT</b> .....	<b>17</b>
<b>KAPITEL 4: MATERIAL</b> .....	<b>19</b>
4-1 HOLZ .....	19
4-1.1 Probekörperherstellung .....	19
4-1.1.1 Lagerung.....	20
4-1.1.2 Messungen an Probekörpern .....	21
4-2 VERBINDUNGSMITTEL.....	24
4-3 STAHLBLECHE.....	25
<b>KAPITEL 5: METHODEN</b> .....	<b>26</b>
5-1 VORBEMESSUNG DER VERBINDUNG .....	26
5-2 PRÜFSERIE A .....	28
5-2.1 Zugprüfungen Brettlamelle; Prüfreihe „VA“ .....	28
5-2.1.1 Prüfkonfiguration, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung .....	28
5-2.2 Zugprüfungen Duoquerschnitt; Prüfreihe „VA1“ .....	29
5-2.2.1 Prüfkonfiguration, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung .....	29
5-2.3 Hauptversuche; Prüfreihe „A“.....	30
5-2.3.1 Prüfkonfiguration, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung .....	30
5-3 PRÜFSERIE B .....	32
5-3.1 Zugprüfungen Brettlamelle; Prüfreihe „VB“ .....	32
5-3.1.1 Prüfkonfiguration, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung .....	32
5-3.2 Zugprüfungen Duoquerschnitt ; Prüfreihe „VB11“.....	33
5-3.2.1 Prüfkonfiguration, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung .....	33

5-3.3	Hauptversuche .....	33
5-3.3.1	Prüfkonfiguration, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung .....	33
<b>KAPITEL 6: ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....</b>		<b>36</b>
6-1	PRÜFSERIE „A“ .....	36
6-1.1	Zugprüfungen Brettlamelle; Prüfreihe „VA“ .....	36
6-1.2	Zugprüfungen Duoquerschnitt; Prüfreihe „VA1“ .....	45
6-1.3	Hauptversuche; Prüfreihe „A“ .....	53
6-2	PRÜFSERIE „B“ .....	66
6-2.1	Zugprüfungen Brettlamelle; Prüfreihe „VB“ .....	66
6-2.2	Zugprüfungen Duoquerschnitt; Prüfreihe „VB1“ .....	74
6-2.3	Hauptversuche .....	82
6-2.3.1	Prüfreihe „B1“ .....	82
6-2.3.2	Prüfreihe „B2“ .....	89
6-2.3.3	Prüfreihe „B3“ .....	98
6-2.3.4	Prüfreihe „B4“ .....	103
6-2.4	Vergleich unterschiedlicher Prüfgruppen .....	109
<b>KAPITEL 7: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>		<b>111</b>
<b>ANHANG A VERZEICHNISSE .....</b>		<b>I</b>
A-1	Abbildungsverzeichnis .....	I
A-2	Tabellenverzeichnis .....	VI
A-3	Literaturverzeichnis .....	VII
<b>ANHANG B ERGEBNISAUSWERTUNGEN.....</b>		<b>XI</b>
B-1	Ergebnisse; Prüfreihe „VA“ .....	XI
B-2	Ergebnisse; Prüfreihe „VA1“ .....	XIII
B-3	Ergebnisse; Prüfreihe „A“ .....	XV
B-4	Ergebnisse; Prüfreihe „VB“ .....	XVIII
B-5	Ergebnisse; Prüfreihe „VB1“ .....	XXIV
B-6	Ergebnisse; Prüfreihe „B1“ .....	XXIX
B-7	Ergebnisse; Prüfreihe „B2“ .....	XXXIII
B-8	Ergebnisse; Prüfreihe „B3“ .....	XXXVI
B-9	Ergebnisse; Prüfreihe „B4“ .....	XL



# Bezeichnungen und Abkürzungen

$\bar{y}$	Mittelwert
A	Querschnittsfläche des Probekörpers [mm <sup>2</sup> ]
A <sub>Äste</sub>	Querschnittsfläche der Äste [mm <sup>2</sup> ]
A <sub>Brett</sub>	Querschnittsfläche des Brettes [mm <sup>2</sup> ]
A <sub>brutto</sub>	Bruttoquerschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
A <sub>netto</sub>	Nettoquerschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
A <sub>Q</sub>	Nennquerschnittsfläche der Schrauben [mm <sup>2</sup> ]
A <sub>S</sub>	in Schnittebene projizierte Außenfläche der Schrauben [mm <sup>2</sup> ]
b	Breite des Bauteils [mm]
COV(f <sub>i</sub> )	Variationskoeffizient des Ausziehparameters [-]
COV(f <sub>t</sub> )	Variationskoeffizient der Zugfestigkeit [-]
COV(R <sub>t</sub> )	Variationskoeffizient der Zugtragfähigkeit der Schraube [-]
d	Schraubendurchmesser [mm]
d <sub>h</sub>	Schraubenkerndurchmesser [mm]
E <sub>dyn</sub>	dynamischer E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
E <sub>dyn,12</sub>	dynamischer E-Modul normiert auf 12 % Holzfeuchte [N/mm <sup>2</sup> ]
f <sub>1,k</sub>	charakteristischer Wert des Ausziehparameters [N/mm <sup>2</sup> ]
f <sub>1,m</sub>	mittlerer Wert des Ausziehparameters [N/mm <sup>2</sup> ]
f <sub>ax,k</sub>	charakteristischer Ausziehparameter einer Schraube [N/mm <sup>2</sup> ]
F <sub>ax,α,Rk</sub>	charakteristischer Wert des Durchziehwiderstandes der Verbindung unter einem Winkel α zur Faserrichtung; α ≥ 30° [N]
F <sub>c,0,d</sub>	Bemessungswert der Druckkraft [N]
F <sub>d</sub>	Bemessungswert der einwirkenden Kraft [N]
f <sub>head,k</sub>	charakteristischer Durchziehparameter der Schraube [N/mm <sup>2</sup> ]
f <sub>k</sub>	charakteristischer Wert der Festigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
F <sub>max</sub>	maximale Bemessungskraft [N]
f <sub>t,0</sub>	Zugfestigkeit des Holzes [N/mm <sup>2</sup> ]
F <sub>t,0,d</sub>	Bemessungswert der Zugkraft [N]
f <sub>t,0,g,k</sub>	charakteristische Zugfestigkeit des Brettschichtholzes [N/mm <sup>2</sup> ]
f <sub>t,0,k</sub>	charakteristische Zugfestigkeit des Holzes [N/mm <sup>2</sup> ]
f <sub>t,0,1,k,average</sub>	Mittelwert der charakteristischen Zugfestigkeiten der Brettware [N/mm <sup>2</sup> ]
f <sub>t,0,m</sub>	mittlere Zugfestigkeit des Holzes [N/mm <sup>2</sup> ]
F <sub>t,Rk</sub>	charakteristische Zugtragfähigkeit der Schraube [N]
f <sub>tens,k</sub>	charakteristischer Zugwiderstand der Schraube [N]
h	Höhe des Bauteils [mm]
k	Anzahl der im Schnitt erfassten Schrauben [-]

$k_{ax}$	Faktor zur Berücksichtigung des Winkels zwischen Schraubenachse und Faserrichtung [-]
$k_s$	Faktor zu Berücksichtigung der Anzahl der Prüfergebnisse
$k_{size,l,t,0}$	Volumenbeiwert [-]
$k_{sys,l,t,0}$	Systembeiwert [-]
$l$	Länge des Probekörpers [m]
$l_{ef}$	Eindringtiefe des Gewindeteils [mm]
$l_i$	Bauteillänge [mm]
$m$	Masse des Probekörpers [kg]
$m$	Anzahl der Schraubenreihen je Lasche [-]
$m_0$	Masse Holz darrtrocken [g]
$m_i$	Prüfergebnis
$m_u$	Probenmasse unter Versuchsbedingungen [g]
$m_w$	Wassermenge [g]
$M_{y,k}$	charakteristisches Fließmoment der Schraube [Nm]
$n$	Anzahl der Schrauben [-]
$n_{ef}$	wirksame Anzahl von Schrauben [-]
$R_{ax,k}$	charakt. Wert des Ausziehwiderstandes der Verbindung [N]
$R_{ax,m}$	mittlere axiale Zugtragfähigkeit der Schraube [N]
$R_{t,u,k}$	charakteristische Zugtragfähigkeit der Schraube [N]
$R_{t,u,m}$	mittlere Zugtragfähigkeit der Schraube [N]
$s_y$	Standardabweichung
$t$	Ultraschalllaufzeit [ $sec^{-6}$ ]
$u$	Holzfeuchte [%]
$v$	Ultraschallgeschwindigkeit [m/s]
$V$	Volumen des Probekörpers [m <sup>3</sup> ]
$v_{12}$	Ultraschallgeschwindigkeit normiert auf 12 % Holzfeuchte [m/s]
$w_1$	Bauteilbreite [mm]; wenn $w_1 \geq 80$ mm, sonst $w_1 = 80$ mm
$\alpha$	Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung [°]
$\beta$	Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung [°]
$\Delta A$	überschneidende Astflächen [mm <sup>2</sup> ]
$\rho$	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{12}$	Rohdichte normiert auf 12 % Holzfeuchte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_a$	zugehörige Rohdichte für $f_{ax,k}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_k$	charakteristischer Wert der Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_{c,0,d}$	Bemessungswert der Druckspannung in Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{t,0,d}$	Bemessungswert der Zugspannung in Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
BR	Bruttoquerschnittsbruch

NQ	Nettoquerschnittsbruch
SB	Stahlbruch der Schrauben
MB	Mischbruch
SCHUB	Schubbruch/Blockscheren
VM	Verbindungsmittel



# MOTIVATION UND ZIEL DER ARBEIT

Im modernen Ingenieurholzbau werden Stahl-Holz-Verbindungen mit Schrauben als Verbindungsmittel sehr häufig für zugbeanspruchte Verbindungen eingesetzt, um die immer höher werdenden aufzunehmenden Kräfte in Hochleistungsverbindungen einzuleiten. Die Einsatzgebiete für Schrauben sind vielfältig. Besonders leistungsfähige Schraubverbindungen werden mit Schrägverschraubung ausgeführt, um die hohe axiale Tragfähigkeit der Holzschrauben optimal zu nutzen. Die unterschiedlichen Tragmechanismen einer Schraubverbindung und Versagensmodi sind in vielen Forschungsarbeiten bereits ausführlich analysiert und weitgehend erforscht. Das Versagen im Nettoquerschnitt wurde jedoch bis dato nur in einem geringen Ausmaß untersucht und dementsprechend wenig Erkenntnisse liegen vor. Vorangegangene Versuche am Institut haben gezeigt, dass bei Stahllaschenverbindungen mit schräg eingeschraubten Holzschrauben vermehrt Nettoquerschnittsbrüche auftreten, welche ein bis dahin als untypisch angesehenes Bruchbild aufwiesen, da der Querschnitt des Bauteiles durch die Verbindungsmittel signifikant geschwächt wird. Es kommt bei einem Zugbruch zu einem typischen spröden Versagen des Holzes, da keine plastischen Reserven vorhanden sind. Bisher wurden beim Nettoquerschnittsnachweis nur die elliptischen Querschnitte der Schraube in der betrachteten Schnittfuge abgezogen. Da zu befürchten ist, dass diese Annahme zu konservativ ist, wurde in [13] eine neue Formel zur Nettoquerschnittsermittlung vorgeschlagen. Diese Betrachtungsweise berücksichtigt die Schrauben in ihrer projizierten Fläche und bildet den in Versuchen ermittelten Verlauf der Bruchfläche ab. Parallel dazu wird auf Basis der Versuche an der TU Graz von Brunauer in [33] eine Modifikation dieses Vorschlages zur Berechnung der Nettoquerschnittsfläche verwendet, welche sich nur in der „Nicht-Berücksichtigung“ der überlappenden Bereiche der Schrauben von erstgenannter Theorie unterscheidet.

Das erklärte Ziel der Arbeit ist es, mittels experimenteller Untersuchungen die neue Nachweisführung zu bestätigen oder zu widerlegen, um die offene Fragestellung bezüglich der bestmöglichen Berücksichtigung von Fehlflächen durch Verbindungsmittel für diese Art des Anschlusses zu beantworten. Zu diesem Zwecke werden sowohl einreihige, als auch mehrreihige Zug-Laschenstöße mit unterschiedlichem Netto- zu Bruttoverhältnis der Flächen geprüft. Über Stahllaschen und in einem Winkel von 45 Grad eingeschraubte, selbstbohrende Holzschrauben werden die Kräfte in die Verbindung eingeleitet. Durch diese Untersuchungen werden aussagekräftige Ergebnisse erwartet. Weiters werden die verschiedenen Versagensmechanismen von Schrägschraubverbindungen mit Stahllaschen, wie zum Beispiel Aufspalten des Bauteils entlang der Schrauben hintereinander in Faserrichtung untersucht. Die Einflussfaktoren und Möglichkeiten zur rechnerischen Berücksichtigung für diesen Versagensfall sind zu analysieren und zu beschreiben.



# KAPITEL 1: ALLGEMEINES ZUM VERBINDUNGSTYP

## 1-1 VOLLGEWINDEHOLZSCHRAUBEN

[1], [5], [6], [7], [11], [13], [14], [24], [27], [28], [30]

Holzschrauben sind mechanische Verbindungsmittel, welche eine kraftschlüssige Verbindung von Bauteilen aus Holz ermöglichen. Sie gehören zur Gruppe der stiftförmigen Verbindungsmittel und können als Holz-Holz-Verbindung oder Stahl-Holz-Verbindung ausgeführt werden. Holz-Stahl-Verbindungen bieten gegenüber Holz-Holz-Verbindungen wirtschaftliche Vorteile, da hohe Tragfähigkeiten und Steifigkeiten erreicht werden. Die Steifigkeit bei Holz-Holz-Verbindungen ist aufgrund des seriellen Systems der Verbindungsmittelsteifigkeiten geringer. Durch ihre schnelle, wirtschaftliche und einfache Montage sind sie seit vielen Jahren im modernen Holzbau nicht mehr wegzudenken. Im Gegensatz zu Stabdübeln und Bolzen, die fast immer ein Vorbohren voraussetzen, können selbstbohrende Holzschrauben ohne Vorbohren in das Holzbauteil eingeschraubt werden. Die zu verbindenden Bauteile werden durch die eingebrachten Schrauben über mechanische Verzahnung verbunden. Die Schrauben können grundsätzlich auch Kräfte normal zu Schraubenachse übertragen, aber im Speziellen Druck- und Zugkräfte in Schraubenachse aufnehmen. Schrauben sind in Teilgewinde- und Vollgewindeschrauben zu unterteilen. Bei in Krafrichtung eingeschraubten Vollgewindeschrauben erfolgt die Beanspruchung großteils auf Herausziehen und Hineindrücken, wobei diese, wie auch Teilgewindeschrauben, sowohl auf Abscheren als auch auf Herausziehen und Hineindrücken beansprucht werden können. Ihre Maße sind gekennzeichnet durch den Außendurchmesser  $d_1$ , den Kerndurchmesser  $d_2$ , den Kopfdurchmesser  $d_k$ , die Schraubenlänge  $L$  und die effektive Länge  $L_{eff}$ . Je nach Verwendungsart sind verschiedene Kopfformen, zum Beispiel Zylinder- oder Senkkopf, und Gewindeausbildungen erhältlich, wie in Abbildung 1 dargestellt. Schrauben mit Zylinderkopf können bis zu 30 Zentimeter in das Holz versenkt werden. Für Stahl-Holz-Verbindungen mit Stahllaschen werden vorzugsweise Schrauben mit Senkköpfen verwendet. Spezielle Spitzengeometrien ermöglichen ein Eindrehen ohne Vorbohren, da die Spitze selbstbohrend konzipiert ist.

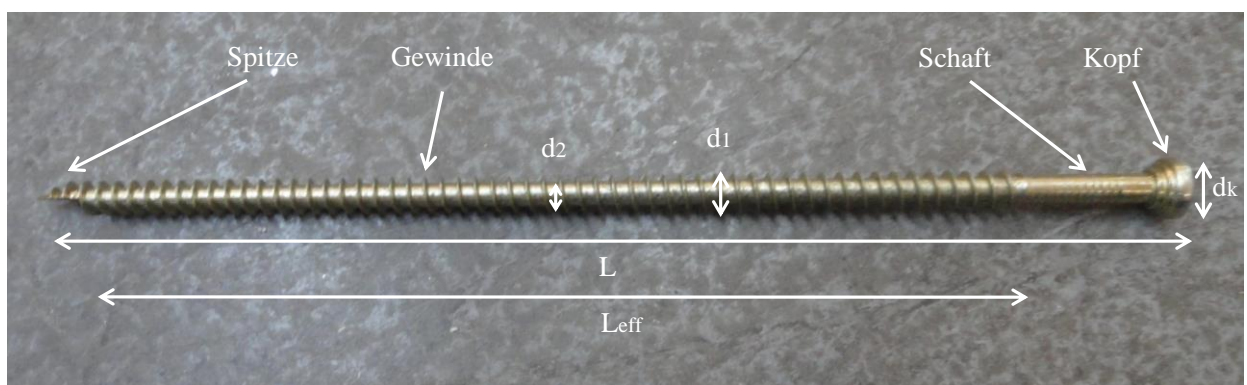


Abbildung 1: Schraubenbezeichnung und Schraubengeometrie

Für Holzschrauben gibt es aufgrund ihrer hohen Beanspruchbarkeit eine Vielzahl verschiedener Anwendungsmöglichkeiten. Laut Ringhofer [35] können diese Einsatzgebiete in „aktive“ und „passive“ unterschieden werden. Bei „aktiven“ Anwendungsfällen agiert die Schraube als Verbindungselement zwischen zwei oder mehreren Bauteilen. Zu dieser Gruppe gehören sämtliche Normalkraft-, Querkraft- (insbesondere Anschlüsse von Haupt- und Nebenträgern) und Momentenverbindungen. Als „passiv“ werden Anwendungsmöglichkeiten bezeichnet, bei denen die Schrauben als Verstärkungsmittel in nur ein Bauteil eingebracht werden, um die Tragfähigkeit auf Querdruk, Querkzug oder Schub zu erhöhen.

### **Versagensformen von Holzschrauben:**

Bei axial beanspruchten Holzschraubenverbindungen existieren drei wesentliche Versagensmodi. Wenn die Schubfestigkeit des Holzes entlang der Schraubenachse seine Höchstgrenze überschreitet, wird die Schraube herausgezogen oder hineingedrückt. Das, nur bei Holz-Holz-Verbindungen vorkommende, Kopfdurchziehversagen entsteht durch ein Eindringen des Kopfes der Schraube ins Holz und ein anschließendes Durchziehen des Kopfes. Ist die Zugfestigkeit der Schraube erreicht, kommt es zu Schraubenversagen auf Stahlbruch.

### **Parameter zur Bestimmung der Schrauben und Verbindungsmitteltragfähigkeit:**

#### Zugtragfähigkeit $R_{tu}$

Da Schrauben sinngemäß fast ausschließlich axial auf Zug beansprucht werden, ist die charakteristische Zugtragfähigkeit der Schraube der wichtigste Materialparameter bei der Auslegung und Bemessung von hochbeanspruchten Schraubverbindungen. Die Prüfkonfiguration ist in der Norm EN 1383 [10] geregelt. Der charakteristische Zugwiderstand der Schraube  $f_{tens,k}$  wird gemäß EN 14592 [2] ermittelt. Die charakteristische Zugtragfähigkeit der Schraubverbindung ergibt sich durch Berechnung mit Formel (1.1).

$$F_{t,Rk} = n_{ef} \cdot f_{tens,k} \quad (1.1)$$

$F_{t,Rk}$	charakteristische Zugtragfähigkeit der Schraubenverbindung [N]
$n_{ef}$	wirksame Anzahl von Schrauben [-]
$f_{tens,k}$	charakteristischer Zugwiderstand der Schraube [N]

mit:

$$n_{ef} = n^{0,9} \quad (1.2)$$

$n_{ef}$	wirksame Anzahl von Schrauben [-]
$n$	Anzahl von Schrauben [-]

#### Auszieh Widerstand $R_{ax}$

Die Ausziehfestigkeit wird durch den Ausziehparameter  $f_{ax,k}$  (auch:  $f_{1,k}$ ,  $f_{v,90}$ ) angegeben. Dieser Materialkennwert ist maßgebend für auf Herausziehen beanspruchte Schrauben. Er beschreibt den Widerstand des Holzmaterials gegen Schraubenausziehen und ist im Wesentlichen von der Holzrohddichte, der effektiven Einschraublänge, dem Einschraubwinkel und dem Schraubendurchmesser abhängig. Der Ausziehparameter kann über Formeln (1.3) berechnet werden, oder wird mittels Prüfungen ermittelt. Das Prüfverfahren ist in EN 1382 [9] geregelt.

Im Folgendem werden die Formeln zur Ermittlung des Auszieh Widerstandes aus EN 1995-1-1 [1] mit den Formeln laut Zulassung ETA-11/0190 [7] gegenübergestellt.



charakteristischer Auszieh Widerstand laut EN 1995-1-1 [1]:

$$R_{ax,k} = \frac{n_{ef} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot k_d}{1,2 \cdot \cos^2(\alpha) + \sin^2(\alpha)} \quad (1.3)$$

$R_{ax,k}$	charakt. Wert des Auszieh Widerstandes der Verbindung [N]
$n_{ef}$	wirksame Anzahl von Schrauben [-]
$f_{ax,k}$	charakt. Wert der Ausziehfestigkeit rechtwinkelig zur Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
$d$	Schraubendurchmesser [mm]
$l_{ef}$	Eindringtiefe des Gewindeteils [mm]
$\rho_k$	charakteristischer Wert der Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\alpha$	Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung; hier: $\alpha \geq 30^\circ$

mit:

$$k_d = \min\left(\frac{d}{8}; 1\right) \quad (1.4)$$

charakteristischer Ausziehparameter laut EN 1995-1-1 [1]:

$$f_{ax,k} = 0,52 \cdot d^{-0,5} \cdot l_{ef}^{-0,1} \cdot \rho_k^{0,8} \quad (1.5)$$

$f_{ax,k}$	charakteristischer Wert der Ausziehfestigkeit rechtwinkelig zur Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
$d$	Schraubendurchmesser [mm]
$l_{ef}$	Eindringtiefe des Gewindeteils [mm]
$\rho_k$	charakteristischer Wert der Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]

axiale Tragfähigkeit auf Herausziehen laut Zulassung ETA-11/0190 [7]:

$$R_{ax,k} = n_{ef} \cdot k_{ax} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \left(\frac{\rho_k}{350}\right)^{0,8} \quad (1.6)$$

$R_{ax,k}$	charakteristischer Wert des Auszieh Widerstandes der Verbindung [N]
$n_{ef}$	wirksame Anzahl von Schrauben [-]
$k_{ax}$	Faktor zur Berücksichtigung des Winkels zwischen Schraubenachse und Faserrichtung [-]
$f_{ax,k}$	charakteristischer Wert der Ausziehfestigkeit rechtwinkelig zur Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
$d$	Schraubendurchmesser [mm]
$l_{ef}$	Eindringtiefe des Gewindeteils [mm]
$\rho_k$	charakteristischer Wert der Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]

mit:

$$k_{ax} = 1,0 \quad \text{bei } 45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \quad (1.7)$$

$$k_{ax} = 0,3 + \frac{0,7 \cdot \alpha}{45^\circ} \quad \text{bei } 0^\circ \leq \alpha < 45^\circ \quad (1.8)$$

charakteristischer Ausziehparameter:

$$f_{ax,k} = 11,0 \text{ N/mm}^2 \text{ für Schrauben } d = 8 \text{ mm} \quad (1.9)$$

$f_{ax,k}$  charakteristischer Wert der Ausziehfestigkeit rechtwinkelig zur Faserrichtung [N/mm<sup>2</sup>]

Bei kombinierter Beanspruchung von Herausziehen und Abscheren der Schraube ergeben Grundlagenversuche nach [14] einen sinkenden Ausziehwiderstand. Die Festigkeit der Lochleibung wird jedoch nur punktuell in Fugennähe erreicht.

### Mindestabstände

Für die Bemessung und Konstruktion von Verbindungen sind Mindestabstände zwischen den Verbindungsmitteln einzuhalten. Diese Maßnahme soll ein Aufspalten infolge Querzug, Bockscheren und Aufspalten infolge Eintreiben ohne Vorbohren vermeiden. Die Mindestabstände werden unterteilt in Abstände der Verbindungsmittel untereinander und in Abstände der Verbindungsmittel zum Holzende beziehungsweise Holzrand. Diese Aufteilung und die dazugehörigen Bezeichnungen sind in Abbildung 2 dargestellt.

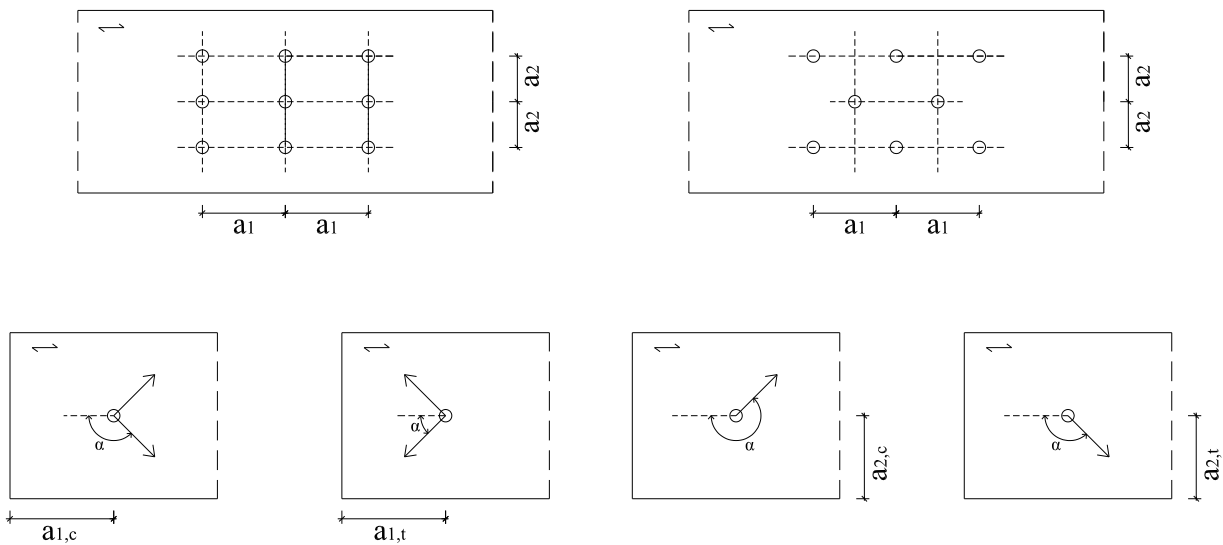


Abbildung 2: Mindestabstände

Die einzuhaltenden Mindestabstände unterscheiden sich laut EN 1995-1-1 [1] und den Zulassungen Z-9.1-656 [6] und ETA-11/0190 [7], wie in Tabelle 1 gezeigt wird. Die jeweiligen Bestimmungen gelten für in Achsrichtung beanspruchte Schrauben mit  $d_1 \geq 8 \text{ mm}$ .

**Tabelle 1: Vergleich der Mindestabstände nach EN 1995-1-1 [1], Z-9.1-656 [6] und ETA-11/0190 [7]**

Mindestabstände	EN 1995-1-1 [1]	Z-9.1-656 [6]	ETA-11/0190 [7]
$a_1$	$7 \cdot d_1$	$5 \cdot d_1$	$5 \cdot d_1$
$a_{1,c}$	$10 \cdot d_1$	$5 \cdot d_1$	$5 \cdot d_1$
$a_2$	$5 \cdot d_1$	$5 \cdot d_1$	$2,5 \cdot d_1$
$a_{2,c}$	$4 \cdot d_1$	$4 \cdot d_1$	$3 \cdot d_1$
<b>sonstige Bestimmungen</b>		$a_2 = 2,5 \cdot d_1$ ... Voraussetzung: Anschlussfläche von $a_1 \cdot a_2 = 25 \cdot d_1^2$ je Schraube	$a_1 \cdot a_2 = 25 \cdot d_1^2$

### Gruppenwirkung $n_{ef}$

Um die Tragfähigkeit einer gesamten Verbindung zu berechnen, ist die Ermittlung der Anzahl wirksamer Schrauben unerlässlich. Da das Berechnungsmodell nur auf ein Verbindungsmittel ausgelegt ist, muss die Tragfähigkeit für ein Verbindungsmittel mit der Anzahl der wirksamen Verbindungsmitteln multipliziert werden. Der Faktor  $n_{ef}$  mindert die Anzahl an Verbindungsmitteln ab, da nicht alle gleichzeitig und mit derselben Kraft beansprucht werden. Die Abminderung der Verbindungsmittelanzahl wird bereits ab zwei Verbindungsmitteln fällig. Laut EN 1995-1-1 [1] ist die effektive Verbindungsmittelanzahl  $n_{ef}$  als Anzahl der Gesamtverbindungsmittelanzahl mit einer Potenz von 0,9 definiert. Aktuelle Forschungsarbeiten, zum Beispiel nach [11], geben für die effektive Verbindungsmittelanzahl jedoch einen multiplikativen Abminderungsfaktor von 0,9, für geneigt angeordnete Schrauben mit Vollgewinde, an. Dies wird dadurch begründet, dass die Anzahl der hintereinander in Faserrichtung angeordneten Verbindungsmittel nur in geringem Ausmaß die Tragfähigkeit der Verbindung beeinflussen. Verbindungen, welche nicht auf Herausziehen versagen (Stahlbruch), können theoretisch mit einem Abminderungsfaktor von 1,0, zur Ermittlung der effektiven Verbindungsmittelanzahl, berechnet werden. Die Anzahl der Verbindungsmittelreihen normal zu Faserrichtung hat, für diesen Verbindungstyp, keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Verbindung.

### Durchziehungswiderstand:

Die Kopfdurchziehtragfähigkeit ist nur für Holz-Holz-Verbindungen von Bedeutung. Bei Stahl-Holz-Verbindungen wird dieser Widerstand nicht maßgebend.

charakteristischer Durchziehungswiderstand laut EN 1995-1-1 [1]:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = n_{ef} \cdot f_{head,k} \cdot d_h^2 \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_a}\right)^{0,8} \quad (1.10)$$

- $F_{ax,\alpha,Rk}$  charakteristischer Wert des Durchziehungswiderstandes der Verbindung unter einem Winkel  $\alpha$  zur Faserrichtung;  $\alpha \geq 30^\circ$  [N]
- $n_{ef}$  wirksame Anzahl von Schrauben [-]
- $f_{head,k}$  charakteristischer Durchziehparameter der Schraube [N/mm<sup>2</sup>]
- $d_h$  Schraubenkopfdurchmesser [mm]
- $\rho_k$  charakteristischer Wert der Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_a$  zugehörige Rohdichte für  $f_{ax,k}$  [kg/m<sup>3</sup>]

Die charakteristischen Werte des Kopfdurchziehparameters  $f_{head,k}$  können den jeweiligen Schraubenzulassungen [6] und [7] entnommen werden.

## 1-2 SCHRÄGSCHRAUBVERBINDUNGEN

[5], [6], [7], [11], [13], [14], [27]

### 1-2.1 ALLGEMEINES

Während stiftförmige Verbindungsmittel, wie Bolzen oder Stabdübel, vorwiegend auf Abscheren und somit normal auf ihre Achse beansprucht werden, zeichnen sich selbstbohrende Holzschrauben durch ihre hohe axiale Beanspruchbarkeit aus. Dies ermöglicht hohe Tragfähigkeiten in Richtung der Schraubenachse, welche bei einer Schrägschraubverbindung durch die geneigte Anordnung der Schrauben abgerufen werden kann.

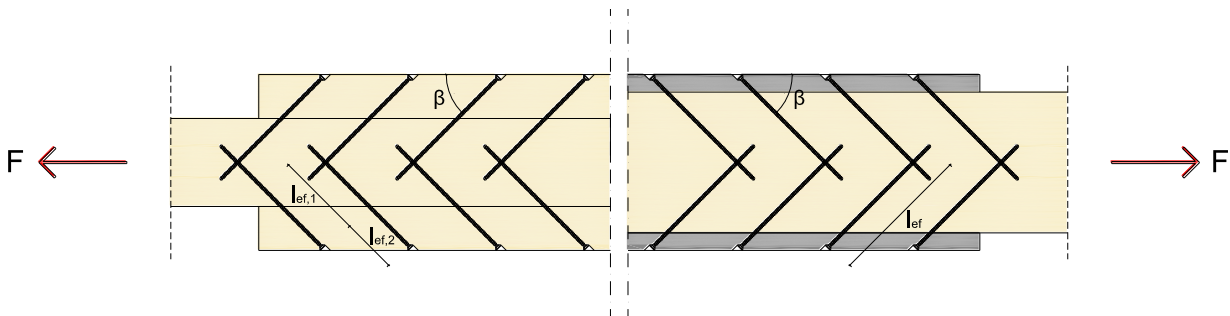


Abbildung 3: Schrägschraubverbindungen nach [13]

Die „optimale“ Verbindung sollte möglichst hohe Lasten tragen können sowie steif und duktil sein, was durch den idealen Verlauf des Kraft-Verschiebungsdiagramms gezeigt wird.

Laut Gehri [34] kann mit einer optimalen Neigung der Schrauben eine, dem idealen Verlauf der Kraft-Verschiebungskurve angenäherte Kurve erreicht werden. Dadurch wird gezeigt, dass hochleistungsfähige Verbindungen mit Schrägschraubung herzustellen sind.

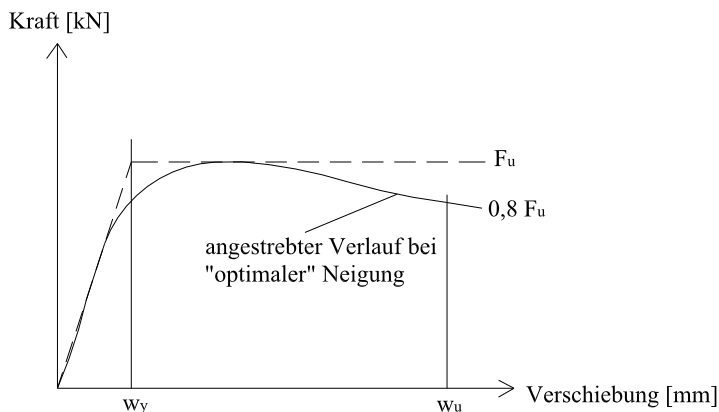


Abbildung 4: "Optimale" Schraubenneigung für eine duktile Verbindung nach [34]

Das Verhältnis  $w_u$  zu  $w_y$  in Abbildung 4 gibt das Duktilitätsmaß an. Die strichlierte Linie bildet einen idealisierten Verlauf ab. An dieser Stelle sollte nicht unerwähnt bleiben, dass die in Abbildung 4 gezeigte Arbeitslinie nur beim Versagensmodus „Herausziehen“ erreichbar ist (vgl. Bericht H. Krenn [11]), womit – verglichen mit dem für Vollgewindeschrauben vorherrschenden „Stahlbruch“ – eine Reduktion der Gesamttragfähigkeit der Verbindung einhergeht.

## 1-2.2 WIRKPRINZIP

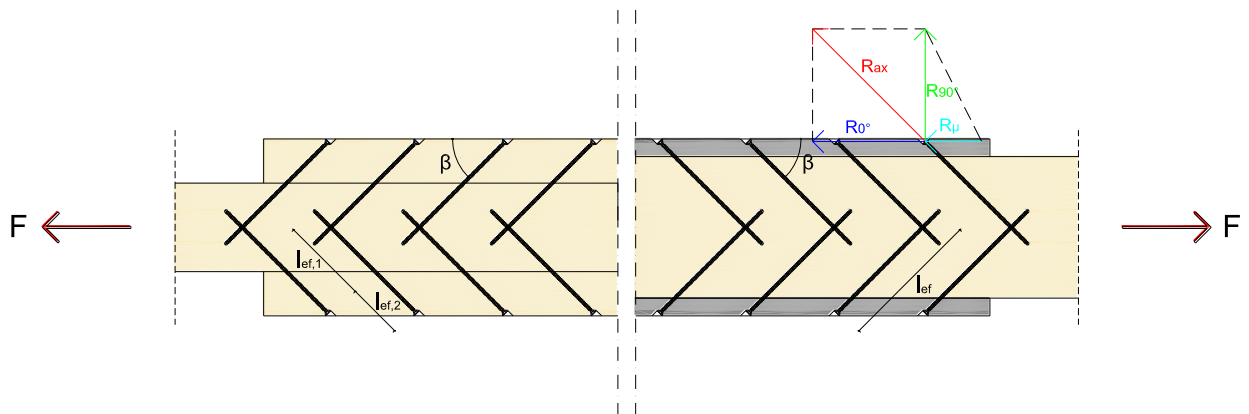


Abbildung 5: Schrägschraubverbindungen mit Kräfteckdreieck nach [13]

Bei dieser geneigten Anordnung werden selbstbohrende Vollgewindeschrauben in Beanspruchungsrichtung schräg zur Richtung der Faser eingedreht. Durch eine parallele Anordnung der Schrägverschraubung (hintereinander in Faserrichtung) in der Verbindung übernimmt die Schraube die Zugkräfte und erzeugt dadurch eine Druckkraft normal zur Fuge, welche als Haftkraft günstig auf die Verbindung einwirkt. Voraussetzung dafür ist eine spaltfreie Anordnung der zu verbindenden Bauteile. Kräfte, welche in Richtung der Fuge wirken, können mit dieser Verbindungsart hervorragend übertragen werden. Die Schraube wird zeitgleich auf Abscheren und Herausziehen beansprucht. Ein kleinerer Winkel zwischen Richtung der Kraft und Richtung der Schraube reduziert die Komponente auf Abscheren und erhöht die Komponente auf Herausziehen. Um die hohe Ausziehtragfähigkeit der Schrauben zu nutzen, ist es sinnvoll, einen möglichst geringen Winkel zwischen Kraft und Schraubenachse zu erreichen, wodurch der geringe Anteil der Abscherkomponente bei dieser Schraubenanordnung vernachlässigbar ist. Optimale Werte für  $\beta$  liegen gemäß [14] zwischen 30 Grad und 60 Grad. Abbildung 5 zeigt eine Schraubverbindung mit geneigter Schraubenanordnung und das Kräfteckdreieck mit Zerlegung der äußeren Kräfte nach dem Fachwerkprinzip. Das Kräfteckdreieck zerlegt den Anteil der Kraft in Schraubenachse in eine Kraft in Faserrichtung des Holzbauteiles und in eine Kraft normal dazu.

Die einzuhaltenen Mindestabstände bei Verbindungen mit unter einem Winkel zur Faser eingeschraubten Verbindungsmitteln werden in Abbildung 6 dargestellt. Die Mindestabstände laut Norm und Zulassungen sind in Kapitel 1-1 angeführt.

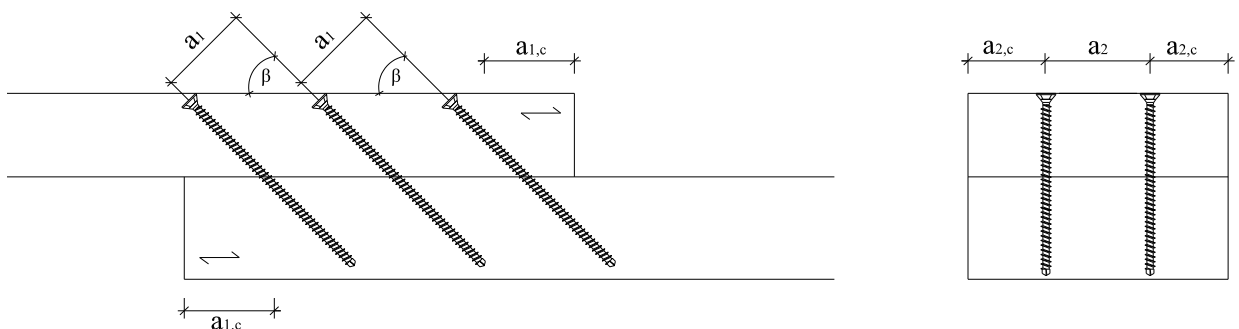
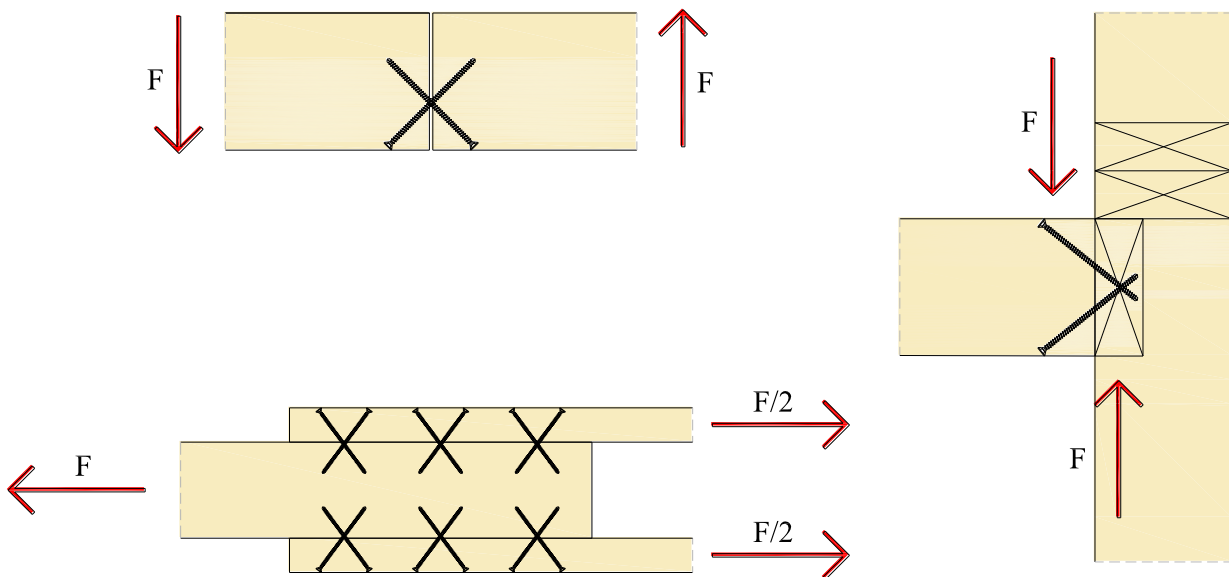


Abbildung 6: Mindestabstände für Schrägschraubverbindungen

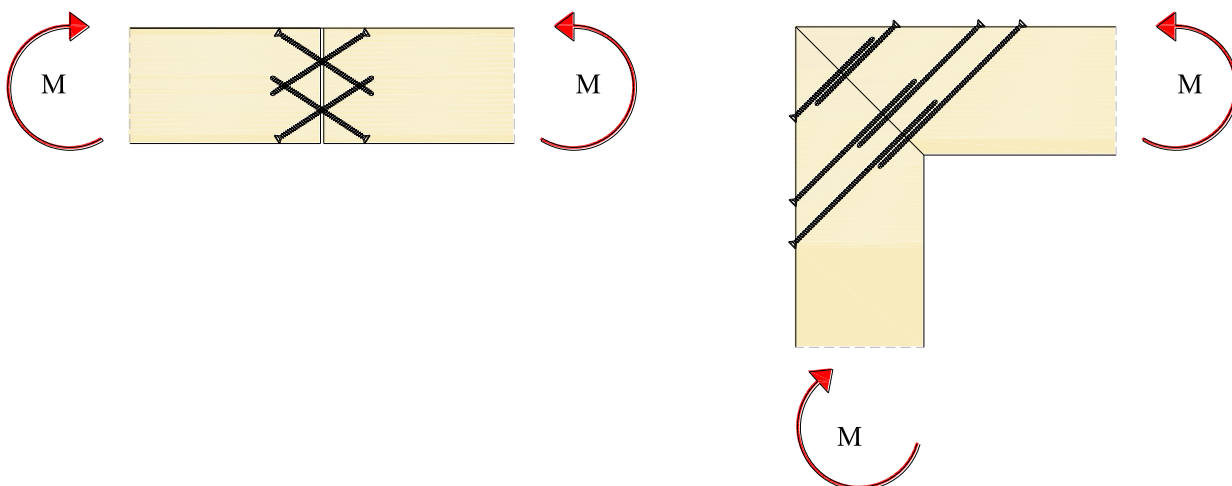
**Anwendungsmöglichkeiten von Schrägverschraubungen:**

Einige der bereits genannten Einsatzmöglichkeiten benötigen im Falle von zu übertragenden Druck- und Zugkräften den Einsatz einer gekreuzten Schraubenanordnung. Gekreuzt angeordnete Schrägschraubverbindungen erzeugen keine Druckkraft in der Fuge, wodurch der günstig wirkende Haftwiderstand nicht auftritt. Die Beanspruchungen der Schrauben sind Herausziehen und Hineindrücken und ermöglichen dadurch eine Tragfähigkeitssteigerung der Verbindung gegenüber der Schräganordnung mit Zugschrauben. Die Aufteilung der Druck- und Zugkräfte erfolgt pro Schraube. Ein Verbindungsmittel erfährt Druckbeanspruchung, das andere gekreuzte Verbindungsmittel bekommt Zug. Abbildung 7 zeigt verschiedene Möglichkeiten von Verbindungen mit gekreuzt angeordneten Schrauben.



**Abbildung 7: Verschiedene Möglichkeiten von Verbindungen mit gekreuzt angeordneten Schrauben nach [27]**  
links oben: Querkraftanschluss; links unten: Übertragung von Kräften parallel zur Fuge;  
rechts: Deckenbalkenanschluss

Biegesteife Verbindungen können mit Schrägschraubverbindungen ebenfalls hergestellt werden. Die Anwendungsmöglichkeiten reichen von biegesteifen Rahmenecken bis zu biegesteifen Balkenstößen. Biegung erzeugt in den Schrauben fast ausschließlich eine axiale Beanspruchung. Das Holz und jene Verbindungsmittel welche auf Hineindrücken beansprucht sind, übernehmen die Druckkräfte.



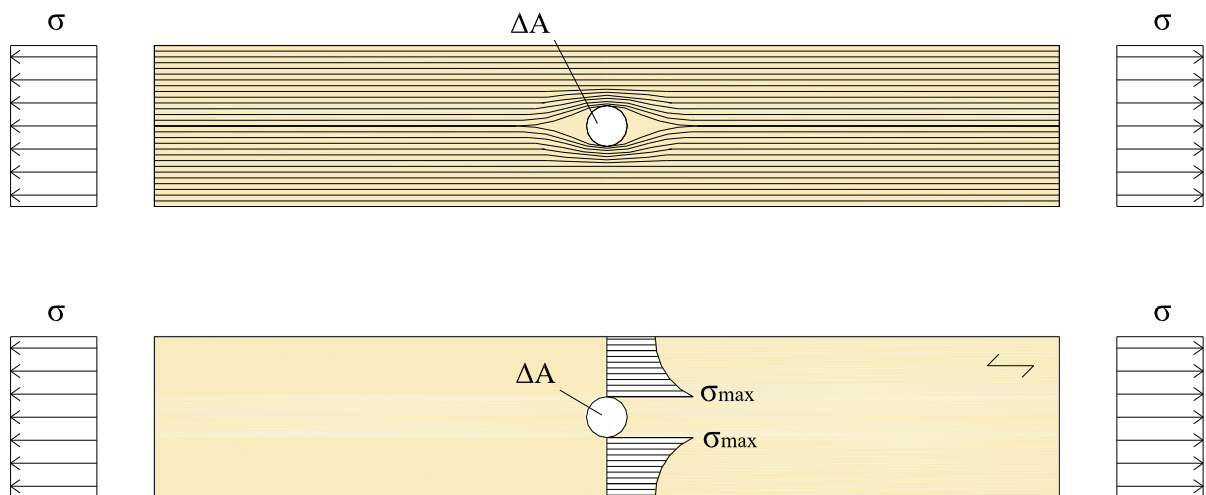
**Abbildung 8: Biegesteife Verbindungen nach [27];**  
links: Momentenanschluss Decke; rechts: Momentenanschluss Ecke

# KAPITEL 2: NETTO- QUERSCHNITTSFLÄCHEN

## 2-1 ALLGEMEINES

[28]

In einem querschnittsgeschwächten, auf Zug beanspruchten Bauteil, werden die Spannungstrajektorien um die Querschnittsschwächung herum geführt. Der Nettoquerschnitt muss in diesem Bauteilabschnitt die gesamte Spannung aufnehmen.



**Abbildung 9:** Spannungen im geschwächten Bauteil nach [28]; oben: Verlauf der Spannungstrajektorien; unten: Verlauf der Spannungen am Nettoquerschnitt

Formel (2.1) zeigt das Nachweisformat für den Nettoquerschnittsnachweis und ist das Verhältnis von Kraft zu Nettoquerschnittsfläche, welches kleiner eins sein muss, um als erfüllt zu gelten.

$$\frac{F_d}{A_{netto}} \leq 1,0 \quad (2.1)$$

$F_d$  Bemessungswert der einwirkenden Kraft [N]

$A_{netto}$  Nettoquerschnittsfläche [mm<sup>2</sup>]

## 2-2 NETTOQUERSCHNITTSFLÄCHEN AUS VERBINDUNGSMITTELN

[1], [12], [13], [15], [28], [29]

Die folgenden Unterkapitel erläutern die unterschiedlichen Sichtweisen von Normen und Bemessungshandbüchern zur Berücksichtigung von Fehlflächen im Querschnitt mit speziellem Hinblick auf den zu betrachtenden Anwendungsfall der Stahl-Holz-Schrägverschraubung.

### 2-2.1 NORMUNG

Laut ÖNORM EN 1995-1-1 [1] dürfen Querschnittsschwächungen bei Tragfähigkeitsnachweisen von Bauteilen vernachlässigt werden, wenn diese durch Nägel und Holzschrauben, ohne Vorbohren, mit einem Maximaldurchmesser von sechs Millimeter verursacht werden. Weiters ist festgelegt, dass Querschnittsschwächungen in druckbeanspruchten Bauteilen nur zu berücksichtigen sind, wenn der ausgefüllte Baustoff eine geringere Steifigkeit als die Holzsteifigkeit besitzt.

In Bauteilabschnitten mit mehreren Verbindungsmitteln wird der wirksame Querschnitt bestimmt, indem alle Querschnittsschwächungen erfasst werden, welche sich näher als die Hälfte des Mindestabstandes in Richtung der Holzfaser befinden.

### 2-2.2 BEMESSUNGSHANDBÜCHER

Laut Colling [28] erfolgt der Zugnachweis mit dem Nettoquerschnitt nach Formel (2.2). Als Nettoquerschnitt ist der Bruttoquerschnitt mit Abzug der Querschnittsschwächungen definiert.

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{F_{t,0,d}}{A_{netto}} \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (2.2)$$

$\sigma_{t,0,d}$	Bemessungswert der Zugspannung in Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_{t,0,d}$	Bemessungswert der Zugkraft [N]
$A_{netto}$	Nettoquerschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]

Der Drucknachweis wird mit dem Nettoquerschnitt nach Formel (2.3) geführt, falls die Ausnehmung nicht gefüllt ist.

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{F_{c,0,d}}{A_{netto}} \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (2.3)$$

$\sigma_{c,0,d}$	Bemessungswert der Druckspannung in Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_{c,0,d}$	Bemessungswert der Druckkraft [N]
$A_{netto}$	Nettoquerschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]

Ist die Ausnehmung jedoch mit einem festeren oder gleichwertigen Material gefüllt, wird der Nachweis mit dem Bruttoquerschnitt mit Formel (2.4) geführt.

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{F_{c,0,d}}{A_{brutto}} \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (2.4)$$

$\sigma_{c,0,d}$	Bemessungswert der Druckspannung in Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_{c,0,d}$	Bemessungswert der Druckkraft [N]
$A_{brutto}$	Bruttoquerschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]



Bei nicht vorgebohrten Nagelverbindungen mit einem Verbindungsmitteldurchmesser kleiner sechs Millimeter, werden keine Querschnittsschwächungen abgezogen.

Die gesamte Querschnittsschwächung wird errechnet, indem ein Schnitt durch die Verbindung gelegt wird und alle Schwächungen, welche in diesem auftreten, abgezogen werden. In Richtung der Faser werden nachfolgende Verbindungsmittel Hohlräume nicht abgezogen. Sind mehrere Reihen von Verbindungsmitteln in der Verbindung vorhanden, werden alle Schwächungen abgezogen, welche in einem geringeren Abstand als der halbe Mindestabstand in Richtung der Faser liegen. Ist bei Verbindungsmitteln kein Mindestabstand festgelegt, wird dieser Bereich mit 150 Millimeter festgelegt. Colling weicht mit seinen Festlegungen somit nur geringfügig von der Norm ab.

Laut Schneider [29] sind Schwächungen des Querschnittes vom Bruttoquerschnitt abzuziehen mit einigen Ausnahmen. Diese Ausnahmen sind Nagellöcher ohne Vorbohrung mit einem Durchmesser kleiner oder gleich sechs Millimeter, symmetrische Anordnung von Verbindungsmittellöchern in druckbeanspruchten Stäben oder wenn in den druckbeanspruchten Bauteilen das Ausfüllmaterial eines Loches einen geringeren E-Modul aufweist als das E-Modul des Holzes. Der wirksame Querschnitt wird errechnet, indem alle Querschnittsschwächungen vom Bruttoquerschnitt abgezogen werden, welche sich in der Hälfte des Mindestabstandes in Holzlängsrichtung, vom wirksamen Querschnitt weg, befinden. Auch die Festlegungen nach Schneider [29] sind der Norm EN 1995-1-1 [1] nachempfunden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in sämtlicher Literatur die Festlegungen von EN 1995-1-1 [1] übernommen wurden.

Die bisherige Ermittlung der Nettoquerschnittsfläche von Schrägschraubverbindungen erfolgt daher nach Formel (2.5). Grafisch ist diese Querschnittsschwächung in Abbildung 10, Mitte unten rechts, dargestellt.

$$A_{\text{netto,alt}} = A_{\text{brutto}} - k \cdot A_Q = b \cdot h - k \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4 \cdot \sin \beta} \quad (2.5)$$

$A_{\text{netto,alt}}$	Nettoquerschnittsfläche nach bisheriger Handhabung [mm <sup>2</sup> ]
$A_{\text{brutto}}$	Bruttoquerschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
$k$	Anzahl der im Schnitt erfassten Schrauben [-]
$A_Q$	Nennquerschnittsfläche der Schrauben [mm <sup>2</sup> ]
$b$	Breite des Bauteils [mm]
$h$	Höhe des Bauteils [mm]
$d$	Schraubendurchmesser [mm]
$\beta$	Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung [°]

## 2-2.3 FORSCHUNG

Blaß und Enders-Comberg untersuchten in [12] die Problematik der Nettoquerschnittsflächen in druck- und zugbeanspruchten Bauteilen aus Brettschichtholz. Die Auswertung der Druckversuche zeigt eine deutliche Minderung (79% der mittleren, maximalen Druckspannungen verglichen mit dem ungeschwächten Bauteil) der Tragfähigkeit durch die Schwächung des Querschnittes. Dies verdeutlicht, dass die Querschnittsflächenvernachlässigung von Löchern, die mit einem Material gleicher oder größerer Steifigkeit ausgefüllt sind, laut Norm in druckbeanspruchten Bauteilen nicht der Wirklichkeit entspricht. Die Schwächung des Querschnittes verursacht eine Abnahme der Steifigkeit im Bauteil. Auch in numerischen Simulationen zeigten sich Spannungsspitzen im Bereich der Verbindungsmittel, was sich mit den Bruchbildern der Druckversuche deckt. Ein Abzug der Querschnittsschwächung und Betrachtung der Druckspannungen im Nettoquerschnitt ist somit auch in druckbeanspruchten Bauteilen unumgänglich, im Besonderen für die Nutzungsklassen 1 und 2. Einzig eingeklebte Verbindungsmittel reduzieren die Tragfähigkeit der Verbindung nicht. Es wird weiters auf eine laut Norm sehr konservative Annahme der

Nettodruckfestigkeit hingewiesen. In den Versuchen zeigte sich eine höhere Druckspannung parallel zur Faser in ungeschwächten Holzteilen als laut Norm beschrieben.

Bei Bauteilen, welche auf Zug beansprucht sind, ist laut Norm ein Nachweis der Spannungen im Nettoquerschnitt zu führen, unabhängig vom E-Modul der Fehlflächen. Die Zugversuche von [9] ergaben jedoch eine Steigerung der Tragfähigkeit um 11 bzw. 21 Prozent des Nettoquerschnittes bezogen auf den ungeschwächten Querschnitt. Auf einen Einfluss des Längeneffektes bei dieser Tragfähigkeitssteigerung und eine dadurch mögliche wirtschaftlichere Bemessung wird hingewiesen.

## 2-2.4 Nettoquerschnittsflächen bei Schrägschraubverbindungen

Nettoquerschnittsflächen von Schrägschraubverbindungen wurden bisher mit Schwächungen nach Abbildung 10, Mitte unten rechts, berechnet. Dass dieser Flächenansatz nicht dem vollen Versagensbild entspricht, konnte in Versuchen von [13] verdeutlicht werden. In Versuchen, die explizit auf Nettoquerschnittsversagen ausgelegt wurden, sind die Bruchflächen exakt entlang der schrägen Flucht der Schraube aufgetreten, da die Schrauben die Holzfasern genau in diesem Bereich durchtrennten. Abbildung 10, links unten, zeigt einen ersten Vorschlag nach [13], zur Berücksichtigung von Fehlflächen in zugbeanspruchten Schrägschraubverbindungen.

$$A_{netto,neu_1} = A_{brutto} - 2 \cdot m \cdot A_S = b \cdot h - 2 \cdot m \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \sin \beta \quad (2.6)$$

$A_{netto,neu_1}$	Nettoquerschnittsfläche nach [13] [mm <sup>2</sup> ]
$A_{brutto}$	Bruttoquerschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
$m$	Anzahl der Schraubenreihen je Lasche [-]
$A_S$	in Schnittebene projizierte Außenfläche der Schrauben [mm <sup>2</sup> ]
$b$	Breite des Bauteils [mm]
$h$	Höhe des Bauteils [mm]
$d$	Schraubendurchmesser [mm]
$l_{ef}$	Eindringtiefe des Gewindeteils [mm]
$\beta$	Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung [°]

Formel (2.6) beschreibt diese Querschnittsschwächung und ist eine mathematische Darstellung der in Abbildung 10, links unten, grafisch abgebildeten Fehlflächen. Voraussetzung ist hierbei eine gleiche Anzahl der Schrauben je Lasche.

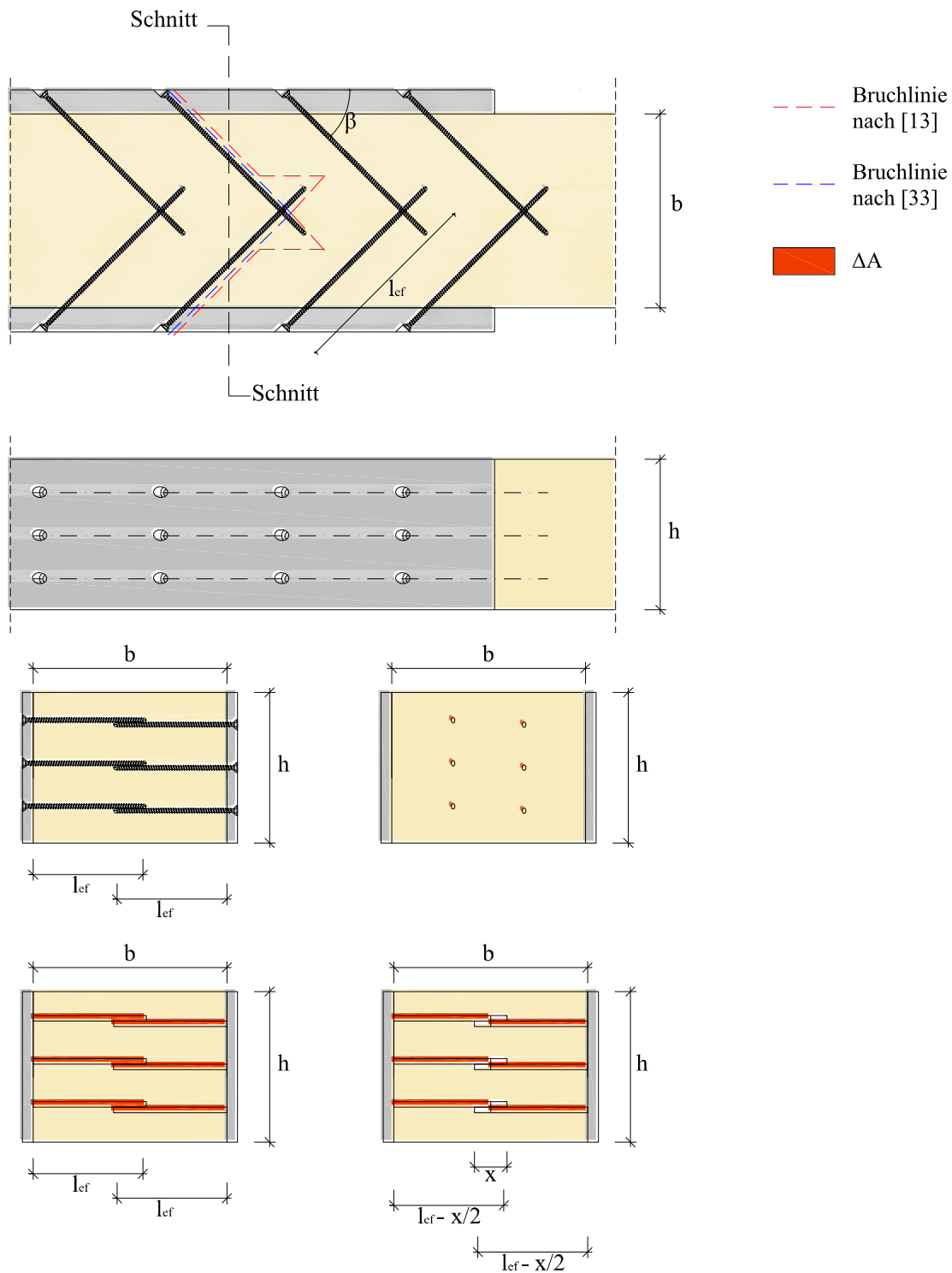
Das Arbeitsblatt der Firma Wiehag [33] basiert auf dem Versuchsergebnissen von [13] und ist eine Modifikation dieses Vorschlages der TU Graz. [33] berücksichtigt die Querschnittsschwächung durch Schrägverschraubung folgendermaßen:

$$A_{netto,neu_2} = b \cdot h - n \cdot d_h \cdot b \quad (2.7)$$

$A_{netto,neu_2}$	Nettoquerschnittsfläche nach [33] [mm <sup>2</sup> ]
$A_{brutto}$	Bruttoquerschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
$b$	Breite des Bauteils [mm]
$n$	Anzahl von Schrauben im kritischen Querschnitt [-]
$d_h$	Schraubenkerndurchmesser [mm]

Der Unterschied zum erstgenannten Vorschlag liegt wie in Abbildung 10, unten, ersichtlich, nur im Abzug der sich überschneidenden Schraubenenden gemäß [13]. Die Betrachtungsweise nach [33] geht davon aus, dass die sich überkreuzenden Teile der Schrauben nur einmal vom Querschnitt abgezogen werden, während im Vorschlag der TU Graz die gesamte Länge je Schraube abgezogen wird.

Abbildung 10 oben, zeigt eine Stahl-Holz-Verbindung mit außenliegenden Stahlblechen und Schrägverschraubung. Die möglichen Risslinien, in rot und blau strichliert, der beiden unterschiedlichen Nettoquerschnittsflächenberechnungen sind eingezeichnet.



**Abbildung 10: Verschiedene Varianten der Nettoquerschnittsflächenberechnung;**  
**oben: Grundriss der Schrägschraubverbindung;**  
**Mitte oben: Ansicht der Schrägschraubverbindung;**  
**untere vier Abbildungen: Schnitt durch die Schrägschraubverbindung;**  
**Mitte unten rechts: Fehlflächen nach bisheriger Form der Berücksichtigung;**  
**unten links: Fehlflächen nach [13];**  
**unten rechts: Fehlflächen nach [33]**

## 2-3 EINFLUSS VON ÄSTEN AUF NETTOQUERSCHNITTSVERSAGEN

[31]

Die Berücksichtigung der Fehlflächen im Nachweisformat des Nettoquerschnittes lassen Parallelen zum Prinzip der Sortierung nach Faktoren der Astigkeit zu. Um etwaige vorhandene Analogien darzustellen wird im folgenden Unterabschnitt auf den Einfluss von Ästen im Holzmaterial eingegangen.

Die stark streuenden Eigenschaften von Bauholz bei Zugbeanspruchung sind, neben der Abweichung der Faserrichtung von der Holzorientierung, vor allem auf die Astigkeit des Materials zurückzuführen. Der Anteil der Astflächen einer Querschnittsfläche beeinflusst somit auch das Nettoquerschnittsversagen in der Hinsicht, dass in Bereichen mit großen Astschwächungen die abzuziehenden Schraubenflächen zusätzlich eine Schwächung verursachen. Der Bruch tritt somit an der Stelle der größten Gesamtschwächung auf.

Um den Einfluss der Äste beschreiben zu können, sind verschiedene Astparameter und -maße bekannt. Der DEK-Wert etwa ist ein Einzellastkriterium bei Kanthölzern und Brettern und ist das maximale Verhältnis von Astdurchmesser zu Querschnittsbreite beziehungsweise Querschnittshöhe. Bei der Berechnung des DEB-Wertes werden alle Abmessungen des Astes aufsummiert und durch die zweifache Breite des Holzes dividiert. Der DAB-Wert berücksichtigt Astansammlungen, indem alle Abmessungen der Äste aufsummiert und durch die zweifache Breite des Holzes dividiert werden. Der TAR-Wert (tensile knot area section) berücksichtigt den Einfluss der Äste am Rand. Es werden nur die Projektionen der Randäste in den außenliegenden Querschnittsvierteln berücksichtigt. Die Astdichte ist ein Verhältniswert zwischen den Astflächen an einer Holzoberfläche zur Oberfläche des Brettes. Bei der Berechnung des Astflächenverhältnisses sind jedoch Parallelen zum Nettoquerschnittsnachweis zu erkennen. In beiden Nachweisformaten wird ein Verhältnis von Brutto zu Netto berechnet. Der KAR-Wert (knot area ratio) ist das Verhältnis von Astfläche zu Bruttoquerschnitt abzüglich der sich überschneidenden Astflächen. Die zu betrachtende Länge ist auf 150 Millimeter festgelegt. Der sich daraus ergebende Kennwert beschreibt den Nettoquerschnitt unter Berücksichtigung der Astflächen und ist in Abbildung 11 dargestellt.

$$KAR = \frac{A_{\text{Aste}}}{A_{\text{Brett}}} - \Delta A \quad (2.8)$$

$A_{\text{Aste}}$	Querschnittsfläche der Äste [mm <sup>2</sup> ]
$A_{\text{Brett}}$	Querschnittsfläche des Brettes [mm <sup>2</sup> ]
$\Delta A$	überschneidende Astflächen [mm <sup>2</sup> ]

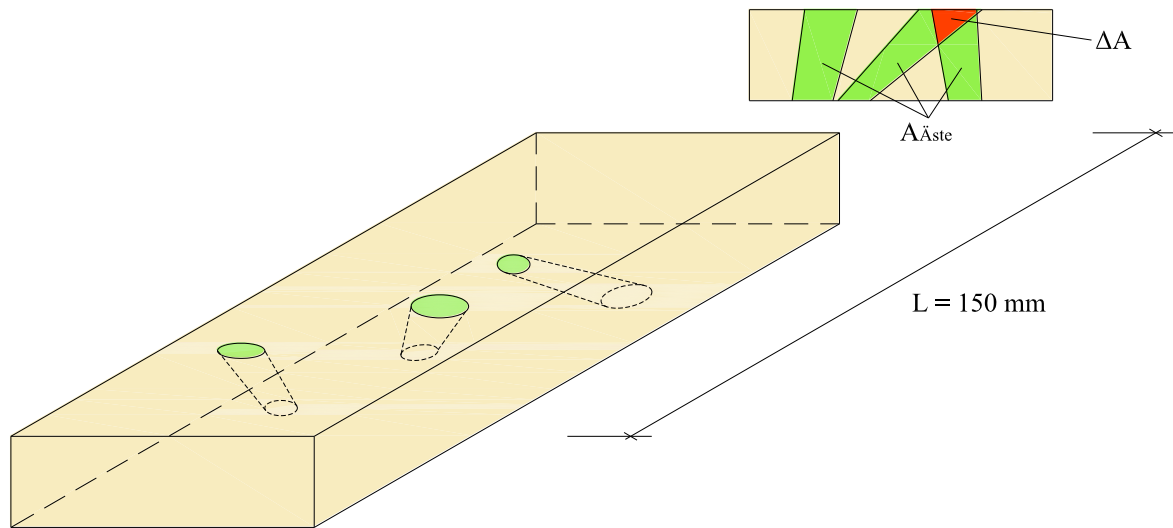


Abbildung 11: KAR-Wert; Modell Holzteilstück, projizierte Flächen der Äste nach [31]

Ob die Nettoquerschnittstragfähigkeit im “clear wood” oder in Bauteilen mit gestörten Bereichen ermittelt wird, ist somit zu unterscheiden.

Da die Astigkeit des Holzmaterials ein Thema der Sortierung ist und dadurch bereits in den Bruttofestigkeiten der unterschiedlichen Festigkeitsklassen einfließt, ist eine Berücksichtigung beim Nettoquerschnittsnachweis mit Schrauben nicht erforderlich.

Es ist jedoch zu erwarten, dass ein Versagen im Nettoquerschnitt an jener Stelle auftritt, an der die größte Gesamtquerschnittsschwächung vorhanden ist. Da die Äste den Querschnitt nicht nur mit ihren Fehlflächen, sondern auch durch die Schrägfasern um sie herum schwächen, ist ein Nettoquerschnittsversagen im Bereich der Äste sehr wahrscheinlich. Ob diese Annahme in den Versuchen bestätigt wird, ist in Kapitel 6 erläutert.

## KAPITEL 3: OFFENE FRAGESTELLUNGEN UND PRÜFKONZEPT

In den ersten Kapiteln wurden die Grundlagen von Stahl-Holz-Verbindungen mit Schrägverschraubung erörtert. Die Literaturrecherche ergab, dass der Versagensfall „Nettoquerschnitt“ zwar normativ geregelt ist, aber noch unzureichend genau erforscht ist, um das reale Bruchverhalten zu berücksichtigen. Es wurden einige Vorschläge zur genaueren Berücksichtigung der Nettoquerschnittsflächen vorgestellt. Ziel der experimentellen Untersuchungen ist somit, das ideale Nachweisformat zu eruieren. Daraus ergeben sich folgende Fragestellungen:

Welches Nachweisformat berücksichtigt den Nettoquerschnitt-Versagensfall am genauesten?

Welche typischen Versagensfälle treten bei Stahl-Holz-Verbindungen mit Schrägschrauben grundsätzlich auf?

Wie geht der Faktor Astigkeit auf den Versagensfall ein?

In den folgenden Kapiteln wird versucht, die gestellten Fragen zu beantworten. In Kapitel 4 wird auf die Materialparameter, die für die Versuche verwendeten Materialien, näher eingegangen. Kapitel 5 befasst sich mit dem Prüfkonzep und den Versuchskonfigurationen. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen ausgewertet, zusammengefasst und analysiert. Zum Abschluss wird ein Resümee verfasst und ein Ausblick in die weitere Vorgehensweise gegeben.

Das Prüfkonzert der durchgeführten Versuche ist im nachfolgend dargestellten Ablaufdiagramm dargestellt.

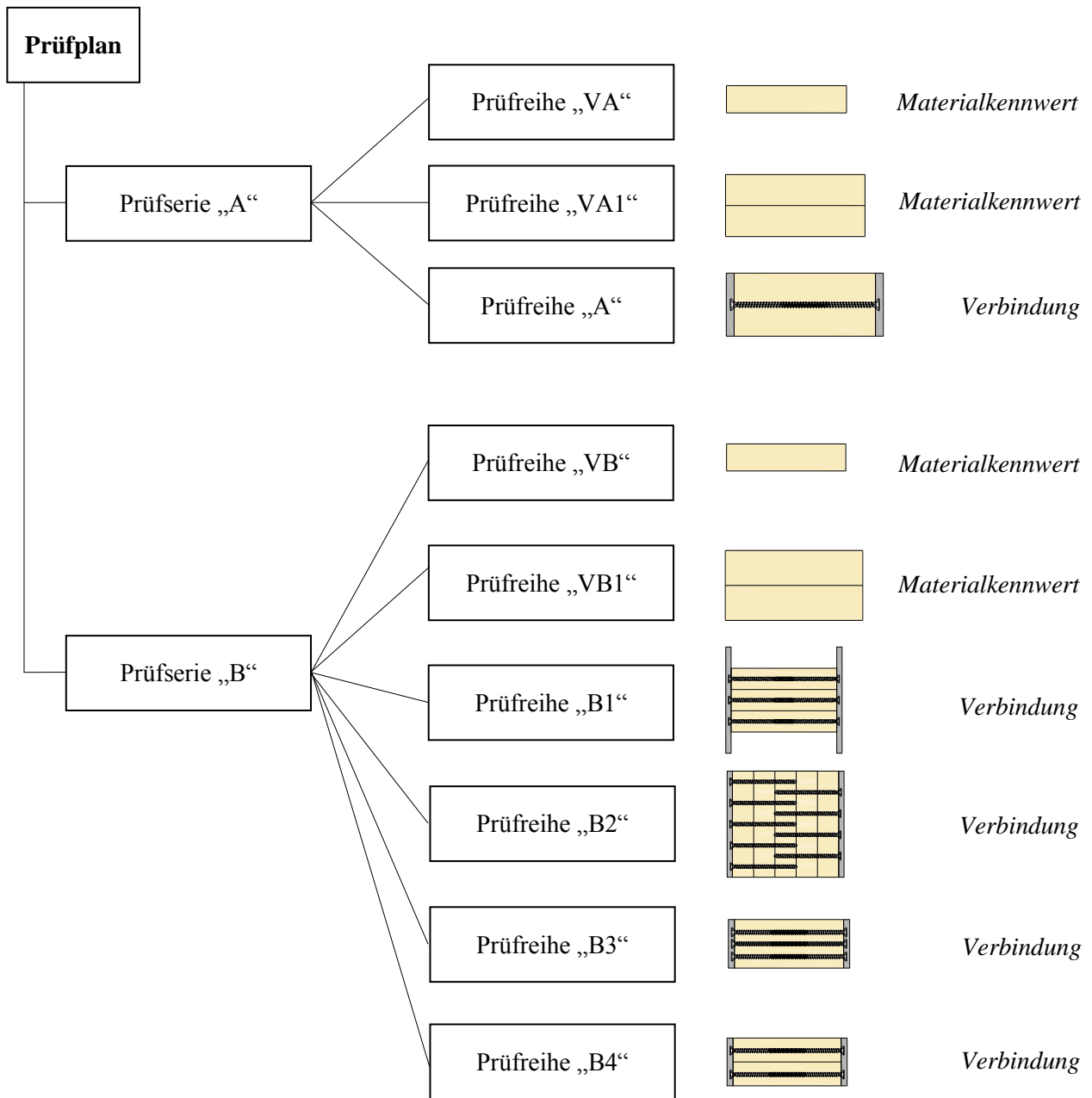


Abbildung 12: Prüfplan; Übersicht über das Versuchsprogramm



## KAPITEL 4: MATERIAL

### 4-1 HOLZ

[8], [25], [32]

#### 4-1.1 PROBEKÖRPERHERSTELLUNG



Abbildung 13: Probekörperherstellung; links: Gerät zum Auftrag des Klebers; rechts: hydraulische Presse

Die Probekörper für Versuchsreihe A werden aus Einzelbrettern der Holzart Fichte (*Picea Abies*) aus dem Bestand des Institutes für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz gefertigt. Die 40 Einzelbretter weisen die Abmessungen 4000 x 225 x 45 Millimeter auf. Die Probekörperherstellung erfolgte in der Holzwerkstätte der TU Graz. Die Brettlamellen wurden in zwei Teile zu 1800 und 2200 Millimeter abgelängt und auf eine Höhe von 30 Millimeter gehobelt, um die gewählten Abmessungen der Probekörper, laut Vorbemessung, zu ermöglichen. Die Probekörperbezeichnung erfolgte nach folgendem Prinzip:

Die fortlaufende Nummer ist am Anfang aufgeführt und wird durch einen Unterstrich von der Brettlänge unterteilt. Die Bretter mit einer Länge von 2200 Millimeter werden für die Probekörperherstellung der Zugversuche ohne Verbindungsmittel verwendet. Die größere Länge der Bretter ist durch den minimalen Klemmbackenabstand der Prüfmaschine lignum\_z\_850 begründet. Jene Bretter mit einer Länge von 1800 Millimeter sind für Probekörper der Versuche mit Schrauben vorgesehen.

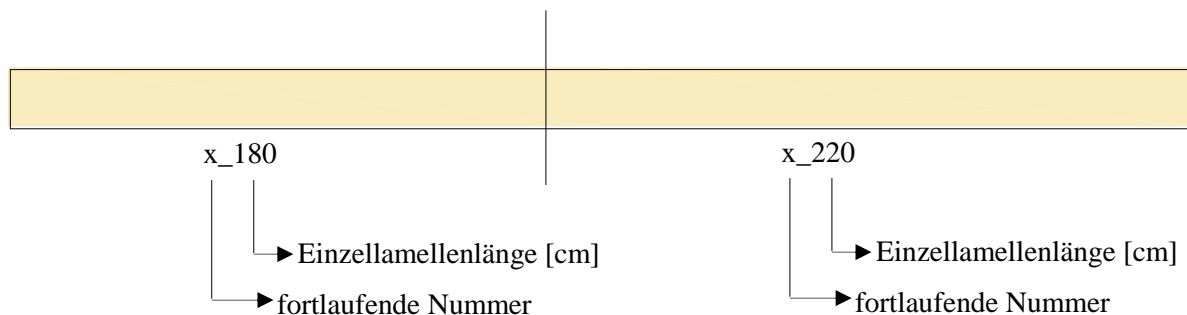


Abbildung 14: Einzellamellenbezeichnung, Prüfserie A

Um Duo-Brettschichtholzträger herzustellen, erfolgte anschließend eine Verklebung der Bretter mittels PU-Kleber. Im Anschluss wurden die verklebten Brettschichtholzträger in einer hydraulischen Presse mit einem Pressdruck von  $0,6 \text{ N/mm}^2$  ungefähr acht Stunden gepresst. Die Bezeichnungen der fertiggestellten Prüfkörper sind im Kapitel 5-2 beschrieben.

Die Probekörper für Prüfserie „B“ werden aus von der Firma Wiehag gelieferten Einzelbrettern gefertigt. Die 100 Einzelbretter haben die Abmessungen  $4000 \times 225 \times 45$  Millimeter sind gemäß Bestellung der Sortierklasse L25 zuzuordnen. Die Probekörperherstellung erfolgte in der Holzwerkstätte der TU Graz. Die Brettlamellen wurden auf eine Höhe von 40 Millimeter gehobelt und in zwei Teile zu 1800 und 2200 Millimeter beziehungsweise in der Mitte auf 2000 und 2000 Millimeter abgelängt.

Die fortlaufende Nummer ist am Anfang aufgeführt und wird durch einen Unterstrich von der Brettlänge unterteilt. Die Bretter mit einer Länge von 2200 Millimeter werden für die Probekörperherstellung der Zugversuche ohne Verbindungsmittel verwendet, während die Bretter mit einer Länge von 1800 und 2000 Millimeter für Probekörper der Versuche mit Schrauben vorgesehen sind. Die Länge von 2200 Millimeter ist, wie bereits bei Prüfserie A erwähnt, begründet durch den minimalen Klemmbackenabstand der Prüfmaschine. Die Halbierung der Bretter in zwei gleich lange Teile dient zur einfacheren Herstellung der ein Meter langen Prüfkörper der Prüfreihe „B1“ und „B2“.

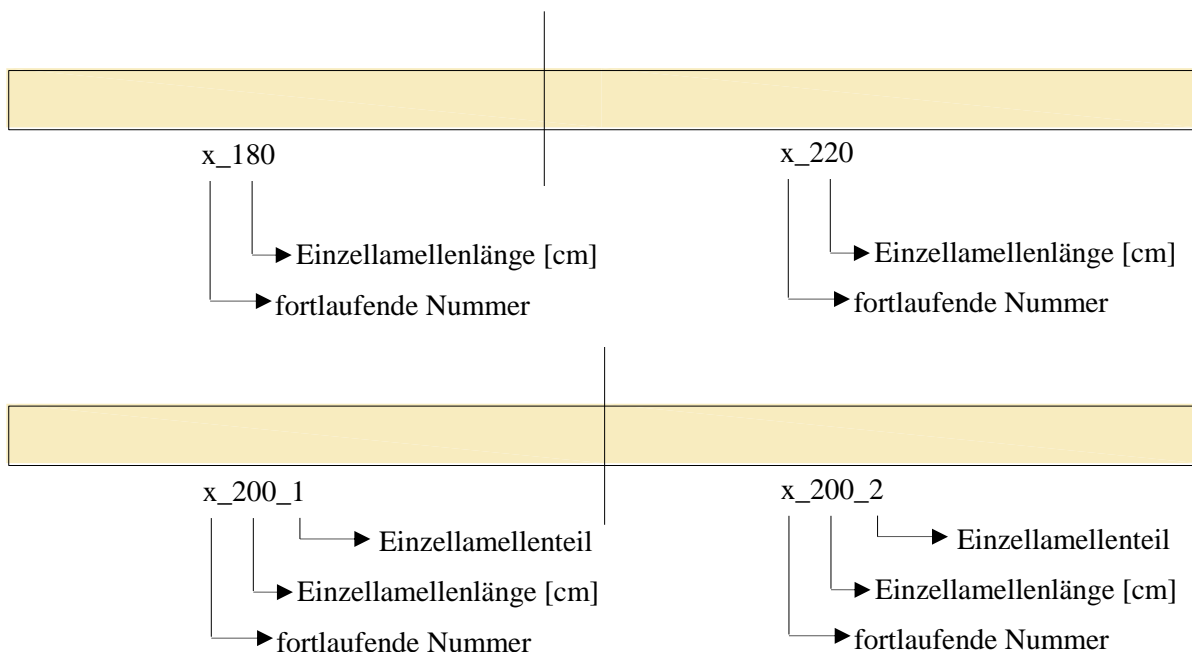


Abbildung 15: Einzellamellenbezeichnung, Prüfserie B

Um Duo- und Trio-Brettschichtholzträger herzustellen, erfolgte anschließend eine Verklebung der Bretter mittels PU-Kleber. Im Anschluss wurden die verklebten Brettschichtholzträger in einer hydraulischen Presse mit einem Pressdruck von  $0,6 \text{ N/mm}^2$  ungefähr acht Stunden gepresst.

#### 4-1.1.1 Lagerung

Die Probekörper werden vor und nach den Messungen in einer Klimakammer bei einer Temperatur von 20 Grad Celsius und 65 Prozent relativer Luftfeuchte gelagert, um eine gleichbleibende Holzfeuchte zu gewährleisten.

### 4-1.1.2 Messungen an Probekörpern

Die folgenden Parameter wurden an den Einzellamellen und am Duo- beziehungsweise Trioträger ermittelt. Mittels Maßband und digitaler Schiebelehre wurden die Längen, Dicken und Breiten gemessen. Die Masse wurde mit einer digitalen Waage bestimmt. Die Hirnholzer wurden fotografiert, um die Jahresringlage zu erfassen. Anhand dieser aufgenommenen Werte erfolgte die Bestimmung der Rohdichte für die einzelnen Probekörper. Mit einem Ultraschallmessgerät wurden Laufzeitmessungen vorgenommen, um den dynamischen E-Modul zu bestimmen.

Diese Messungen erfolgten zuerst vor der Verklebung an den Einzellamellen und danach an den Duo- und Trio-Brettschichtholzträgern.



Abbildung 16: Messungen an Probekörpern; links: Schiebelehre und Maßband; rechts: Waage

### Holzfeuchtebestimmung

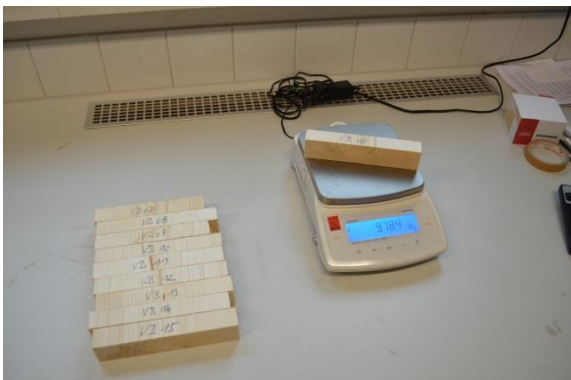


Abbildung 17: Holzfeuchtebestimmung; links: Waage; rechts: Darrschrank

Mittels Darrmethode (thermische Trocknung) wurde die Holzfeuchte in den Prüfkörpern nach EN 13183 [8] bestimmt. Nach jeder Prüfung wurde nahe der Bruchstelle eine Darrprobe entnommen. Diese wurde im Darrschrank bei 100 Grad Celsius ( $\pm 2$  Grad Celsius) bis zur Konstanz des Holzgewichtes gelagert.

Die Holzfeuchte  $u$  errechnet sich aus dem Verhältnis von Masse des in der ursprünglichen Probe enthaltenen Wassers, zu Wassermasse des in der darrgetrockneten Probe enthaltenen Wassers.

$$u = \frac{m_w}{m_0} = \frac{m_u - m_0}{m_0} \quad (4.1)$$

- $u$  Holzfeuchte [%]
- $m_w$  Wassermenge [g]
- $m_u$  Probenmasse unter Versuchsbedingungen [g]
- $m_0$  Masse Holz darrtrocken [g]

### Rohdichte-Bestimmung

Die Berechnung der Rohdichte erfolgt nach Formel (4.2) mit Hilfe der mittels Rollmeter, Schiebelehre und Waage ermittelten Volumenabmessungen und Massen der Prüfkörper. Sie errechnet sich aus dem Quotient von Masse zu Volumen.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{b \cdot h \cdot l} \quad (4.2)$$

$\rho$	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$m$	Masse des Probekörpers [kg]
$V$	Volumen des Probekörpers [m <sup>3</sup> ]
$b$	Breite des Probekörpers [m]
$h$	Höhe des Probekörpers [m]
$l$	Länge des Probekörpers [m]

Mit Formel (4.3) wird die Rohdichte auf eine Holzfeuchte von 12% normiert.

$$\rho_{12} = \rho * [1 - (u - 0,12) \cdot 0,5] \quad (4.3)$$

$\rho_{12}$	Rohdichte normiert auf 12 Prozent Holzfeuchte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho$	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$u$	Holzfeuchte [%]

### Dynamische E-Modul-Bestimmung mittels Ultraschall

Mit Hilfe eines Ultraschallmessgerätes wird die Laufzeit des Ultraschalles durch die Probekörper bestimmt. Unter Zuhilfenahme von Formel (4.4) kann mit der Länge des Prüfkörpers und der Laufzeit die Ultraschallgeschwindigkeit berechnet werden. Die korrigierte Ultraschallgeschwindigkeit ist ebenfalls zu berechnen.

Der dynamische E-Modul ist das Produkt aus der quadrierten Ultraschallgeschwindigkeit und der Rohdichte und wird ebenso auf 12 Prozent Holzfeuchte normiert.

$$v = \frac{l}{t} \cdot 10^6 \quad (4.4)$$

$v$	Ultraschallgeschwindigkeit [m/s]
$l$	Länge des gemessenen Bauteils [m]
$t$	Ultraschalllaufzeit [sec <sup>-6</sup> ]

$$v_{12} = \frac{v}{[1 - (0,0053 \cdot (u - 0,12))]} \quad (4.5)$$

$v_{12}$	Ultraschallgeschwindigkeit normiert auf 12 Prozent Holzfeuchte [m/s]
$v$	Ultraschallgeschwindigkeit [m/s]
$u$	Holzfeuchte [%]

$$E_{dyn} = v^2 \cdot \rho \cdot 10^{-6} \quad (4.6)$$

$E_{dyn}$	dynamischer E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
$v$	Ultraschallgeschwindigkeit [m/s]
$\rho$	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]

$$E_{dyn,12} = v_{12}^2 \cdot \rho_{12} \cdot 10^{-6} \quad (4.7)$$

$E_{dyn,12}$	dynamischer E-Modul normiert auf 12 Prozent Holzfeuchte [N/mm <sup>2</sup> ]
$v_{12}$	Ultraschallgeschwindigkeit normiert auf 12 Prozent Holzfeuchte [m/s]
$\rho_{12}$	Rohdichte normiert auf 12 Prozent Holzfeuchte [kg/m <sup>3</sup> ]

## 4-2 VERBINDUNGSMITTEL

[5], [6], [7]

Für die Versuche werden ausschließlich selbstbohrende Holzschrauben mit Vollgewinde verwendet. Diese sind gekennzeichnet durch hohe Tragfähigkeiten (zum Beispiel Zugtragfähigkeit, Torsionstragfähigkeit, Fließmoment) aufgrund spezieller Härtung des Stahls. Die Holzschrauben werden vorwiegend auf Herausziehen beansprucht.

Die Schrauben werden in einem Winkel von 45 Grad mittels Lehre in den Probekörper eingebracht. Diese Schiefstellung ermöglicht eine Kraftübertragung parallel zur Fuge zweier Bauteile.

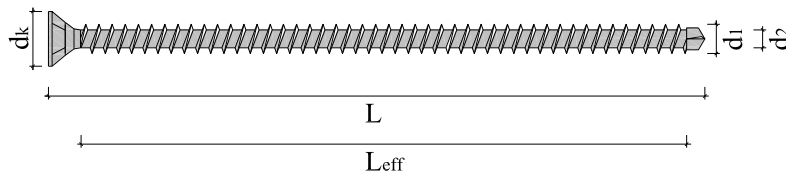


Abbildung 18: Schraubenkennzeichnung; Länge, effektive Länge, Kopf-, Kern- und Gewindedurchmesser

Tabelle 2 zeigt die verwendeten Schraubentypen und die dazugehörigen Parameter.

Tabelle 2: Parameter der verwendeten Schraubentypen

Schraubentyp	1	2	3	4
Hersteller	Würth	Würth	Schmid	Schmid
Typ	Assy Plus	Assy Plus	Rapid	Rapid
Gewindetyp	Vollgewinde	Vollgewinde	Vollgewinde	Vollgewinde
$d_1$ [mm]	8	8	8	8
$d_2$ [mm]	5	5	5	5
$d_k$ [mm]	15	15	15	15
L [mm]	180	220	180	240
Kopfart	Senkkopf	Zylinderkopf	Senkkopf	Senkkopf
Spitze	Bohrspitze	Bohrspitze	Halbspitze mit Verdichter	Halbspitze mit Verdichter
char. Wert des Bruchdrehmomentes $f_{tor,k}$ [Nmm]	23 000	23 000	30 000	30 000
Fließmoment $M_{y,k}$ [Nmm]	20 000	20 000	20 000	20 000
char. Zugtragfähigkeit $f_{tens,k}$ [N]	20 000	20 000	23 000	23 000
Prüfreihe	B1, B3, B4	B1	A	A, B2
Zulassungsnummer	ETA-11-0190 [7]	ETA-11-0190 [7]	Z-9.1-656 [6]	Z-9.1-656 [6]

## 4-3 STAHLBLECHE

Als Laschen sind Stahlbleche der Festigkeit S355 vorgesehen, welche mit Bohrungen mit einer Neigung von 45 Grad versehen sind. Es werden drei verschiedene Laschentypen verwendet, welche in Abbildung 19, Abbildung 20 und Abbildung 21 dargestellt sind.

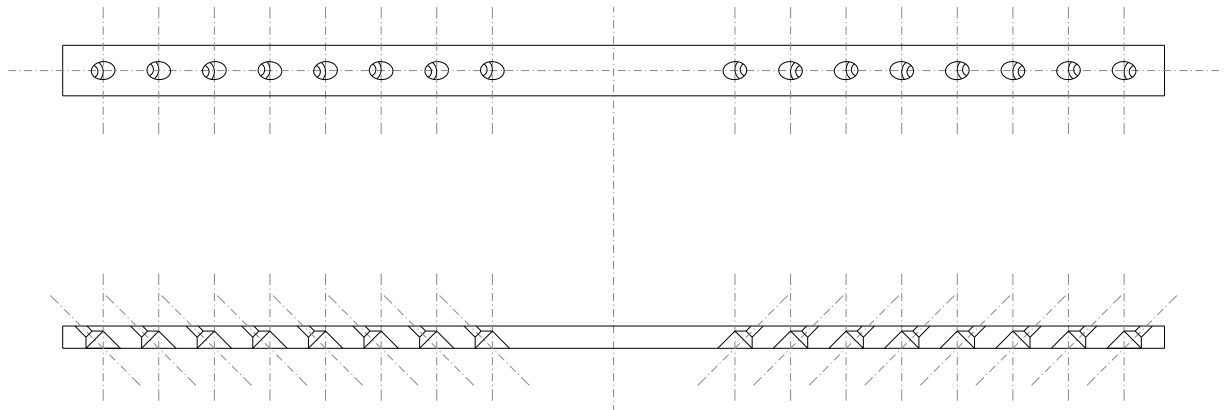


Abbildung 19: Lasche 1; oben: Ansicht; unten: Schnitt; ohne Maßstab

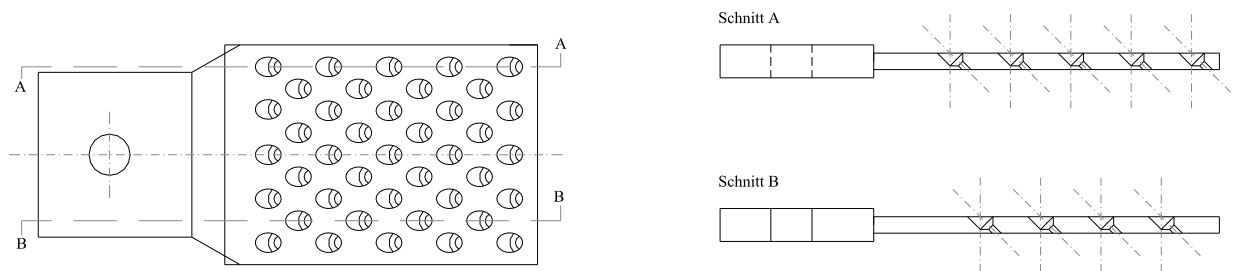


Abbildung 20: Lasche 2; links: Ansicht; rechts oben: Schnitt A; rechts unten: Schnitt B; ohne Maßstab

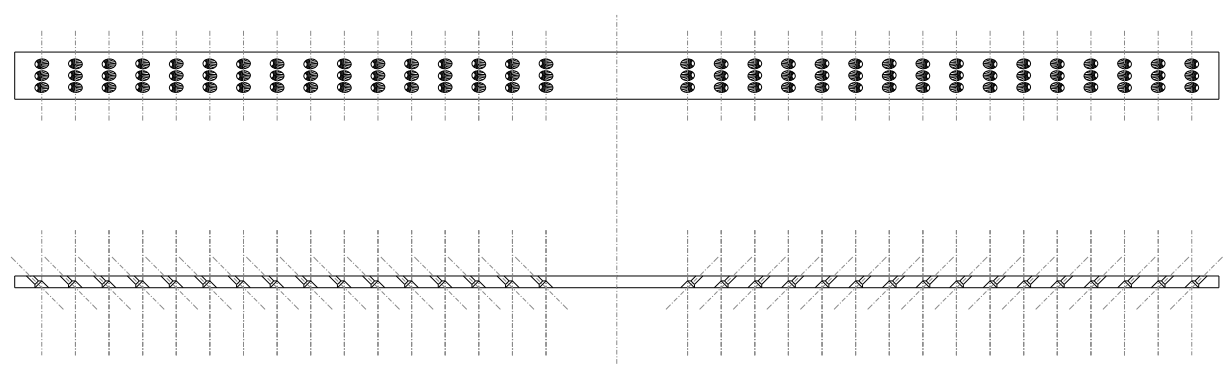


Abbildung 21: Lasche 3; oben: Ansicht; unten: Schnitt; ohne Maßstab

## KAPITEL 5: METHODEN

[1]; [2]; [13]; [22]

### 5-1 VORBEMESSUNG DER VERBINDUNG

Die Vorbemessung für die jeweiligen Versuchsreihen und Prüfgruppen erfolgt anhand nachfolgender Formeln. In Gleichung (5.1), (5.4) und (5.6) wird aus Gründen der Vereinfachung eine Gauß-Normalverteilung des jeweiligen Parameters angenommen. Charakteristische Werte entsprechen den 5-Prozent-Quantilen. Das Ziel dieser Vorbemessung ist es, die Prüfkörper und Versuchskonfiguration so zu wählen, dass, wenn möglich ein Holzversagen im Nettoquerschnitt erreicht wird. Ein Versagen des Verbindungsmittels soll vermieden werden.

mittlere Zugfestigkeit des Holzes:

$$f_{t,0,m} = \frac{f_{t,0,k}}{[1 - 1,645 \cdot COV(f_t)]} \quad (5.1)$$

$f_{t,0,m}$  mittlere Zugfestigkeit des Holzes [N/mm<sup>2</sup>]

$f_{t,0,k}$  charakteristische Zugfestigkeit des Holzes [N/mm<sup>2</sup>]

$COV(f_t)$  Variationskoeffizient der Zugfestigkeit; hier mit 20 Prozent abgeschätzt [-]

Nettoquerschnitt des Holzes nach [13]:

$$A_{netto} = A_{brutto} - 2 \cdot m \cdot A_S = b \cdot h - 2 \cdot m \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \sin \beta \quad (5.2)$$

$A_{netto}$  Nettoquerschnittsfläche nach [13] [mm<sup>2</sup>]

$A_{brutto}$  Bruttoquerschnittsfläche [mm<sup>2</sup>]

$m$  Anzahl der Schraubenreihen je Lasche [-]

$A_S$  in Schnittebene projizierte Außenfläche der Schrauben [mm<sup>2</sup>]

$b$  Breite des Bauteils [mm]

$h$  Höhe des Bauteils [mm]

$d$  Schraubendurchmesser [mm]

$l_{ef}$  Eindringtiefe des Gewindeteils [mm]

$\beta$  Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung [°]

Nettoquerschnittsnachweis:

$$\frac{F_{max}}{A_{netto}} = f_{t,0,m} \quad (5.3)$$

$F_{max}$  maximale Bemessungskraft [N]

$A_{netto}$  Nettoquerschnittsfläche nach [13] [mm<sup>2</sup>]

$f_{t,0,m}$  mittlere Zugfestigkeit des Holzes [N/mm<sup>2</sup>]



charakteristische Zugtragfähigkeit der Schraube:

$R_{t,u,k}$  ... laut Zulassungen

$R_{t,u,k}$  charakteristische Zugtragfähigkeit der Schraube [N]

mittlere Zugtragfähigkeit der Schraube:

$$R_{t,u,m} = \frac{R_{t,u,k}}{[1 - 1,645 \cdot COV(R_t)]} \quad (5.4)$$

$R_{t,u,m}$  mittlere Zugtragfähigkeit der Schraube [N]

$COV(R_t)$  Variationskoeffizient der Zugtragfähigkeit der Schraube; hier mit 15 Prozent abgeschätzt [-]

Fließmoment der Schraube:

$M_{y,k}$  ... laut Zulassungen

$M_{y,k}$  charakteristisches Fließmoment der Schraube [Nm]

mittlere axiale Zugtragfähigkeit der Schraube:

$$R_{ax,m} = \min \left[ R_{t,u,m} ; \frac{f_{1,m} \cdot l_{ef} \cdot d}{\sin(\alpha)^2 + \frac{4}{3} \cdot \cos(\alpha)^2} \right] \quad (5.5)$$

$R_{ax,m}$  mittlere axiale Zugtragfähigkeit der Schraube [N]

$R_{t,u,m}$  mittlere Zugtragfähigkeit der Schraube [N]

$l_{ef}$  Eindringtiefe des Gewindeteils [mm]

$d$  Schraubendurchmesser [mm]

$\alpha$  Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung [°]

$f_{1,m}$  mittlerer Wert des Ausziehparameters [N/mm<sup>2</sup>]

charakteristischer Wert des Ausziehparameters:

$$f_{1,k} = 80 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 \quad \dots \text{ für Tragfähigkeitsklasse 3} \quad (5.6)$$

$f_{1,k}$  charakteristischer Wert des Ausziehparameters [N/mm<sup>2</sup>]

$\rho_k$  charakteristischer Wert der Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]

mittlerer Wert des Ausziehparameters:

$$f_{1,m} = \frac{f_{1,k}}{[1 - 1,645 \cdot COV(f_1)]} \quad (5.7)$$

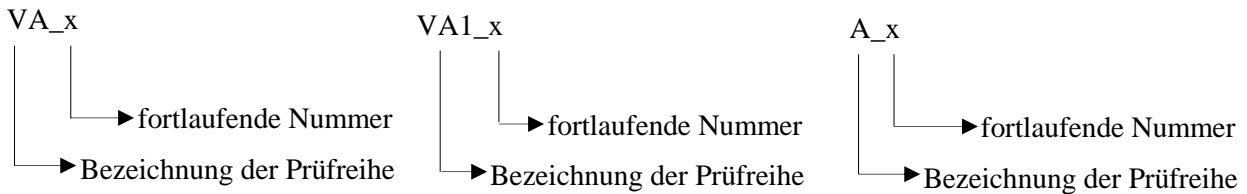
$f_{t,0,m}$  mittlere Zugfestigkeit des Holzes [N/mm<sup>2</sup>]

$f_{t,0,k}$  charakteristische Zugfestigkeit des Holzes [N/mm<sup>2</sup>]

$COV(f_1)$  Variationskoeffizient des Ausziehparameters; hier mit 15 Prozent abgeschätzt [-]

## 5-2 PRÜFSERIE A

Die hergestellten Prüfkörper der Versuchsreihe A werden nach der jeweiligen Prüfreihe bezeichnet, in der sie Verwendung finden. Als „VA“ werden Probekörper für Zugprüfungen der Brettlamellen bezeichnet. Probekörper mit dem Namen „VA1“ sind für Zugprüfungen der Duoquerschnitte vorgesehen und Probekörper mit der Bezeichnung „A“ sind Probekörper für die Hauptversuche mit Verbindungsmitteln.



### 5-2.1 ZUGPRÜFUNGEN BRETTLAMELLE; PRÜFREIHE „VA“

#### 5-2.1.1 Prüfkonfiguration, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Diese Prüfung dient zur Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zur Faser.

Für die Prüfung der einzelnen Bretter wird die Zugprüfmaschine „lignum\_z\_850“ verwendet. Die Einleitung der Zugkraft (max. 850 kN) erfolge mittels Reibung über Klemmung der Backen. Über Kraftmessdosen wird die aufgebrachte Belastung gemessen.

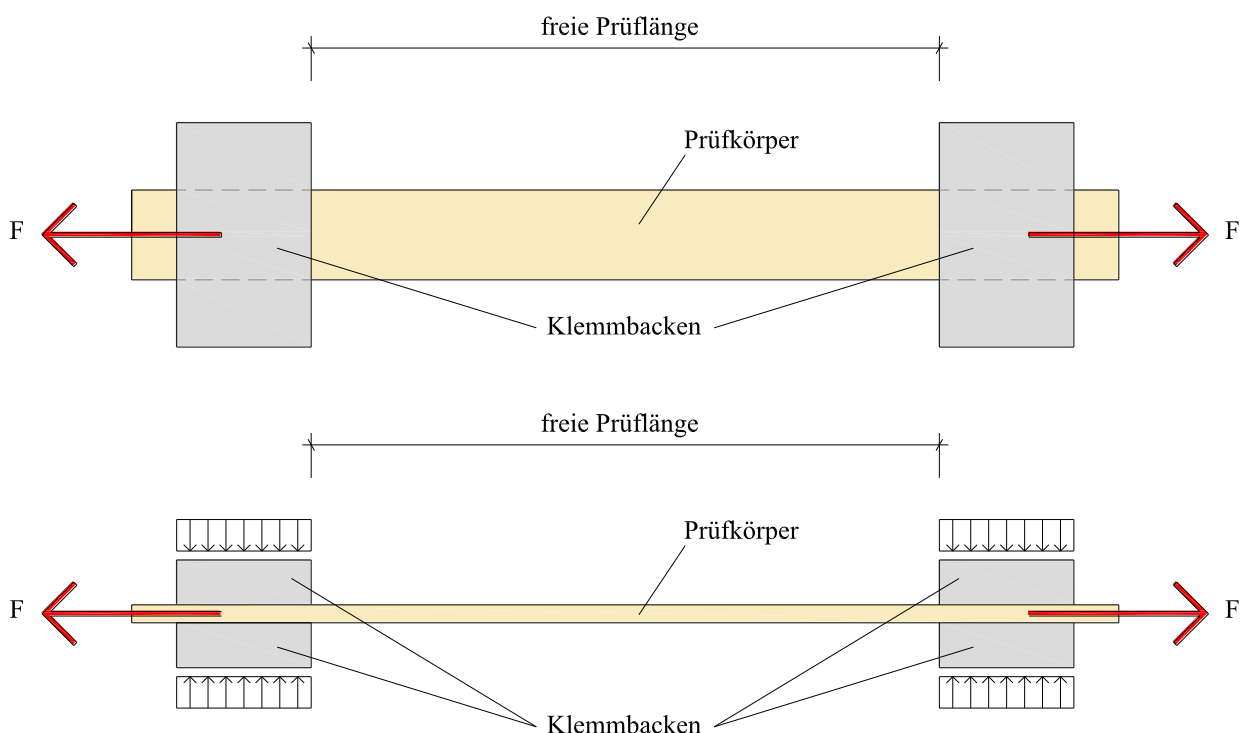


Abbildung 22: Versuchsaufbau, Prüfreihe „VA“ und „VA1“

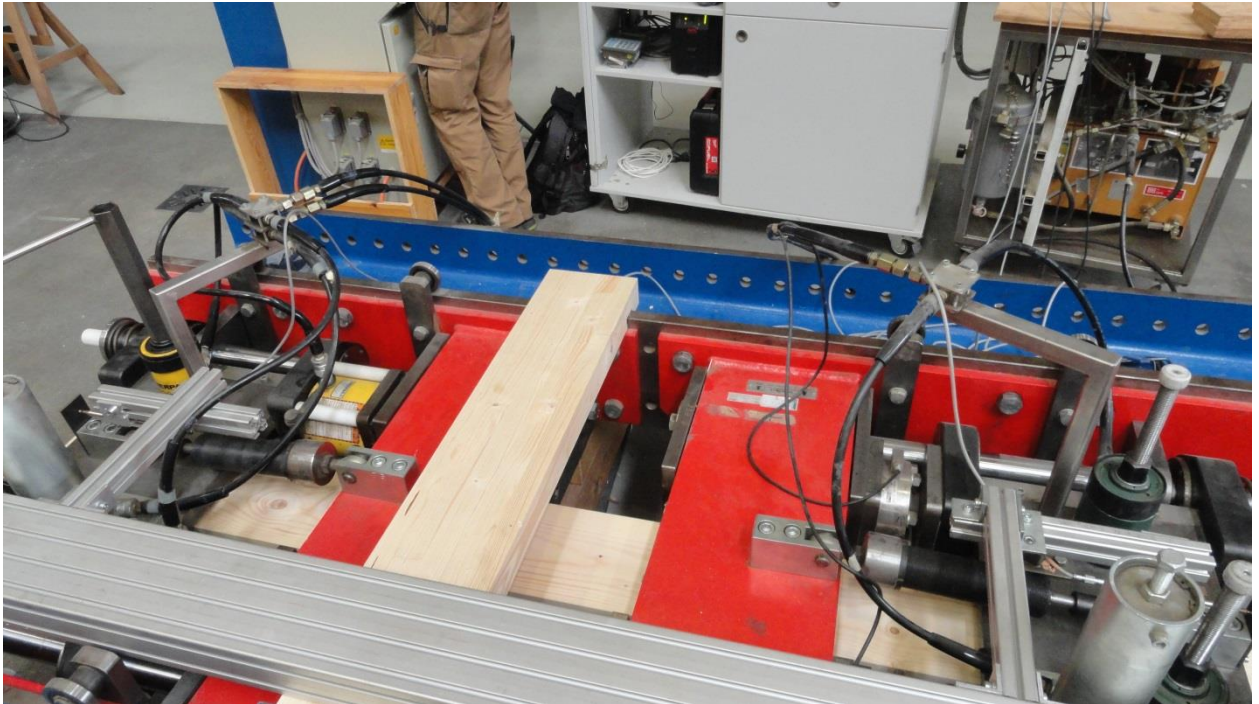


Abbildung 23: Versuchsaufbau, Prüfreihe „VA“ und „VA1“

Nach erfolgter Prüfung wurde das Bruchbild analysiert und fotografisch dokumentiert. Bilder der beobachteten, unterschiedlichen Bruchursachen werden in Kapitel 6 gezeigt.

Die Ermittlung der Zugfestigkeit aus den gemessenen Bruchlasten erfolgt mit Formel (6.1).

$$f_{t,0} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (5.8)$$

$f_{t,0}$	Zugfestigkeit des Holzes [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_{\max}$	maximale Bemessungskraft [N]
$A$	Querschnittsfläche des Probekörpers [mm <sup>2</sup> ]

Es werden insgesamt 20 Einzelbretter, mit den Abmessungen 200 x 30 x 2200 Millimeter geprüft, um die Zugfestigkeit des Materials zu bestimmen. Mit den ermittelten Werten der Zugfestigkeit der Einzellamellen lässt sich, wie in Kapitel 6-1.2 mit der Formel nach Brandner [22] gezeigt wird, auf die Zugfestigkeit von verklebten BSH-Trägern schließen.

## 5-2.2 ZUGPRÜFUNGEN DUOQUERSCHNITT; PRÜFREIHE „VA1“

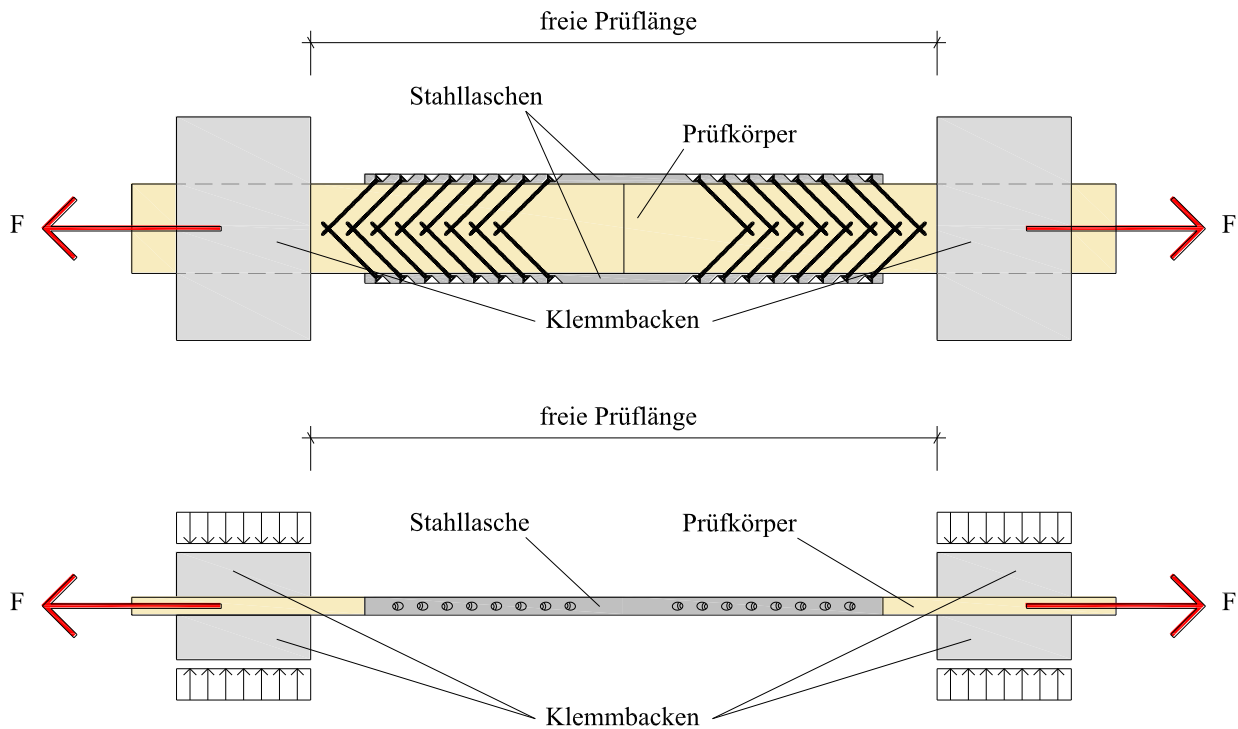
### 5-2.2.1 Prüfkongfiguration, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Zugprüfung der Duoquerschnitte, zur Ermittlung der Zugfestigkeit des für die Verbindung verwendeten Materials, wurde mit derselben Prüfkongfiguration wie die Versuche „VA“ mit Einzellamellen durchgeführt. Der einzige Unterschied liegt in der Klemmhöhe, da die Duoquerschnitte die doppelte Höhe der Einzellamellen aufweisen. Es werden zehn Zugprüfungen am geklebten Brettschichtholzträger mit den Abmessungen 200 x 60 x 2200 Millimeter durchgeführt.

## 5-2.3 HAUPTVERSUCHE; PRÜFREIHE „A“

### 5-2.3.1 Prüfkongfiguration, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

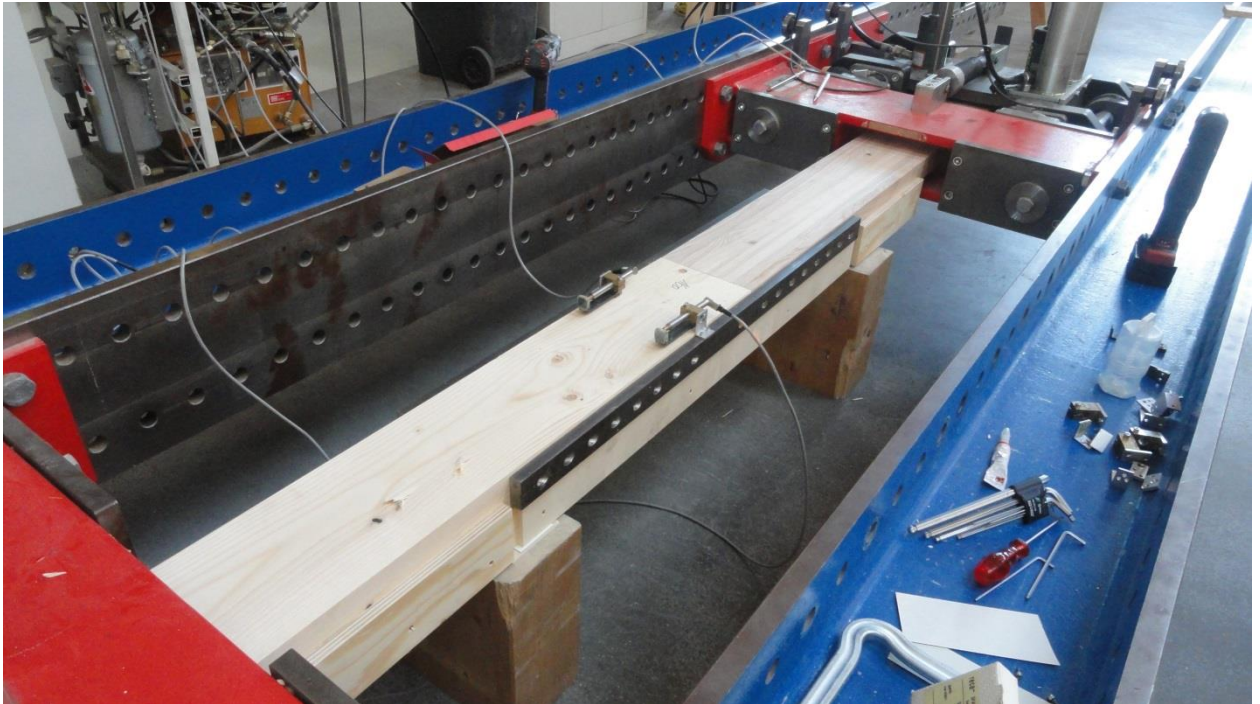
Die Versuche mit einreihiger Schraubenanordnung werden auf der Zugprüfmaschine lignum\_z\_850 des Instituts für Holzbau und Holztechnologie durchgeführt. Abbildung 24 zeigt die geplante Prüfkongfiguration.



**Abbildung 24: Versuchskonfiguration; Prüfreihe A; oben: Grundriss; unten: Ansicht**

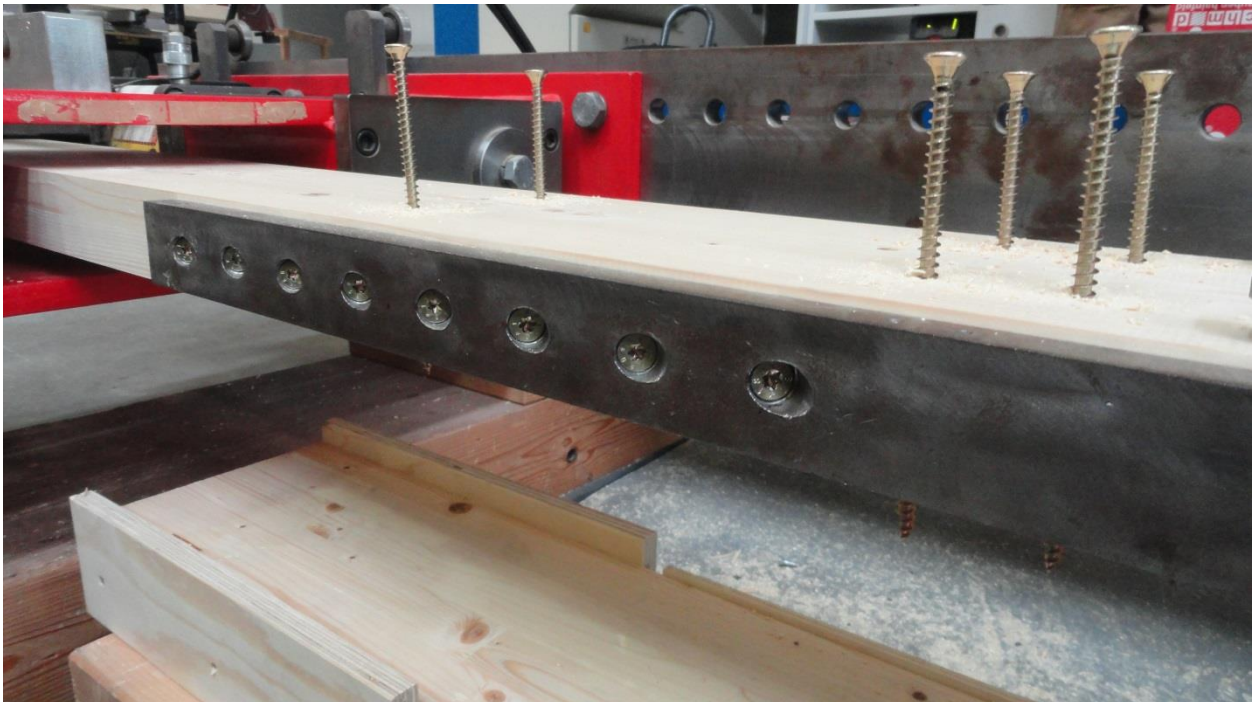
Für die Hauptversuche der Prüfreihe „A“ wurden 20 Duo-Brettschichtholzträger mit den Abmessungen 1800 x 200 x 60 Millimeter geprüft. Es werden pro Seite und Prüfkörper acht Schrauben, mit einer Länge von 180 Millimeter und einem Durchmesser von acht Millimeter eingebracht. Das Verhältnis der Nettofläche zur Bruttofläche beträgt 80 Prozent. Die Dimension der Brettschichtholzträger und die Schraubenanordnung wird so gewählt, dass ausschließlich Nettoquerschnittversagen auftreten soll.





*Abbildung 25: Versuchsaufbau, Prüfreihe A*

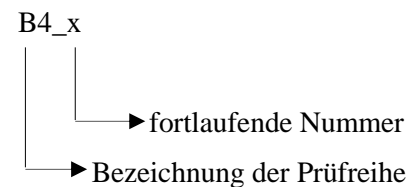
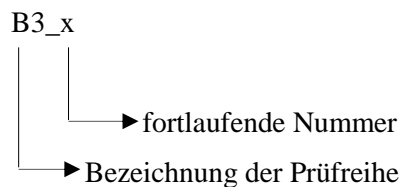
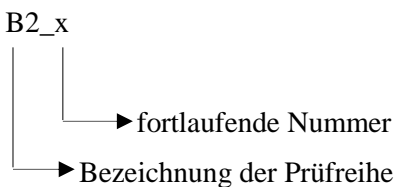
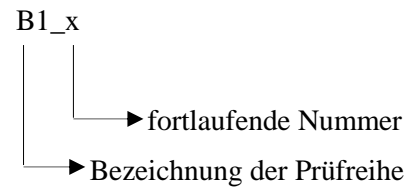
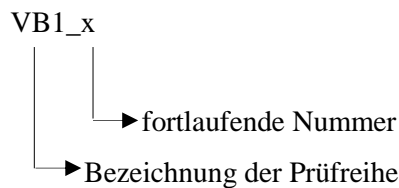
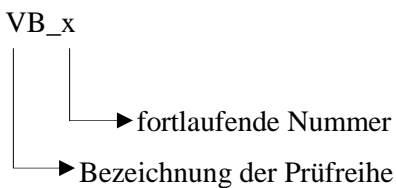
Da bei den ersten Versuchen ausschließlich Querkzugversagen (Aufspalten der Verbindung in Faserrichtung) auftraten, wurden bei den folgenden Versuchen Querkzugverstärkungen, in Form von Schrauben 90 Grad zur Achse der primären Schrauben, eingebracht, um diesen Versagensfall auszuschließen. Die Verstärkung erfolgte mit Schrauben (8/160 Millimeter). Die Anzahl der Schrauben zur Querkzugverstärkung wurden im Laufe des Versuchsprogrammes schrittweise erhöht, siehe Abschnitt 6-1.3.



*Abbildung 26: Versuch mit Querkzugverstärkung; Prüfreihe A*

## 5-3 PRÜFSERIE B

Die hergestellten Prüfkörper der Prüfsreihe B werden bezeichnet nach der jeweiligen Prüfgruppe, in der sie Verwendung finden. Als „VB“ werden Probekörper für Zugprüfungen der Brettlamellen bezeichnet. Probekörper mit dem Namen „VB1“ sind für Zugprüfungen der Duoquerschnitte vorgesehen. Probekörper mit der Bezeichnung „B1“ und „B2“ sind Trio-Probekörper für die Hauptversuche mit drei-beziehungsweise fünfreihtiger Verbindungsmittelanordnung. Als „B3“ und „B4“ werden Probekörper für Verbindungsmittelversuche mit zwei- beziehungsweise dreireihiger Anordnung bezeichnet. Diese beiden letztgenannten Prüfkörper besitzen im Gegensatz zu den vorherigen eine verminderte Breite von 180 anstatt 200 Millimeter.



### 5-3.1 ZUGPRÜFUNGEN BRETTLAMELLE; PRÜFREIHE „VB“

#### 5-3.1.1 Prüfkonfiguration, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Diese Prüfung dient zur Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zur Faser. Für die Prüfung der einzelnen Bretter wird die Zugprüfmaschine lignum\_z\_850 verwendet. Die Einleitung der Zugkraft (max. 850 kN) erfolge mittels Reibung über Klemmung der Backen. Über Kraftmessdosen wird die aufgebrachte Belastung gemessen. Die Versuchskonfiguration für diese Zugprüfungen ist identisch mit der Versuchskonfiguration der Prüfreihe „VA“ und „VA1“ laut Abbildung 24. Nach erfolgter Prüfung wurde das Bruchbild analysiert und fotografisch dokumentiert. Bilder der beobachteten, unterschiedlichen Bruchursachen werden in Kapitel 6 gezeigt. Die Ermittlung der Zugfestigkeit aus den gemessenen Bruchlasten erfolgt mit Formel (5.2).

$$f_{t,0} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (5.9)$$

$f_{t,0}$	Zugfestigkeit des Holzes [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_{\max}$	maximale Bemessungskraft [N]
A	Querschnittsfläche des Probekörpers [mm <sup>2</sup> ]

Mit dem ermittelten Werten der Zugfestigkeit der Einzellamellen lässt sich, wie in Kapitel 6-1.2 mit der Formel nach Brandner [22] gezeigt wird, auf die Zugfestigkeit von verklebten BSH-Trägern schließen.

Es werden Einzelbretter mit den Abmessungen 200 x 40 x 2200 Millimeter in 30 Zugversuchen geprüft.

## 5-3.2 ZUGPRÜFUNGEN DUOQUERSCHNITT ; PRÜFREIHE „VB1“

### 5-3.2.1 Prüfkongfiguration, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Zugprüfung der Duoquerschnitte, zur Ermittlung der Zugfestigkeit des für die Verbindung verwendeten Materials, wurde mit derselben Prüfkongfiguration wie Prüfreihe „VB“ mit Einzellamellen durchgeführt. Der einzige Unterschied liegt in der Klemmhöhe, da die Duoquerschnitte die doppelte Höhe der Einzellamellen aufweisen. Es werden 20 Zugprüfungen am geklebten Brettschichtholzträger mit den Abmessungen 200 x 80 x 2200 Millimeter durchgeführt.

## 5-3.3 HAUPTVERSUCHE

### 5-3.3.1 Prüfkongfiguration, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Vorversuche werden auf der Zugprüfmaschine lignum\_z\_850 des Institutes durchgeführt. Abbildung 28 zeigt die geplante Prüfkongfiguration. An einen Prüfbauteil werden vier Stahllaschen montiert, über diese Kräfte in die Verbindung eingeleitet werden.



Abbildung 27: Prüfprinzip; Prüfreihe „B1“ und „B2“

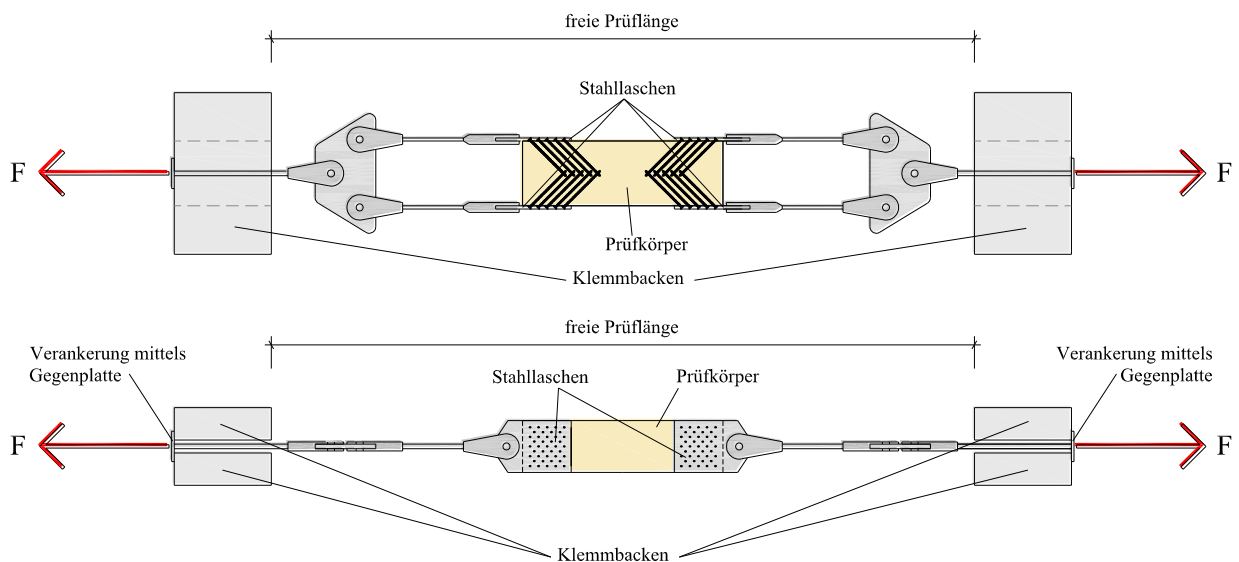


Abbildung 28: Versuchskonfiguration; Prüfreihe „B1“ und „B2“; oben: Grundriss; unten: Ansicht



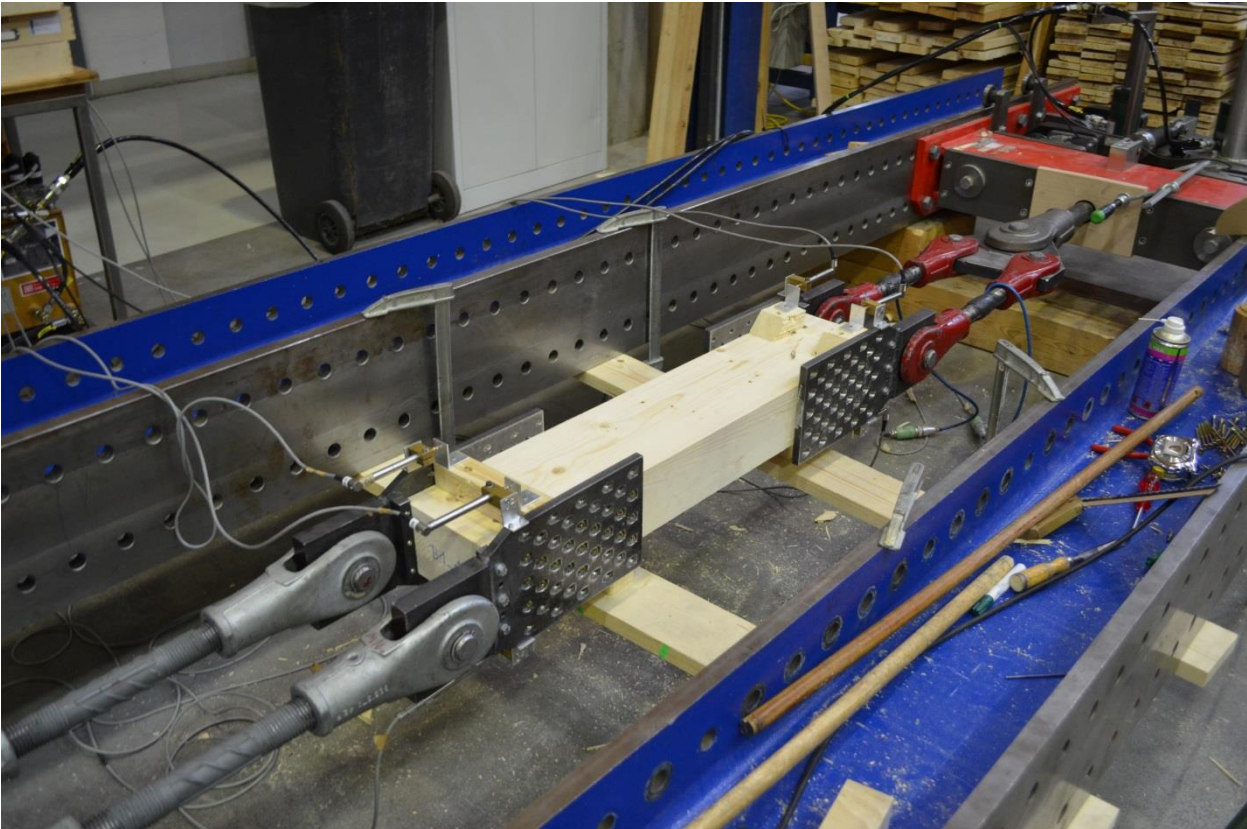


Abbildung 29: Versuchsaufbau; Prüfreihe „B1“ und „B2“

Die Prüfreihe B3 und B4 werden mit derselben Konfiguration wie die Prüfreihe A durchgeführt. Der Unterschied besteht nur in der Verwendung einer anderen Lasche, siehe Abbildung 21.

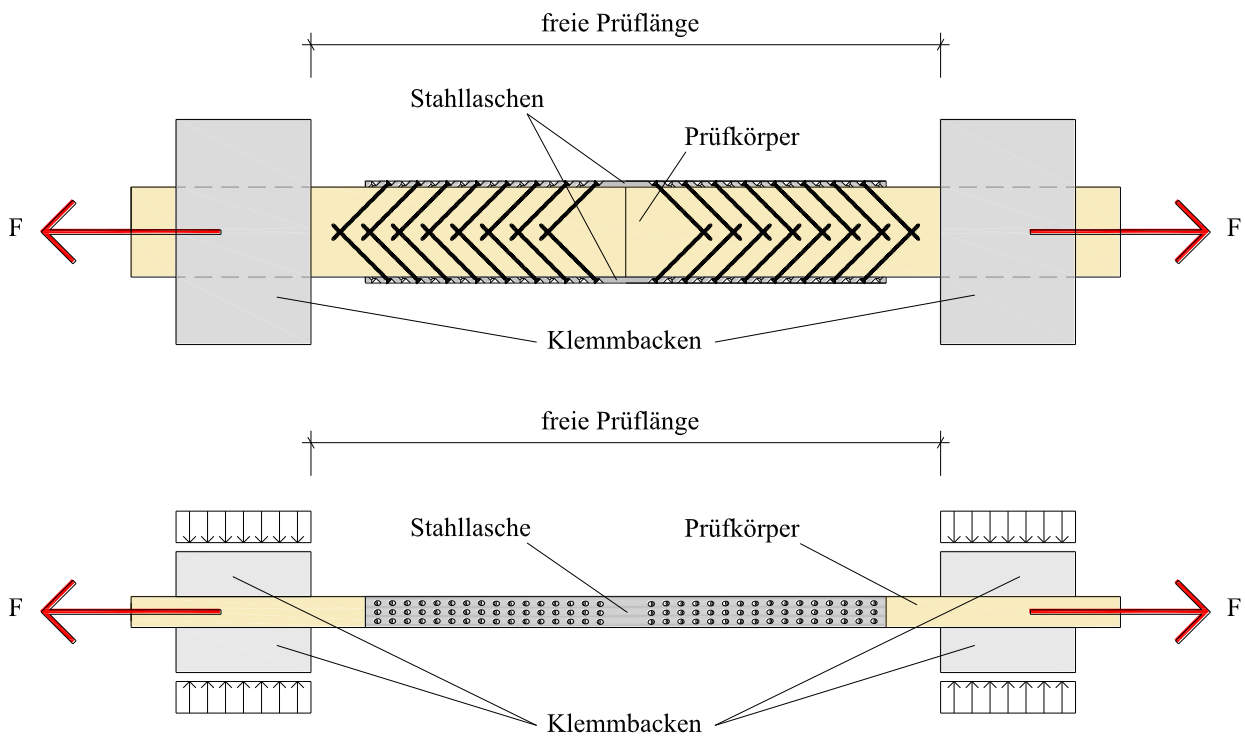


Abbildung 30: Versuchskonfiguration „B3“ und „B4“; oben: Grundriss; unten: Ansicht



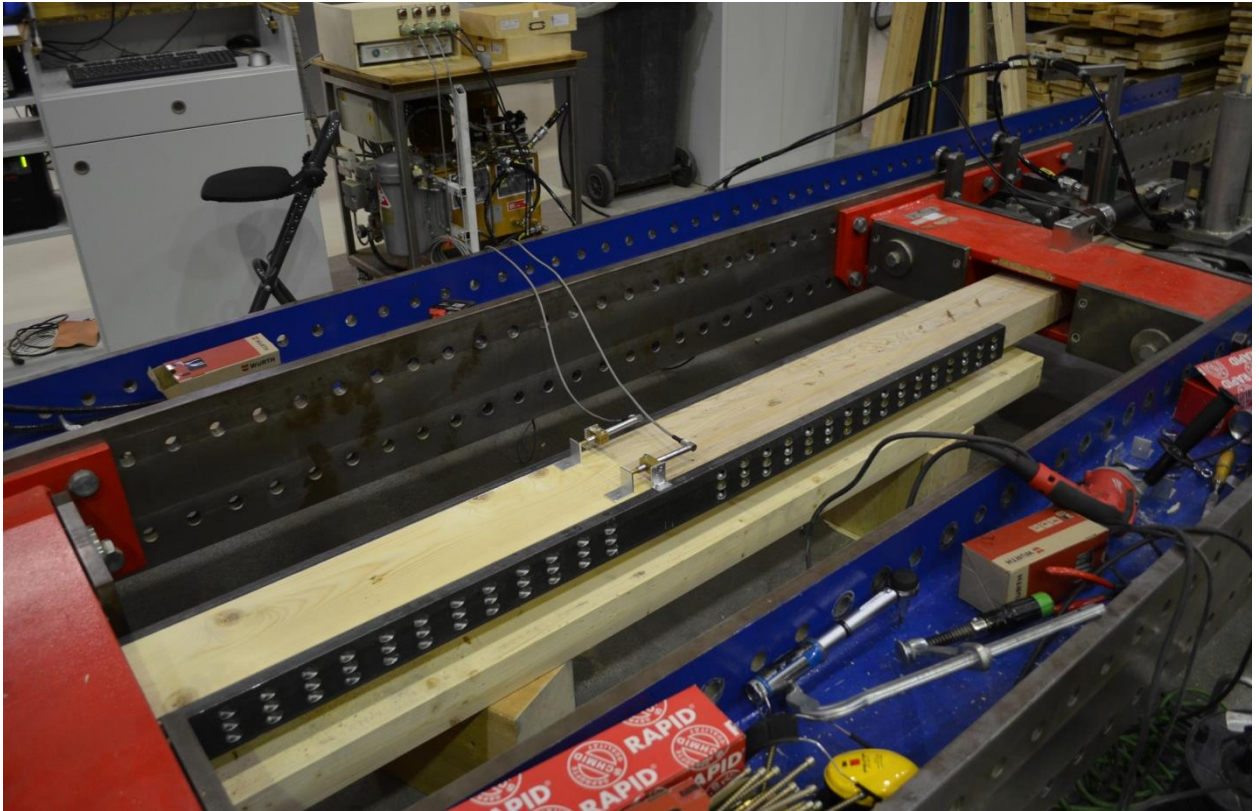


Abbildung 31: Versuchsaufbau; Prüfreihe „B3“ und „B4“

Für die Hauptversuche der Versuchsreihe B wurden Trio- und Duo-Brettschichtholzträger mit den Abmessungen 200 x 120 x 1000 Millimeter beziehungsweise 200 x 80 x 1800 Millimeter verwendet. Die Dimension der Brettschichtholzträger und die Schraubenanordnung wird so gewählt, dass ausschließlich Nettoquerschnittsversagen auftreten soll. Tabelle 3 zeigt den Prüfplan der durchgeführten Versuche.

Tabelle 3: Prüfplan; Prüfsreihe „B“

Bez.	m	r	n	b	h	L	Schichten	Schraube d	Schraube l	$A_n / A_b$	N
[-]	[Stk]	[Stk]	[Stk]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[%]	[Anz.]
B1	3	5	15	200	120	2000	3	8	220	75	20
B2	5	5	25	120	200	2000	3 / 90°	8	240	63	20
B3	2	16	32	200	80	1800	2	8	180	78	12
B4	2	8	16	200	80	1800	2	8	180	78	10

- m Anzahl der Schraubenreihen je Lasche [-]
- r Anzahl der Schrauben je Reihe [-]
- n Gesamtanzahl der Schrauben je Lasche [-]
- b Breite des Prüfkörpers [mm]
- h Höhe des Prüfkörpers [mm]
- L Länge des Prüfkörpers [mm]

# KAPITEL 6: ERGEBNISSE UND DISKUSSION

In den folgenden Kapiteln werden die statistisch ausgewerteten Versuchsergebnisse abgebildet und analysiert.

## 6-1 PRÜFSERIE „A“

### 6-1.1 ZUGPRÜFUNGEN BRETTLAMELLE; PRÜFREIHE „VA“

Abbildung 32 und Abbildung 33 zeigen die QQ-Plots für die Normal- und Lognormalverteilung der Rohdichte und der Zugfestigkeit. Das Bestimmtheitsmaß und die Signifikanztests nach Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov werden in den Diagrammen ausgewiesen.

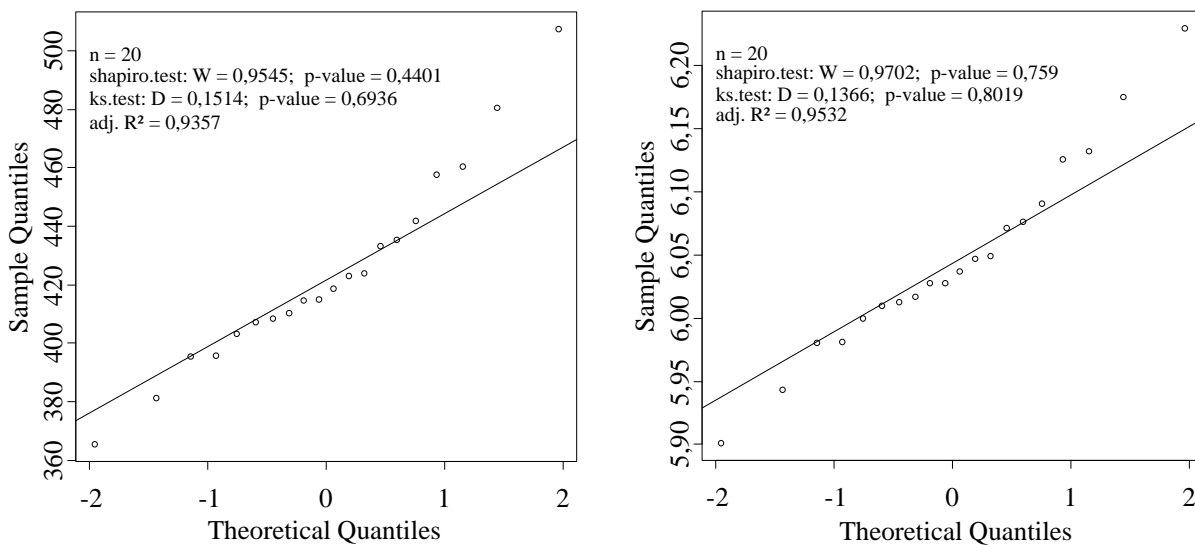
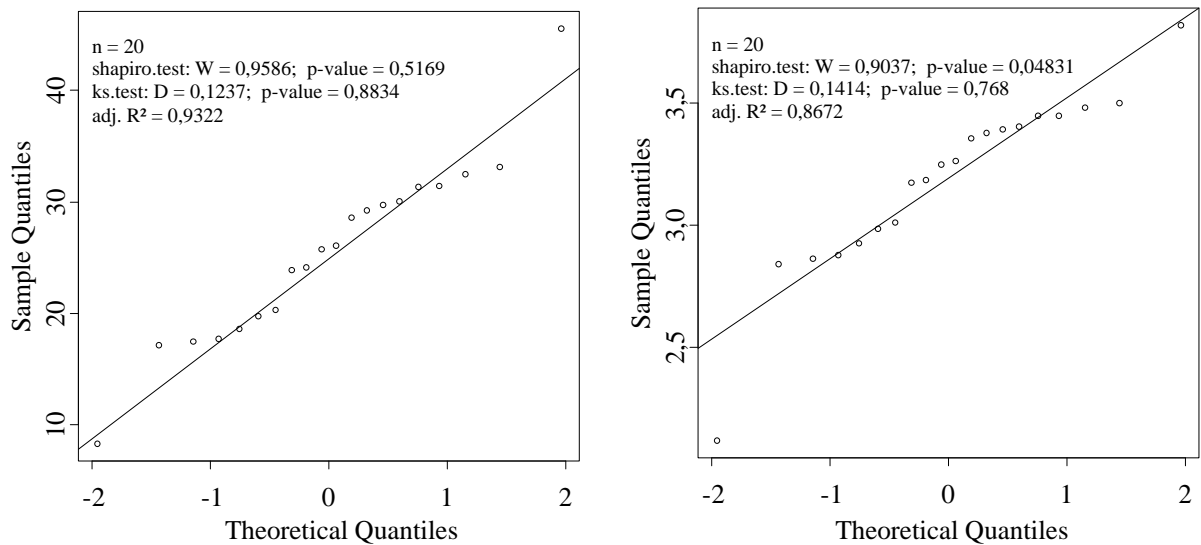


Abbildung 32: Modellvergleich Rohdichte; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung

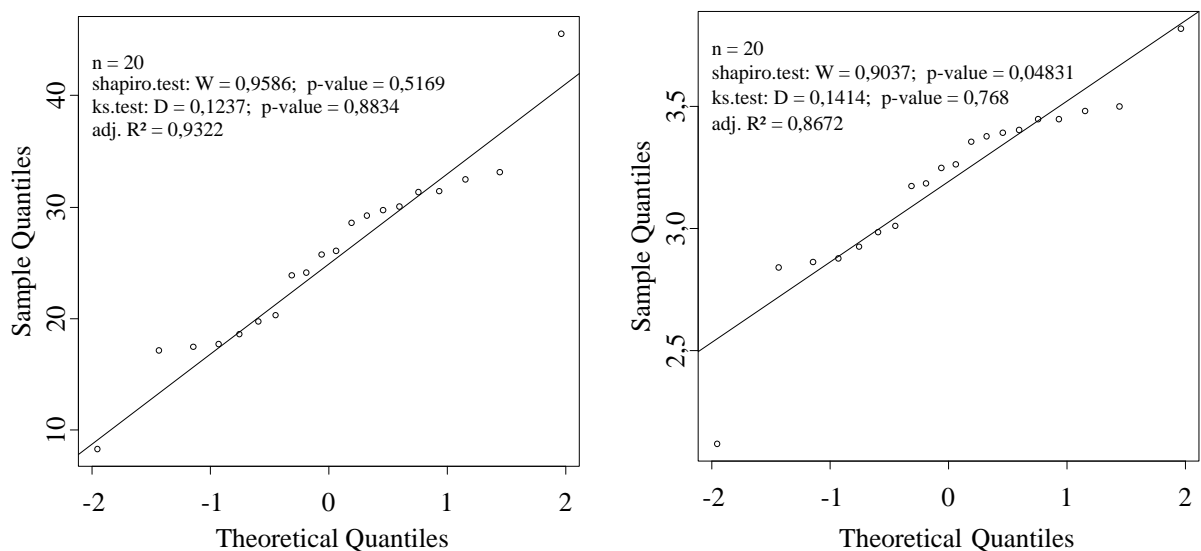
Das Bestimmtheitsmaß und beide Signifikanztests weisen für die Lognormalverteilung höhere Werte auf. Die Daten können somit durch die Lognormalverteilung besser angenähert werden.



**Abbildung 33: Modellvergleich Zugfestigkeit; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung**

Da, wie in Abbildung 33 ersichtlich, die Ergebnisse der Signifikanztests und das Bestimmtheitsmaß höhere Werte für die Normalverteilung ausweisen als für die Lognormalverteilung, kann die erstgenannte Verteilung als sehr gute Näherung für die vorliegenden Daten angenommen werden.

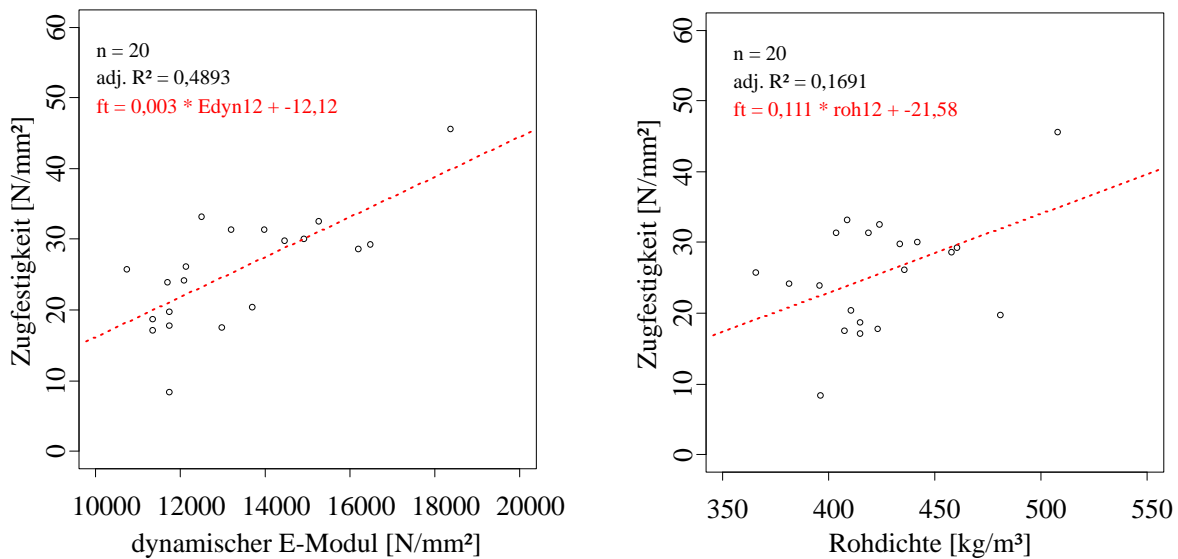
Die QQ-Plots für die Normal- und Lognormalverteilung der dynamischen E-Moduln ist in Abbildung 34 ersichtlich. Ebenfalls angegeben sind das Bestimmtheitsmaß und die Signifikanztests nach Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov.



**Abbildung 34: Modellvergleich dynamischer E-Modul; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung**

Die Normalverteilung bietet für den dynamischen Elastizitätsmodul eine günstigere Anpassung als die Lognormalverteilung.

Abbildung 35 stellt die Zusammenhänge zwischen den Zugfestigkeiten und den dynamischen E-Modul dar.



**Abbildung 35:** links: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und dynamischem E-Modul; rechts: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und Rohdichte

Abbildung 35 zeigt mit einem adj.R<sup>2</sup>-Wert von 0,489 nur eine mäßige Korrelation zwischen der Zugfestigkeit und dem dynamischen E-Modul an. Ein Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Rohdichte ist durch das Bestimmungsmaß mit dem Wert 0,1691 als sehr gering zu bezeichnen. Diese schwach ausgeprägte Wechselbeziehung ist auf ein nicht fehlerfreies Grundmaterial zurückzuführen. Durch Fehlstellen (Äste) wird die Rohdichte des Grundmaterials erhöht, bei gleichzeitiger Herabsetzung der Zugfestigkeit.

Die Ergebnisse der Auswertung der Versuchsreihe „VA“ sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Eine ausführlichere Ergebnisaufstellung ist im Anhang B-1 beigefügt.

**Tabelle 4:** Auswertung; Prüfreihe „VA“

n = 20	$\rho$	u	$\rho_{12}$	t	v	$v_{12}$	$E_{\text{dyn}}$	$E_{\text{dyn},12}$	F	$f_{t,0}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Min	365	10,8	365	366	4942	4942	10713	10737	50,5	8,32
Max	506	12,0	508	421	6015	6015	18306	18363	274	45,6
Mittelwert	423	11,4	424	393	5593	5592	13281	13323	154	25,6
Median	416	11,4	417	392	5622	5622	12691	12731	157	25,9
Standardabw.	32,5	0,40	32,7	18,4	300	300	1990	2002	47,5	7,88
COV	7,70%	3,12%	7,71%	4,69%	5,37%	5,36%	15,0%	15,0%	30,8%	30,8%
5% Quantile	379	11,0	380	367	5214	5213	11255	11306	101	16,7

Abbildung 36 und Abbildung 37 bilden ergänzend das Kraft-Maschinenweg-Diagramm und das Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfreihe „VA“ ab. In verschiedenen Farben sind die einzelnen Versuchsergebnisse der Probekörper dargestellt.

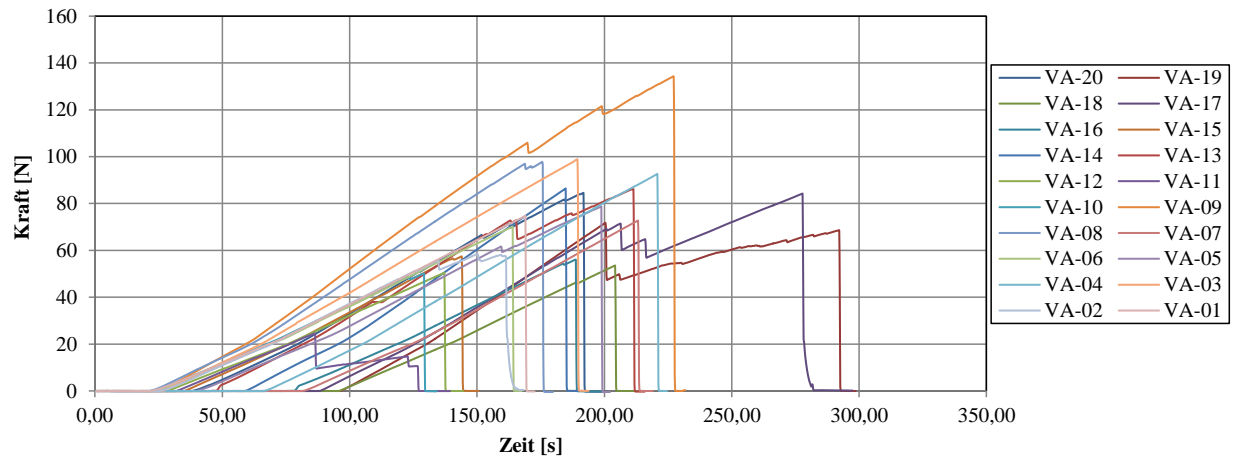


Abbildung 36: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „VA“

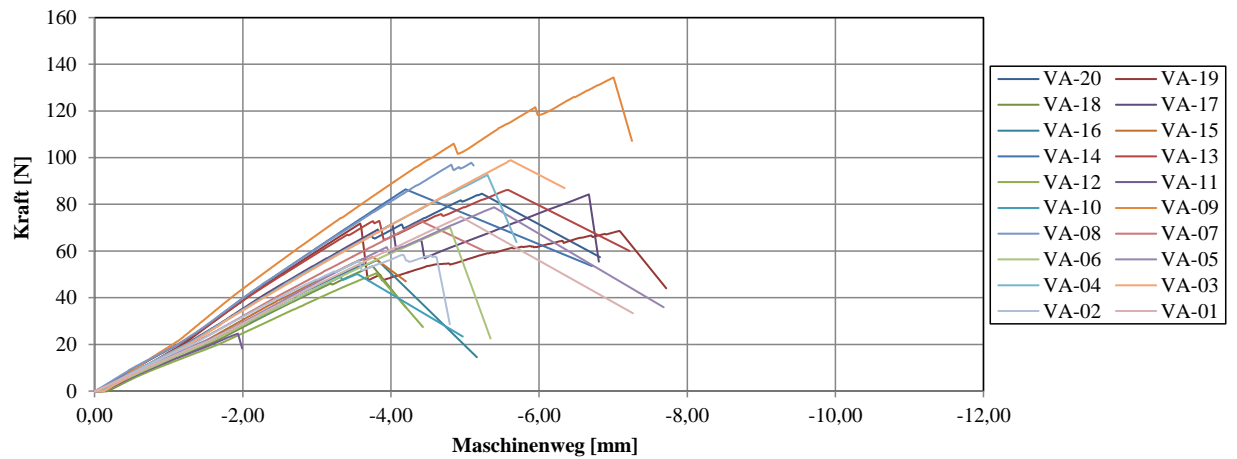


Abbildung 37: Kraft-Maschinenweg-Diagramm; Prüfreihe „VA“

### Einordnung der Prüfkörper in T-Klassen:

Die Umrechnung der Ergebniswerte der Prüfungen in charakteristische Werte erfolgt mit Hilfe der ÖNORM EN 14358 [3], um eine Klassifizierung der Brettlamellen vornehmen zu können. Diese Norm ermöglicht mit den nachfolgenden Formeln eine Bestimmung der charakteristischen 5-Prozent-Quantile auf Basis einer Lognormalverteilung. Zum Vergleich sind die 5-Prozent-Quantilwerte mit empirischer Verteilung in Tabelle 4 dargestellt. Zur Einordnung der Prüfkörper in T-Klassen wurde jedoch die lognormalverteilte Variante nach den Formeln (6.1) bis (6.3) gewählt, da diese eine gute Anwendbarkeit auf die geprüften Probekörper bietet.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \ln(m_i) \quad (6.1)$$

$\bar{y}$	Mittelwert
$n$	Anzahl der Prüfergebnisse
$m_i$	Prüfergebnis

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot (\sum_{i=1}^n \ln(m_i) - \bar{y})^2} \quad (6.2)$$

$s_y$	Standardabweichung
$n$	Anzahl der Prüfergebnisse
$m_i$	Prüfergebnis
$\bar{y}$	Mittelwert

$$f_k = \exp(\bar{y} - k_s \cdot s_y) \quad (6.3)$$

$f_k$	charakteristischer Wert der Festigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$\bar{y}$	Mittelwert
$k_s$	Faktor zur Berücksichtigung der Anzahl der Prüfergebnisse
$s_y$	Standardabweichung

mit $k_s$ :	$n$	$k_s$
	10	... 2,10
	15	... 1,99
	20	... 1,93
	30	... 1,87

Für die Einzellamellen der Versuchsreihe „VA“ beträgt der Mittelwert laut Prüfungen 25,55 N/mm<sup>2</sup>. Mit Formel (6.3) ergibt sich ein charakteristischer Wert für die Zugfestigkeit von 12,04 N/mm<sup>2</sup>. Dieser Zugfestigkeitswert der Einzellamelle ermöglicht, wie nachfolgend beschrieben, eine Einordnung in eine Festigkeitsklasse und eine Berechnung der Brettschichtholzfestigkeit des mehrschichtigen Prüfbauteils nach [22]. Diese Berechnung ist in Kapitel 6-1.2 angeführt und vergleicht die gemessenen Werte der Zugfestigkeit der Duo-Balken mit den errechneten Werten der Zugfestigkeit.

Die Einordnung in die jeweilige T-Klasse erfolgt in Tabelle 5 nach ÖNORM EN 14080 [4]. Diese Norm legt die Anforderungen für geklebte Schichtholzprodukte, wie zum Beispiel Brett- und Balkenschichtholz, fest. Auf Grundlage der charakteristischen Festigkeitskennwerte der Einzellamellen kann eine Klassifizierung in T-Klassen vorgenommen werden.

Die Zugfestigkeit von 12,04 N/mm<sup>2</sup> lässt eine Einstufung in die T-Klasse T12 zu. Das Vollholzmaterial ist somit der Vollholz-Festigkeitsklasse C20 zuzuordnen. Der 5-Prozent-Quantilwert der Zugfestigkeit mit empirischer Verteilung ist um 40 Prozent höher, als der errechnete charakteristische Wert der Zugfestigkeit mit Lognormalverteilung. Dies kann unter Umständen auf eine geringe Anzahl der Prüfergebnisse zurückzuführen sein (großer  $k_s$ -Faktor). Bei Betrachtung des empirisch ermittelten Wertes (16,7 N/mm<sup>2</sup>) ist eine Einstufung in die T-Klasse T16 möglich. In Tabelle 6, nach ÖNORM EN 14358 [3], erfolgt eine Einordnung in die Brettschichtholz-Festigkeitsklasse mit Hilfe der T-Klassen der Brettlamellen. Die T-Klasse T12 erlaubt eine Zuordnung zur Festigkeitsklasse GL 20h bis GL 22h des Brettschichtholzes. Für die T-Klasse T16 ergibt sich eine Festigkeitsklasse von GL 26h.

**Tabelle 5: Charakteristische Festigkeitseigenschaften für T-Klassen nach ÖNORM EN 14080 [4]**

T-Klasse der Brettlamellen	$f_{t,0,1,k}$
T8 (C14)	8
T9	9
T10 (C16)	10
T11 (C18)	11
T12 (C20)	12
T13 (C22)	13
T14 (C24)	14
T14,5	14,5
T15	15
T16 (C27)	16
T18 (C30)	18
T21 (C35)	21
T22	22
T24 (C40)	24
T26	26
T27 (C45)	27
T28	28
T30 (C50)	30

**Tabelle 6: Balkenaufbau von homogenem Brettschichtholz und Mindestwerte für die Keilzinkenbiegefestigkeit in Lamellen [N/mm<sup>2</sup>]**

Festigkeitsklasse des Brettschichtholzes	Festigkeitsklasse der Brettlamellen	$f_{m,j,k}$
GL 20h	T10	25
GL 20h	T11	22
GL 22h	T13	25
GL 24h	T14	30
GL 26h	T16	33
GL 28h	T18	36
GL 30h	T21	38
GL 30h	T22	37
GL 32h	T24	41
GL 32h	T26	38



**Bruchbilder / Versagensformen:**

Die folgenden Abbildungen zeigen die typischen Bruchursachen und Bruchbilder der geprüften Versuchskörper.



*Abbildung 38: Astansammlung*



*Abbildung 39: Kantenast*





**Abbildung 40: Lokale Schrägfaser**



**Abbildung 41: Flügelast**



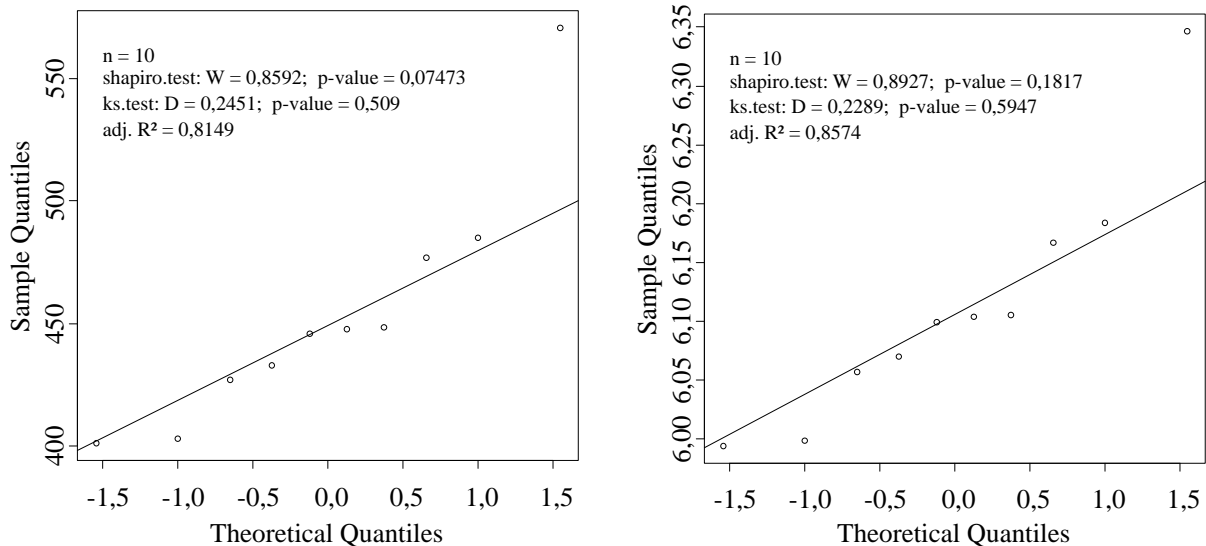
Abbildung 42: Längsriss



Abbildung 43: Sprödbruch

## 6-1.2 ZUGPRÜFUNGEN DUOQUERSCHNITT; PRÜFREIHE „VA1“

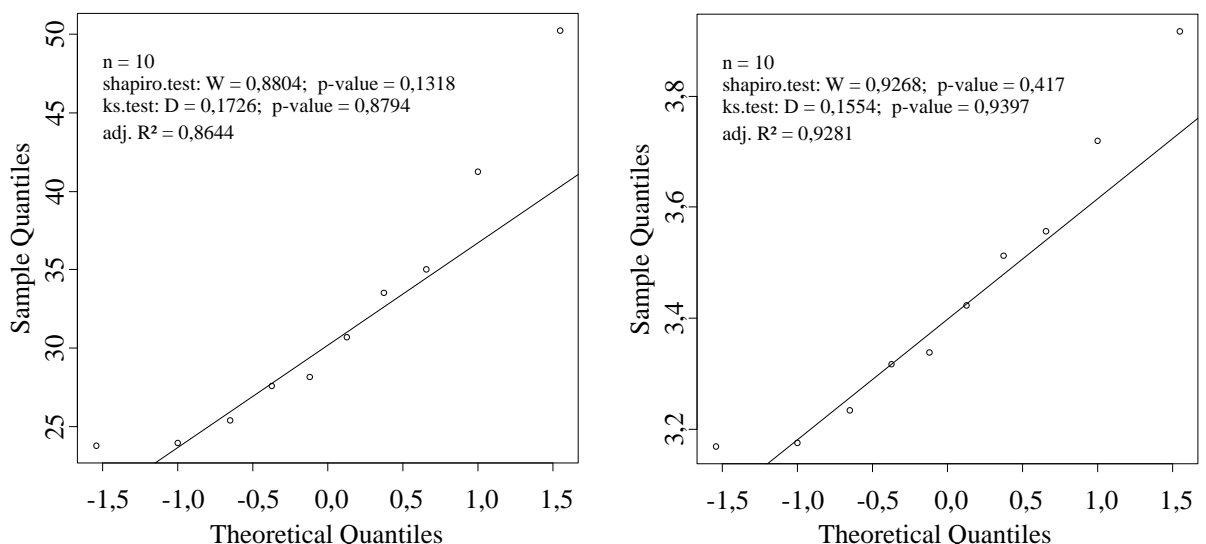
Abbildung 44 zeigt die QQ-Plots für die Normal- und Lognormalverteilung der Rohdichte. Das Bestimmtheitsmaß und die Signifikanztests nach Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov werden in den Diagrammen ausgewiesen.



**Abbildung 44: Modellvergleich Rohdichte; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung**

Das Bestimmtheitsmaß „adjusted R<sup>2</sup>“ und der Kolmogorov-Smirnov-Test erreichen, wie auch bei den Einzellamellen zu beobachten, bei der Lognormalverteilung höhere Werte. Die Daten können somit durch die Lognormalverteilung besser angenähert werden.

In Abbildung 45 sind die QQ-Plots für die Normal- und Lognormalverteilung der Zugfestigkeit dargestellt. Die Diagramme beinhalten die Analysewerte für das Bestimmtheitsmaß und die Signifikanztests nach Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov.

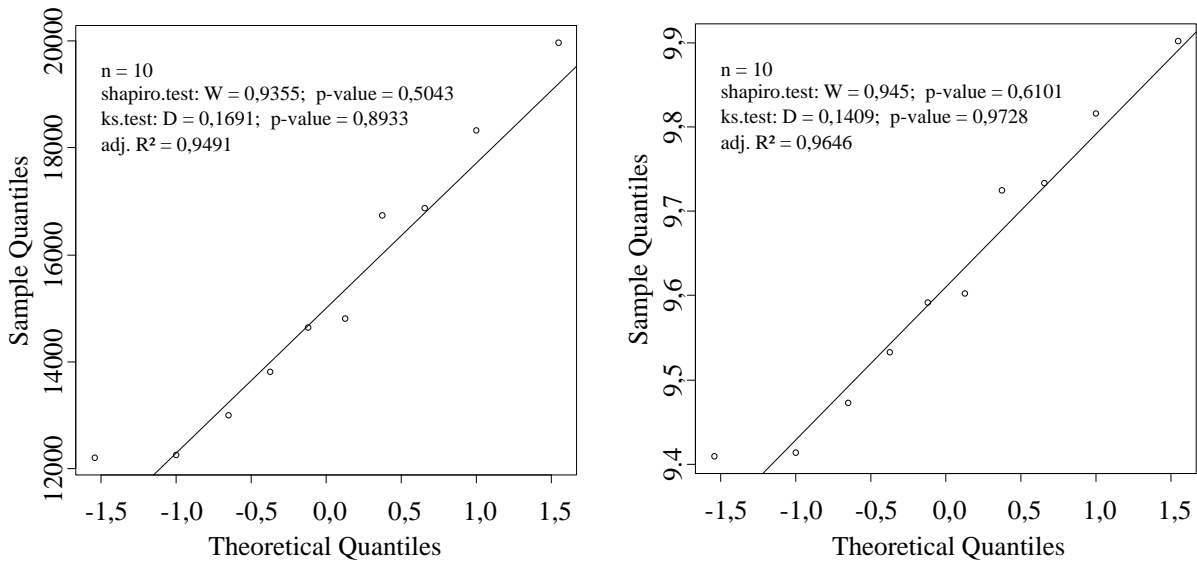


**Abbildung 45: Modellvergleich Zugfestigkeit; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung**

Durch ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß, welches bei der Lognormalverteilung erreicht wird – im Gegensatz zu den Einzellamellen bei denen die Normalverteilung höhere Werte liefert – bietet diese Verteilung eine gute Annäherung an die aus den Versuchen ermittelten Zugfestigkeitswerten.



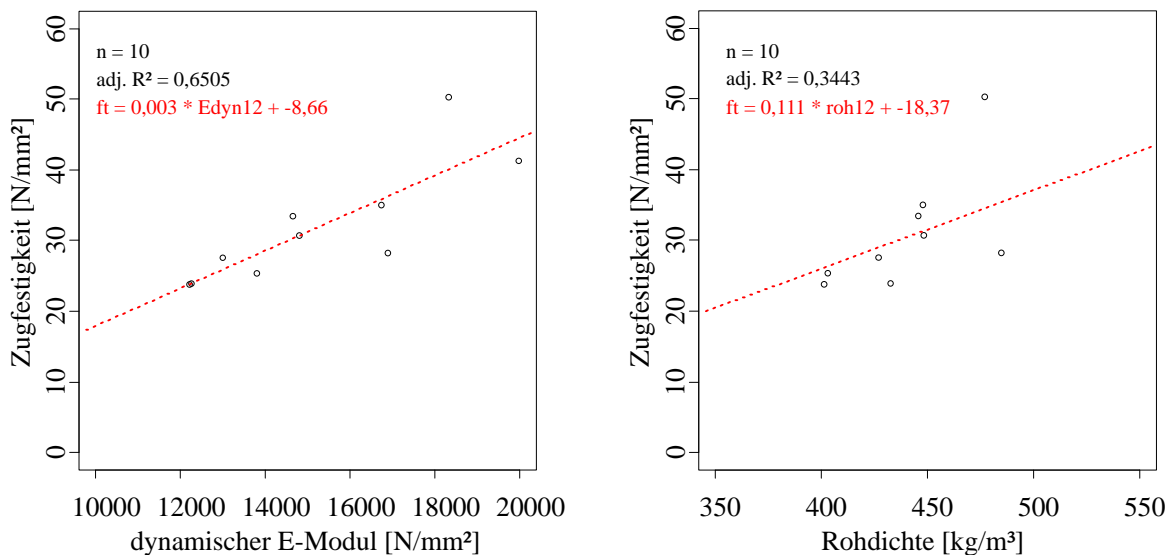
Die QQ-Plots für die Normal- und Lognormalverteilung der dynamischen E-Moduln und das damit berechnete Bestimmtheitsmaß, wie auch die Signifikanztests nach Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov sind in Abbildung 46 ersichtlich.



**Abbildung 46: Modellvergleich dynamischer E-Modul; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung**

Die Lognormalverteilung bietet eine gute Annäherung an die Werte der dynamischen E-Moduln.

Die Zusammenhänge zwischen den Zugfestigkeiten und der dynamischen E-Moduln sowie zwischen Zugfestigkeit und Rohdichte sind in Abbildung 47 dargestellt.



**Abbildung 47: links: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und dynamischem E-Modul; rechts: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und Rohdichte**

Die Korrelation zwischen der Zugfestigkeit und dem dynamischen E-Modul kann mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,6506 als hoch angesehen werden.

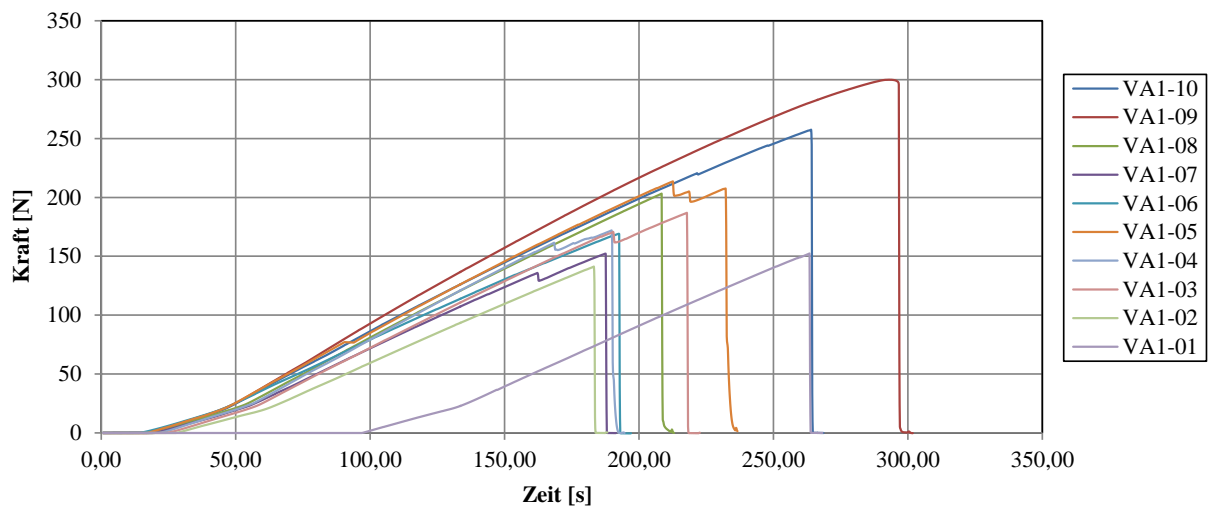
Mit einem Wert von 0,3443 ist die Korrelation zwischen Zugfestigkeit und Rohdichte geringer. Dies wird, wie bereits erläutert, durch das fehlerbehaftete (Äste) Material begründet. Die Äste steigern durch ihre höhere Rohdichte die Rohdichte des Gesamtmaterials, schwächen allerdings die Werte der Zugfestigkeit des Holzes.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Prüfreihe „VA1“ ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Im Anhang B-2 ist eine ausführliche Ergebnisaufstellung beigelegt.

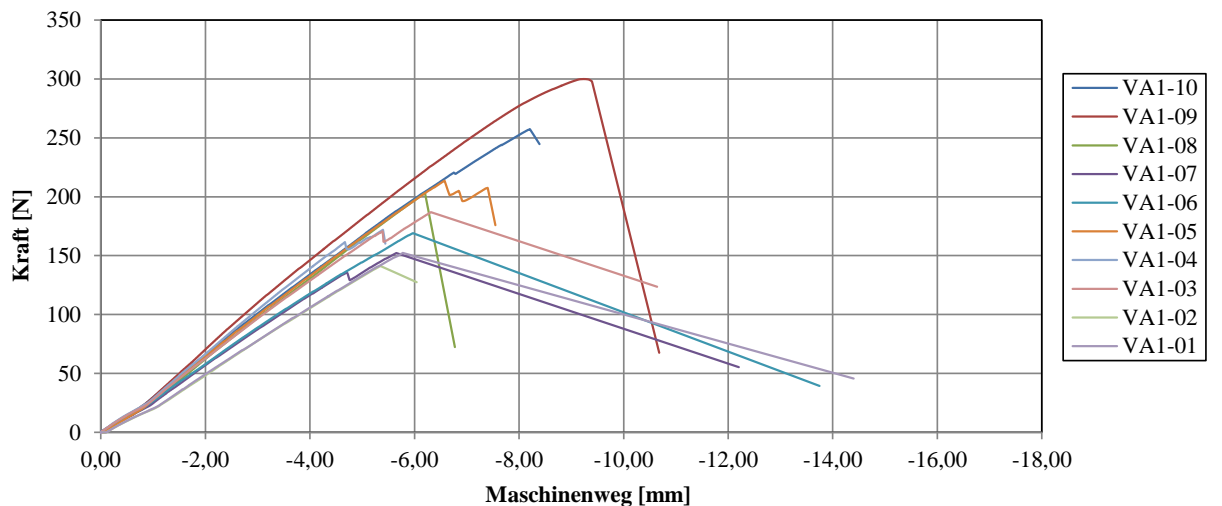
**Tabelle 7: Auswertung; Prüfreihe „VA1“**

n = 10	$\rho$	u	$\rho_{12}$	t	v	$v_{12}$	$E_{dyn}$	$E_{dyn,12}$	F	$f_{t,0}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Min	399	10,9	401	355	5323	5323	12137	12202	287	23,8
Max	570	11,6	571	399	6201	6201	19939	19977	607	50,3
Mittelwert	452	11,2	454	378	5782	5782	15208	15264	386	32,0
Median	445	11,2	447	376	5801	5801	14670	14722	355	29,4
Standardabw.	46,8	0,2	46,7	13,7	261	260	2496	2504	96,8	8,02
COV	10,4%	2,17%	10,3%	3,61%	4,51%	4,51%	16,4%	16,4%	25,1%	25,1%
5% Quantile	400	10,9	402	357	5410	5410	12173	12228	288	23,8

Abbildung 48 und Abbildung 49 zeigen das Kraft-Zeit-Diagramm und das Kraft-Maschinenweg-Diagramm der durchgeführten Versuche mit Duo-Balken.



**Abbildung 48: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „VA1“**



**Abbildung 49: Kraft-Maschinenweg-Diagramm; Prüfreihe „VA1“**

### Berechnung Zugfestigkeit Brettschichtholz

Wie bereits in Kapitel 6-1.2 erwähnt, kann von der ermittelten Zugfestigkeit der Einzellamellen auf die Zugfestigkeit des Brettschichtholzes geschlossen werden. Die Werte aus den Versuchen werden nach ÖNORM EN 14358 [3] in charakteristische Werte umgerechnet. Mit diesen charakteristischen Zugfestigkeiten der Einzellamellen  $f_{t,0,l,k}$  kann mit den Formeln nach [22] die Zugfestigkeit von mehrschichtigem Brettschichtholz  $f_{t,0,g,k}$  ermittelt werden.

$$f_{t,0,g,k} = f_{t,0,l,k,average} \cdot k_{size,l,t,0} \cdot k_{sys,l,t,0} \quad (6.4)$$

$f_{t,0,g,k}$	charakteristische Zugfestigkeit des Brettschichtholzes [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{t,0,l,k,average}$	Mittelwert der charakteristischen Zugfestigkeiten der Brettware [N/mm <sup>2</sup> ]
$k_{size,l,t,0}$	Volumenbeiwert [-]
$k_{sys,l,t,0}$	Systembeiwert [-]

mit:

$$k_{sys,l,t,0} = \min[(0,075 \cdot \ln(n) + 1); (1,20)] \quad \text{für} \quad COV-f_{t,0,l} = 25 \pm 5 \% \quad (6.5)$$

$$k_{sys,l,t,0} = \min[(0,130 \cdot \ln(n) + 1); (1,35)] \quad \text{für} \quad COV-f_{t,0,l} = 35 \pm 5 \% \quad (6.6)$$

$k_{sys,l,t,0}$	Systembeiwert [-]
n	Anzahl interagierender Lamellen [-]

$$k_{size,l,t,0} = \left(\frac{l_l}{2000}\right)^{0,10} \cdot \left(\frac{w_l}{150}\right)^{0,10} \quad (6.7)$$

$k_{size,l,t,0}$	Volumenbeiwert [-]
$l_l$	Bauteillänge [mm]; wenn $l_l \geq 1000$ mm, sonst $l_l = 1000$ mm
$w_l$	Bauteilbreite [mm]; wenn $w_l \geq 80$ mm, sonst $w_l = 80$ mm

Die mittlere Zugfestigkeit der Einzellamellen, ermittelt durch Versuche, ergibt sich zu:

$$f_{t,0,l,mean} = 25,55 \text{ N/mm}^2$$

Mit der Formel (6.3) nach ÖNORM EN 14358 [3] wird, wie bereits in Kapitel 6-1.1 erklärt, aus der versuchstechnisch ermittelten Zugfestigkeit auf eine charakteristische Festigkeit umgerechnet. Diese Umrechnung ergibt eine Zugfestigkeit von:

$$f_{t,0,l,k} = 12,04 \text{ N/mm}^2$$

Mit Formel (6.5) ergibt sich ein Systembeiwert von:

$$k_{sys,l,t,0} = 1,09$$

Der Volumenbeiwert  $k_{size,l,t,0}$  wird mit Formel (6.7) berechnet:

$$k_{size,l,t,0} = 1,04$$

Der nach dem Modell nach [22] in Formel (6.4) ermittelte charakteristische Wert der Zugfestigkeit für einen zweilamelligen Brettschichtholzbalken ergibt sich zu:

$$f_{t,0,g,k} = 13,65 \text{ N/mm}^2$$

Der charakteristische Zugfestigkeitswert aus den Versuchen beträgt nach der Umrechnung nach ÖNORM EN 14358 [3] ein Wert von:

$$f_{t,0,g,k} = 19,39 \text{ N/mm}^2$$

Der versuchstechnisch ermittelte Wert liegt somit um 42 Prozent höher als der Wert nach dem Modell nach [22]. Die große Abweichung ist auf die geringe Prüfanzahl und den damit verbundenen hohen  $k_s$ -Wert zurückzuführen.

Bei der Berechnung der charakteristischen Zugfestigkeit mit dem empirisch ermittelten 5-Prozent-Quantilwert (16,7 N/mm<sup>2</sup>) beträgt der Wert:

$$f_{t,0,g,k} = 18,93 \text{ N/mm}^2$$

Verglichen mit dem empirisch ermittelten 5-Prozent-Quantilwert der geprüften Duo-Querschnitte, ergibt sich eine Abweichung von 20 Prozent.

**Bruchbilder / Versagensformen:**

Die folgenden Abbildungen zeigen die typischen Bruchursachen und Bruchbilder der geprüften Versuchskörper.



Abbildung 50: Astansammlung



Abbildung 51: Kantenast





Abbildung 52: Lokale Schrägfaser



Abbildung 53: Flügelast



Abbildung 54: Längsriß



Abbildung 55: Sprödbruch

### 6-1.3 HAUPTVERSUCHE; PRÜFREIHE „A“

Die Versuche der Prüfreihe „A“ sind als Stahl-Holz-Verbindung mit zweischichtigen Brettschichtholzträgern und außenliegenden Stahlblechen, wie in Kapitel 5 erklärt, durchgeführt worden. Als Verbindungsmittel wurden selbstbohrende Holzschrauben verwendet, welche unter einem Winkel von 45 Grad eingeschraubt wurden. Um bei den gekreuzten Schrauben eine Kollision zu vermeiden, wurden sie in einem Winkel von fünf Grad nach oben, beziehungsweise nach unten, eingeschraubt.

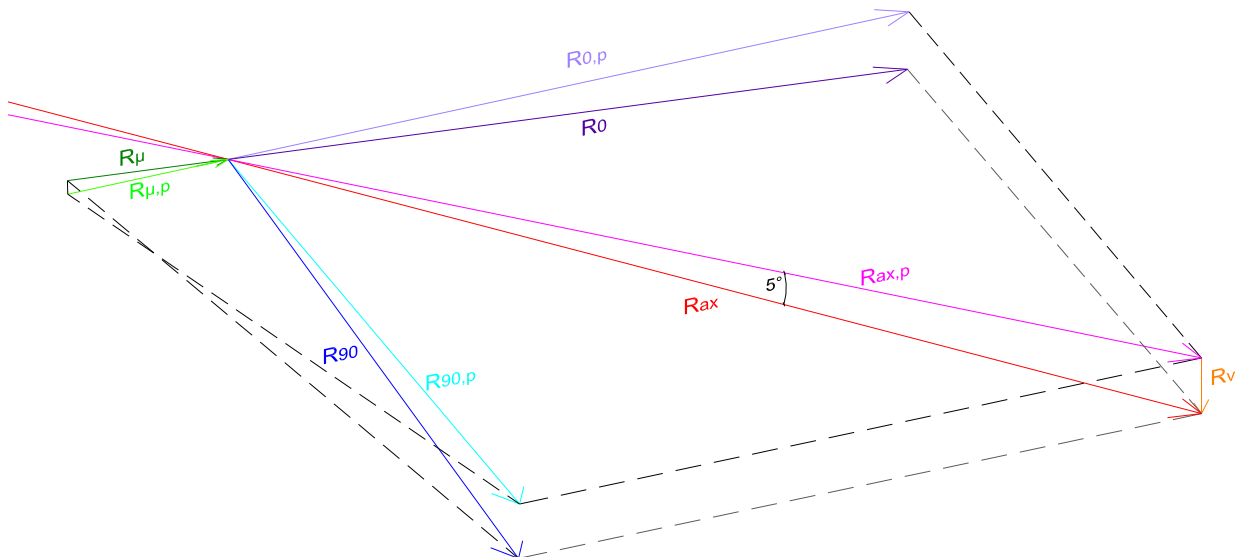


Abbildung 56: Kräfdreieck 3D; Kraftrichtungen der Abscher- und Axialkomponeten

Durch die Schrägstellung der Verbindungsmittel in Richtung der Kraft, tritt in den Schrauben eine axiale Kraftbeanspruchung  $R_{ax}$  auf. Diese Kraft kann, wie in Abbildung 56 ersichtlich, in einen Anteil normal zur Holzfaser  $R_{90}$  und in einen Anteil in Holzfaserrichtung  $R_0$  aufgeteilt werden. Durch den Reibungsanteil  $R_\mu$  ergibt sich weiters eine Kraft in Faserlängsrichtung. Aufgrund der fünf Grad geneigte Einschraubung entsteht eine Kraftkomponente in z-Richtung. Diese Kraft  $R_v$ , aber vor allem die Abscherkomponente  $R_0$ , erzeugt im Holz Querzug. Wenn die Querzugfestigkeit, welche einen stark streuenden Charakter besitzt, lokal überschritten wird, kommt es zu einem Aufspalten des Holzteiles entlang der beanspruchten Lochwandung. Diese Versagensart wird auch als Spaltzugversagen beschrieben.

Bei den Versuchen der Prüfreihe „A“ traten häufig Querzugversagen auf. Es ist zu vermuten, dass das geringe Holzvolumen und die vorherrschenden Mindestabstände, wie in Abbildung 58 ersichtlich, ein Versagen zufolge Aufspaltens begünstigen. Durch eine kontinuierlich, von Versuch zu Versuch, gesteigerte Anzahl an Querzugverstärkungen mit Schrauben 90 Grad zur tragenden Schraubenachse, siehe Abbildung 59, wurde schließlich ein Spaltversagen verhindert, wodurch Nettoquerschnittversagen erreicht werden konnte. Abbildung 57 zeigt typische Beispiele dieses Versagensfalles „Aufspalten“.





Abbildung 57: Aufspalten; Prüfreihe „A“

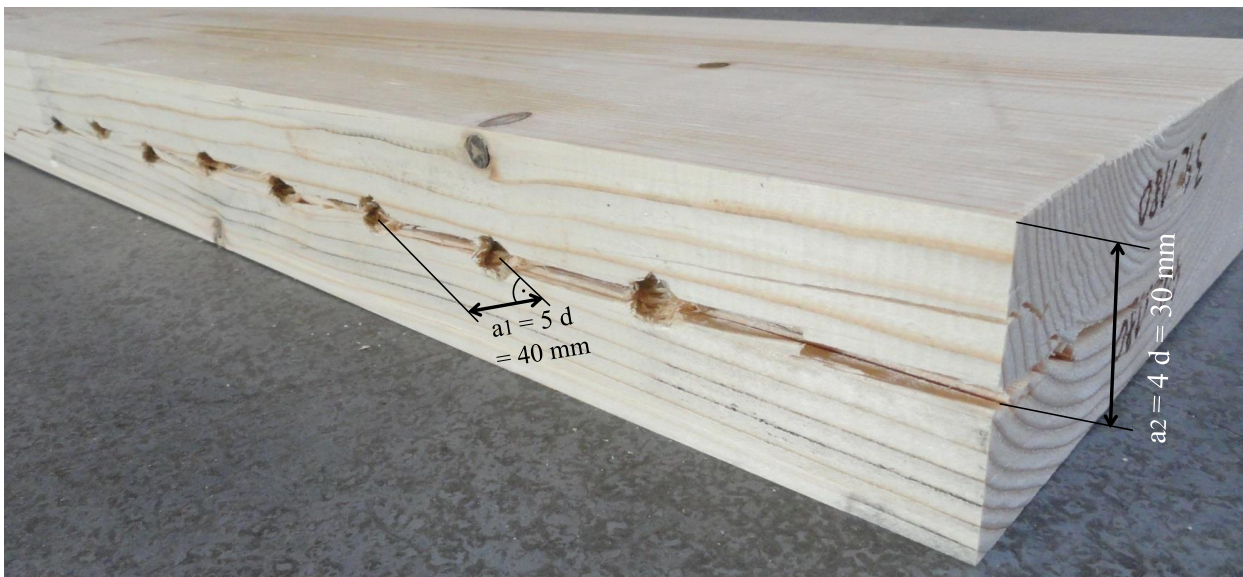
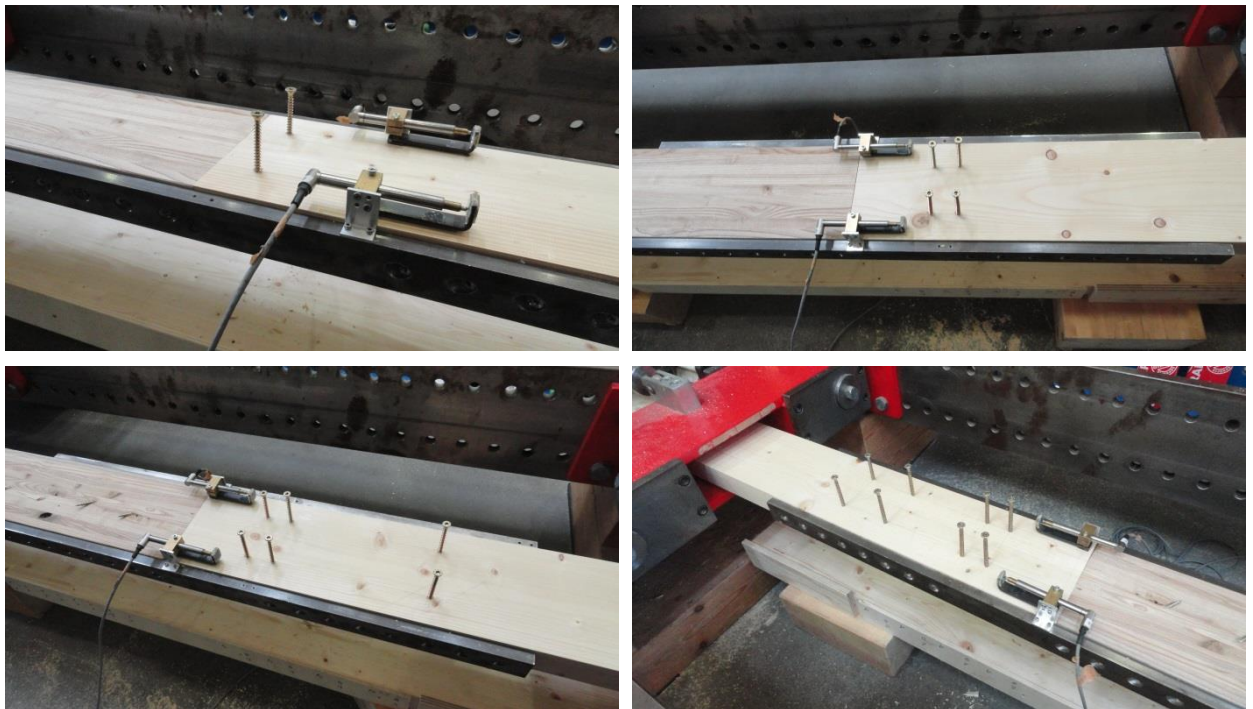
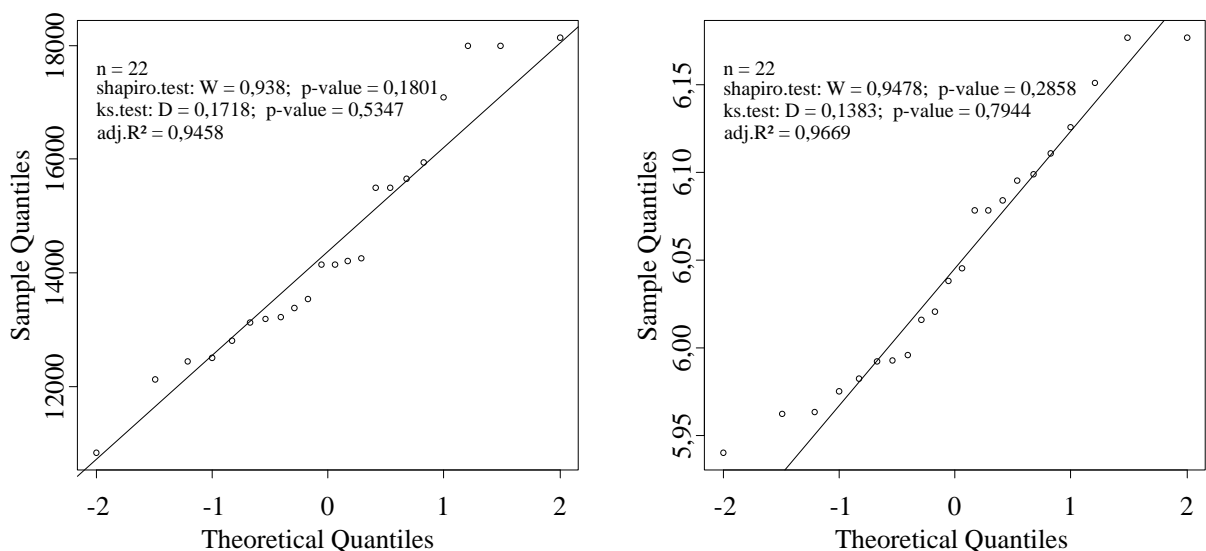


Abbildung 58: Mindestabstände; Prüfreihe „A“



**Abbildung 59:** *Querzugverstärkungen; links oben: Querzugverstärkung mit zwei Schrauben im Vorholz; rechts oben: Querzugverstärkung mit vier Schrauben (vier im belasteten Hirnholzende); links unten: Querzugverstärkung mit sechs Schrauben; (vier im belasteten Hirnholzende, zwei zwischen den Schrauben); rechts unten: Querzugverstärkung mit acht Schrauben; (vier im belasteten Hirnholzende, vier zwischen den Schrauben);*

Abbildung 60 zeigt eine empirische Rohdichteverteilung, welche einer Normal- und einer Lognormalverteilung gegenübergestellt ist. Das Bestimmtheitsmaß und die Signifikanztests nach Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov werden in den Diagrammen abgebildet.



**Abbildung 60:** *Modellvergleich Rohdichte für Normalverteilung (links) und Lognormalverteilung (rechts)*

Bei der Lognormalverteilung werden höhere Werte für das Bestimmtheitsmaß „adjusted R<sup>2</sup>“ und den Kolmogorov-Smirnov-Test erreicht, als bei der Normalverteilung. Die Daten werden somit durch die Lognormalverteilung besser idealisiert.

Die QQ-Plots für die Normal- und Lognormalverteilung der dynamischen E-Moduln und das damit berechnete Bestimmtheitsmaß, wie auch die Signifikanztests nach Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov sind in Abbildung 61 ersichtlich.

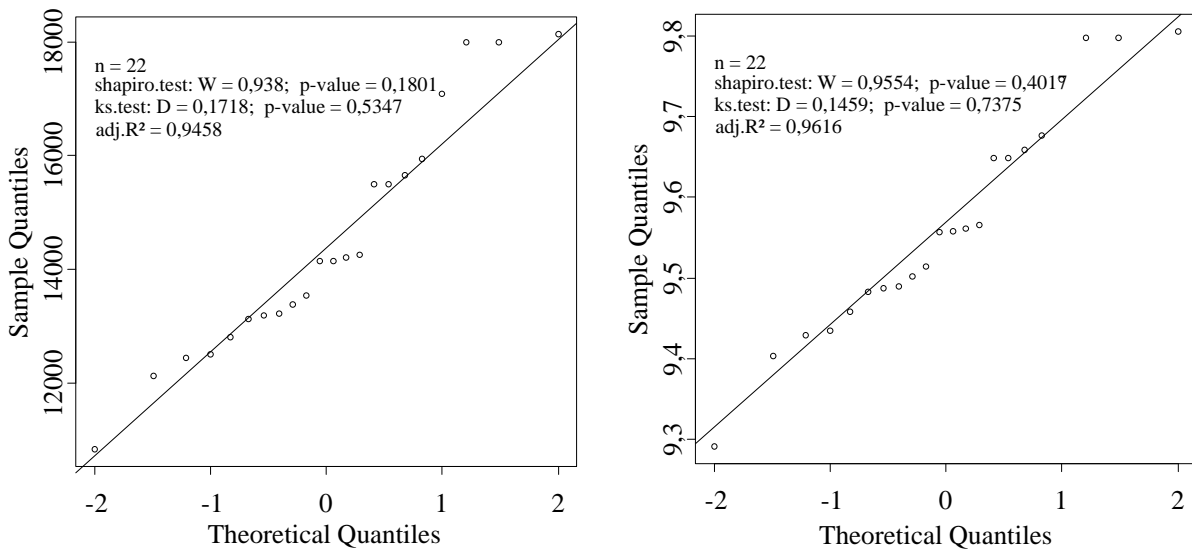


Abbildung 61: Modellvergleich dynamischer E-Modul: links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung

Die Lognormalverteilung bietet demnach eine höhere Annäherungsrate als die Normalverteilung.

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die statistische Auswertung der Hauptversuche der Prüfreihe A mit Unterscheidung der Bruchursachen. Die genauen Ergebnisse der einzelnen Prüfkörper sind Anhang B-3 zu entnehmen. In den folgenden Kraft-Weg-Diagrammen und Kraft-Zeit-Diagrammen sind die Arbeitslinien der einzelnen Versuche getrennt nach Bruchursachen dargestellt.

Tabelle 8: Auswertung; Prüfreihe „A“; Bruttoquerschnittsbruch

n = 3	$\rho$	u	$\rho_{12}$	t	v	$v_{12}$	$E_{\text{dyn}}$	$E_{\text{dyn},12}$	$F_{\text{max}}$	$F_{\text{max}} / (n \cdot 2)$	$\sigma_{\text{Bruch}}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Min	387	10,9	388	309	5296	5295	10841	10902	256	16,0	21,2
Max	392	11,2	394	340	5827	5827	13224	13276	308	19,3	25,6
Mittelwert	389	11,1	390	320	5644	5643	12401	12456	276	17,2	22,9
Median	387	11,2	389	310	5808	5808	13139	13189	263	16,4	21,8
Standardabw.	2,46	0,17	2,3	14,4	246	246	1104	1099	23,2	1,45	1,92
COV	0,63%	1,51%	0,60%	4,50%	4,36%	4,36%	8,90%	8,82%	8,41%	8,41%	8,40%
5% Quantile	387	10,9	389	309	5347	5347	11071	11131	257	16,1	21,3



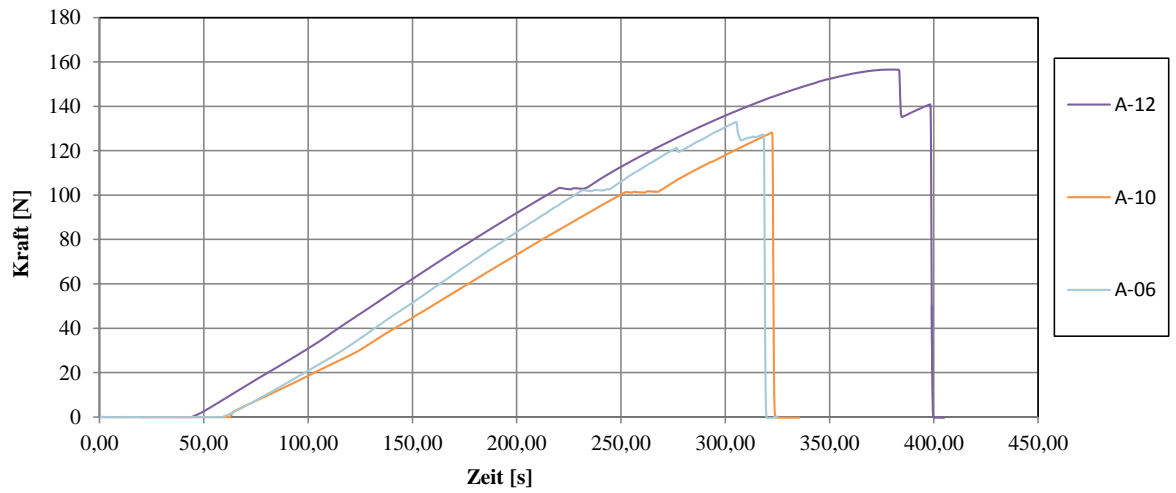


Abbildung 62: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „A“; Bruttoquerschnittsbruch

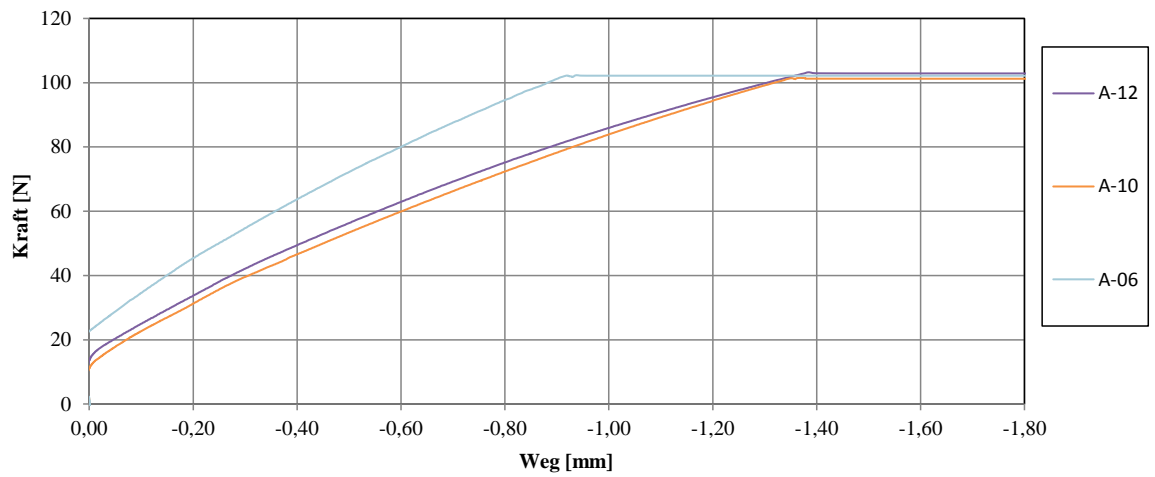


Abbildung 63: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „A“; Bruttoquerschnittsbruch

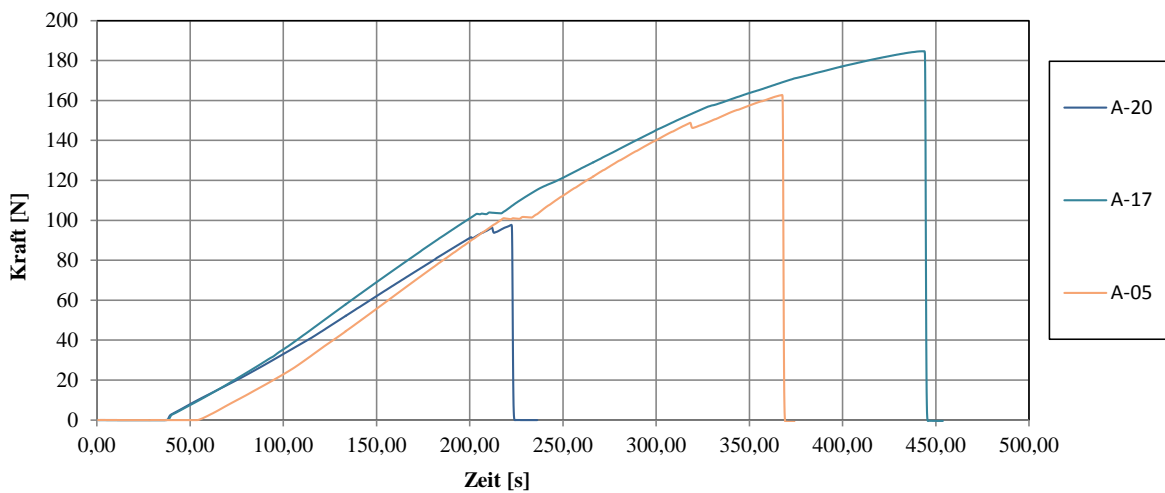


Abbildung 64: Bruttoquerschnittsbruch

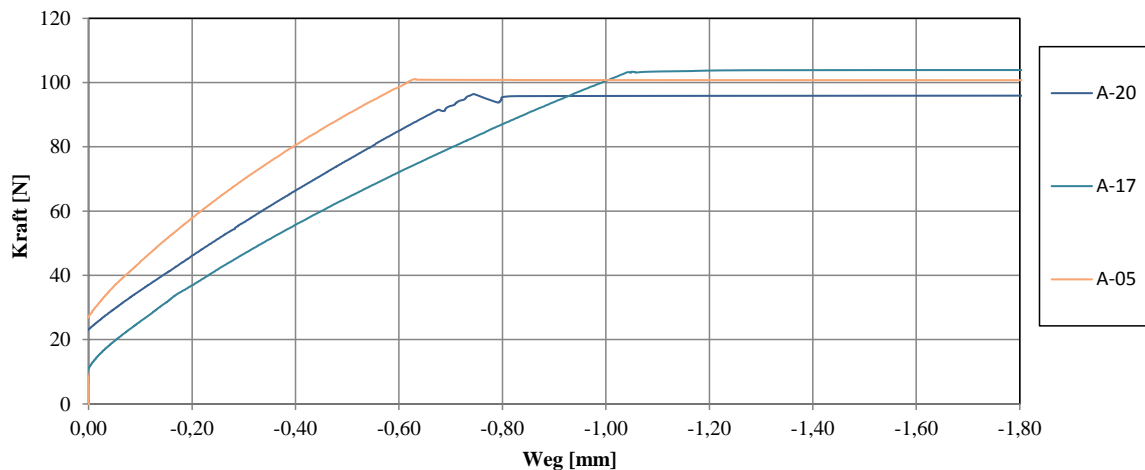
Als Mischbruch werden jene geprüften Versuchskörper bezeichnet, welche sowohl Merkmale eines Nettoquerschnittsbruches, als auch die eines Bruttoquerschnittsbruches aufweisen.

**Tabelle 9: Auswertung; Prüfreihe „A“; Mischbruch**

n = 3	$\rho$	u	$\rho_{12}$	t	v	$v_{12}$	$E_{dyn}$	$E_{dyn,12}$	$F_{max}$	$F_{max} / (n^*2)$	$\sigma_{Bruch}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Min	417	10,9	419	302	5540	5540	12807	12862	197	12,3	16,4
Max	448	11,1	451	325	5963	5962	15940	16024	369	23,1	30,5
Mittelwert	436	11,0	438	310	5815	5815	14799	14870	296	18,5	24,5
Median	443	11,1	445	303	5942	5942	15652	15724	321	20,0	26,6
Standardabw.	13,61	0,08	13,8	10,6	195	195	1414	1425	72,3	4,52	5,96
COV	3,12%	0,75%	3,15%	3,42%	3,35%	3,35%	9,55%	9,58%	24,44%	24,44%	24,34%
5% Quantile	420	10,9	422	302	5580	5580	13091	13148	210	13,1	17,4



**Abbildung 65: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „A“; Mischbruch**



**Abbildung 66: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „A“; Mischbruch**

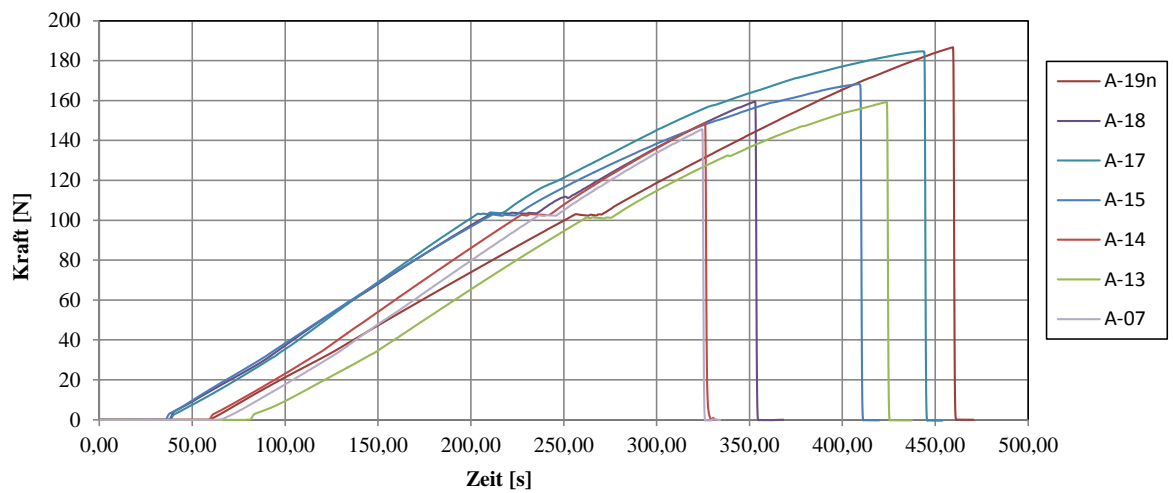
In diesem und allen folgenden Kraft-Weg-Diagrammen ist ein Schlupf zu Beginn der Kraftaufbringung zu beobachten, der auf eine vorhandene Haftreibung zwischen Stahlflasche und Holzoberfläche zurückzuführen ist. Dieser Schlupf beträgt ungefähr fünf bis zehn Prozent der Maximalkraft.



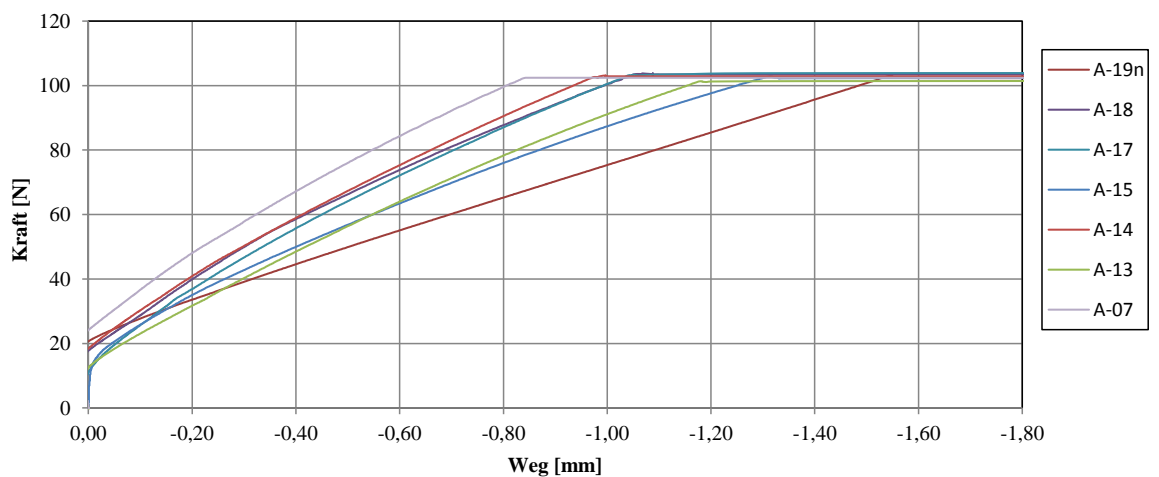
Nachfolgend sind die Ergebnisauswertungen und Prüfdiagramme der Bauteile mit Nettoversagen, sowie typische Bruchbilder dargestellt.

**Tabelle 10: Auswertung; Prüfreihe „A“; Nettoquerschnittsbruch**

n = 7	$\rho$	u	$\rho_{12}$	t	v	$v_{12}$	$E_{dyn}$	$E_{dyn,12}$	$F_{max}$	$F_{max} / (n \cdot 2)$	$\sigma_{Bruch}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Min	379	10,6	380	301	5456	5456	12132	12181	288	18,0	23,9
Max	448	11,4	451	330	5982	5981	15940	16024	370	23,1	30,6
Mittelwert	414	11,1	416	314	5743	5742	13696	13759	326	20,4	27,1
Median	410	11,1	412	314	5735	5735	13188	13248	319	19,9	26,4
Standardabw.	21,01	0,24	21,4	10,7	196	196	1422	1439	30,1	1,88	2,48
COV	5,07%	2,17%	5,15%	3,42%	3,41%	3,41%	10,4%	10,5%	9,23%	9,23%	9,18%
5% Quantile	385	10,7	386	301	5471	5471	12227	12275	290	18,2	24,1



**Abbildung 67: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „A“; Nettoquerschnittsbruch**



**Abbildung 68: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „A“; Nettoquerschnittsbruch**



*Abbildung 69: Nettoquerschnittsbruch*



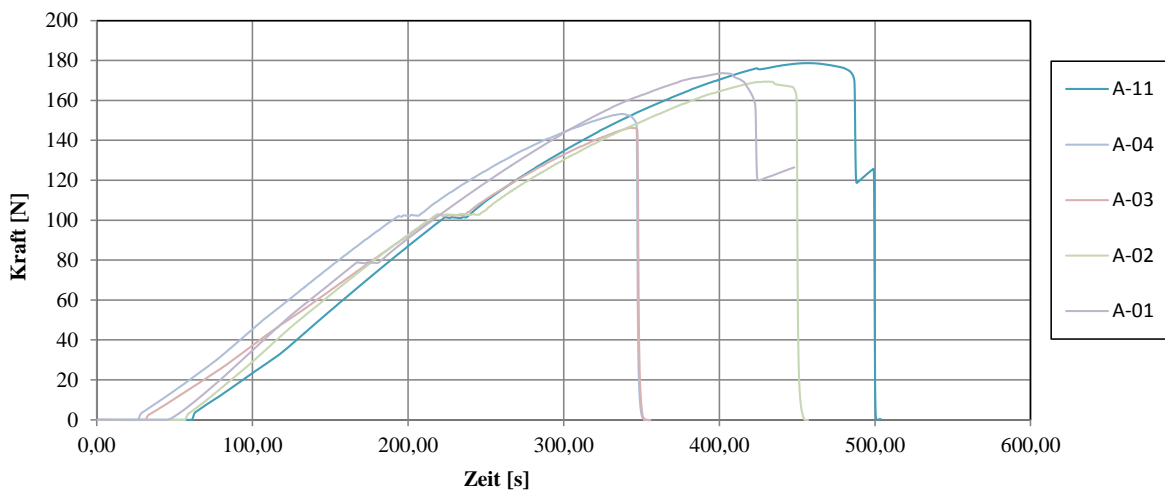
**Abbildung 70: Nettoquerschnittsbruch**

Abbildung 69 und Abbildung 70 zeigen ein Versagen des Holzbauteils im Nettoquerschnitt. Der Bruch verläuft entlang der Schraubenachse und erzeugt somit die typische Keilform des Nettobruches. Die Holzfasern reißen entlang der Schraubenachse ab. Es war zu beobachten, dass Äste häufig bruchauslösend sind. Die Äste schwächen den Bauteilquerschnitt zusätzlich zu den bereits vorhandenen Schwächungen durch Schrauben. In Bereichen der größten Querschnittsschwächung, welche auch häufig Äste beinhaltet, kommt es sodann zum Bruch.

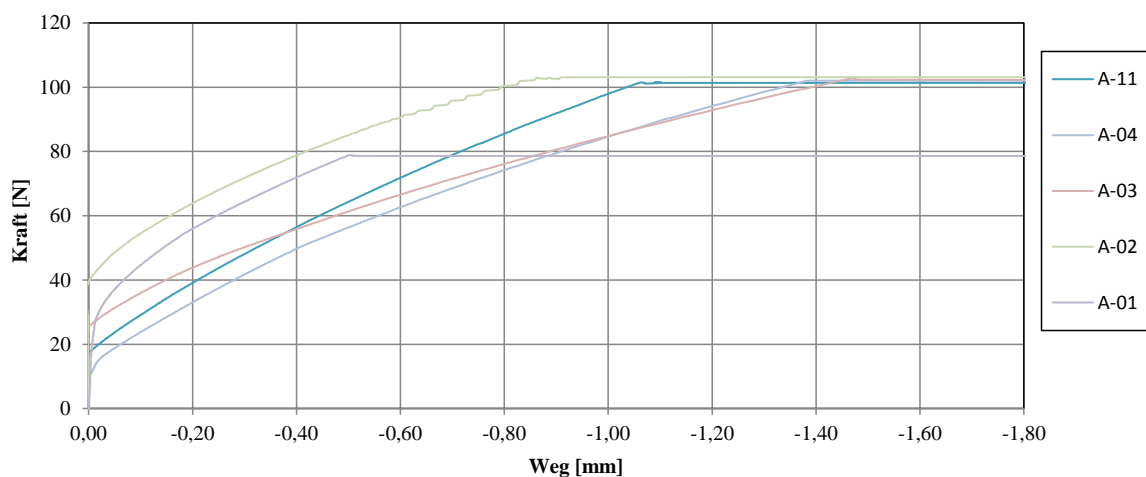
Die Auswertung der Probekörper, welche auf Querkzug versagten, ist nachfolgend erläutert.

**Tabelle 11: Auswertung; Prüfreihe „A“; Querkzugversagen**

n = 5	$\rho$	u	$\rho_{12}$	t	v	$v_{12}$	$E_{dyn}$	$E_{dyn,12}$	$F_{max}$	$F_{max} / (n^*2)$	$\sigma_{Bruch}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Min	398	10,9	400	289	5681	5681	13550	13599	287	17,9	23,7
Max	467	11,3	469	317	6230	6230	18141	18210	355	22,2	29,4
Mittelwert	432	11,2	434	302	5965	5964	15437	15500	322	20,7	26,7
Median	442	11,2	444	302	5962	5962	14265	14316	334	20,9	27,6
Standardabw.	28,76	0,12	28,8	10,1	198	198	1823	1829	24,4	1,47	2,02
COV	6,65%	1,10%	6,63%	3,33%	3,32%	3,31%	11,81%	11,80%	7,58%	7,12%	7,57%
5% Quantile	398	11,0	400	290	5710	5710	13670	13723	290	18,5	24,0



**Abbildung 71: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „A“; Querkzugversagen**

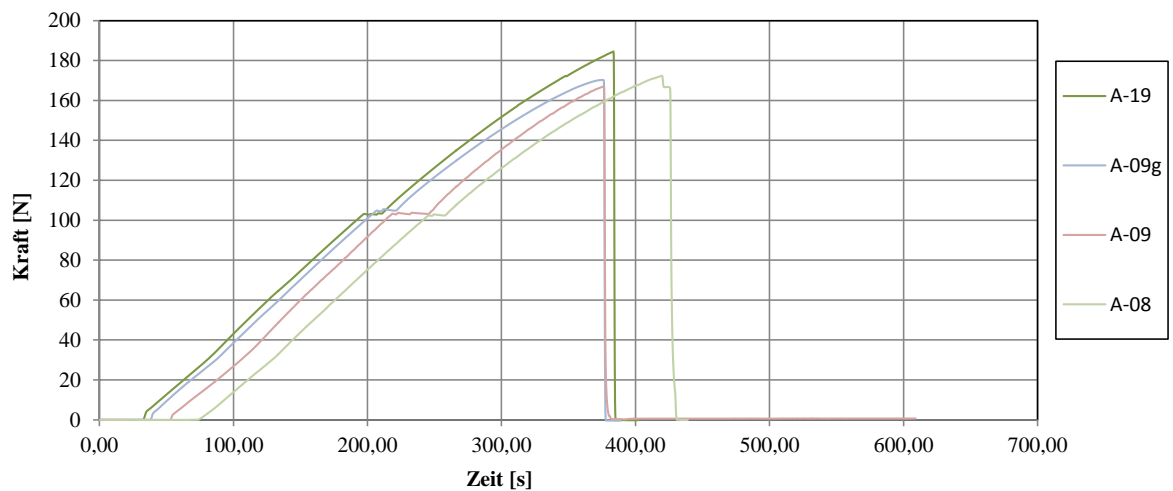


**Abbildung 72: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „A“; Querkzugversagen**

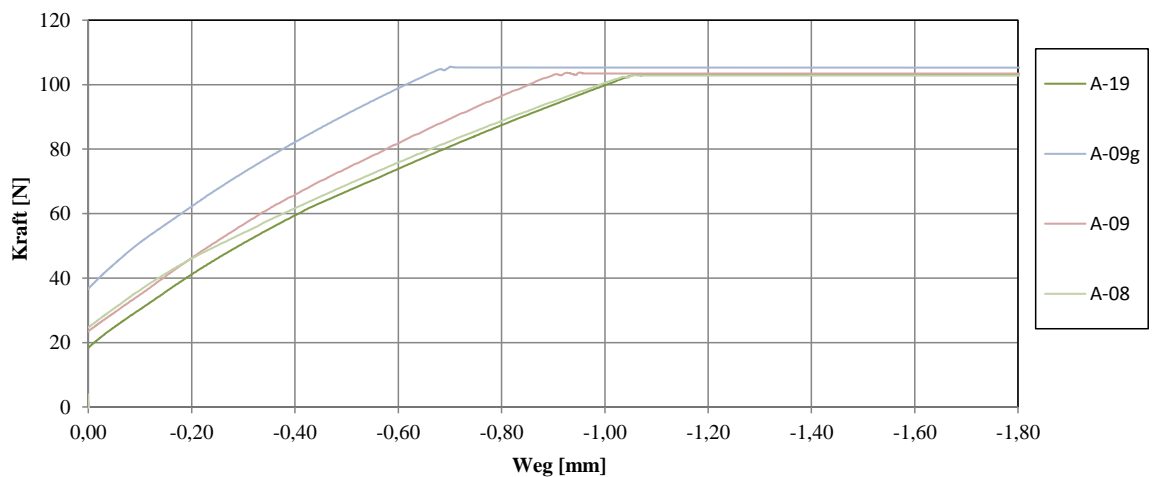
Ein Stahlbruchversagen bei Prüfkörpern ist in Tabelle 12 ausgewertet. Die Diagramme erläutern den Kraft-Zeit-Verlauf und den Kraft-Weg-Verlauf.

**Tabelle 12: Auswertung; Prüfreihe „A“; Stahlbruch**

n = 4	$\rho$	u	$\rho_{12}$	t	v	$v_{12}$	$E_{dyn}$	$E_{dyn,12}$	$F_{max}$	$F_{max} / (n \cdot 2)$	$\sigma_{Bruch}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Min	433	10,6	436	294	5698	5698	14206	14242	329	20,5	27,3
Max	480	11,5	482	316	6126	6126	17999	18067	366	22,9	30,3
Mittelwert	458	11,1	459	301	5983	5983	16427	16496	342	21,4	28,4
Median	459	11,2	460	298	6054	6053	16751	16838	337	21,1	28,0
Standardabw.	22,17	0,32	22,0	9,0	175	175	1638	1644	14,1	0,88	1,15
COV	4,85%	2,90%	4,79%	2,98%	2,92%	2,92%	9,97%	9,96%	4,12%	4,12%	4,05%
5% Quantile	434	10,7	437	294	5740	5740	14400	14447	330	20,6	27,3



**Abbildung 73: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „A“; Stahlbruch**



**Abbildung 74: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „A“; Stahlbruch**



In Abbildung 75 sind die Bruchkräfte der Probekörper, getrennt nach Bruchursache, als Boxplots dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Bruchkräfte der Brutto-Brüche unter den Bruchkräften der Netto-Brüche liegen. Ein Bruttoquerschnittsbruch ist ein Bruch des Holzes ohne Zutun des Verbindungsmittels und kann als Summe der in den Prüfreihe „VA“ und „VA1“ gezeigten Versagensformen bezeichnet werden. Als Mischbruch wurden jene Brüche definiert, die keiner Versagensart eindeutig zugeteilt werden konnten und eine Mischform von mehreren Versagensmechanismen aufwiesen. Es ist zu beobachten, dass die Spannungen bei Prüfkörpern mit Nettoquerschnittsversagen, welche mit einer Querkzugverstärkung versehen sind, geringfügig unter jenen liegen, welche ohne Querkzugverstärkung aufgespalten sind.

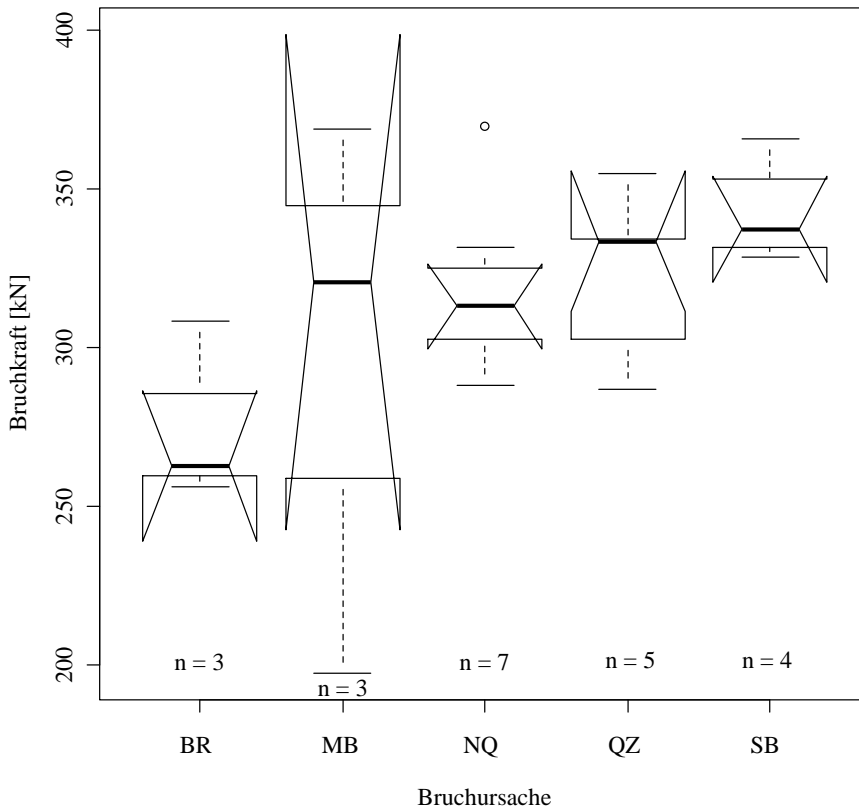


Abbildung 75: Vergleich der Bruchursachen; Prüfreihe „A“

In Abbildung 76 sind die Bruchkräfte der Prüfsreihe „A“ dargestellt, wobei für Prüfreihe „A“ nur die Nettoquerschnittsversagensfälle berücksichtigt sind. Die blaue Markierung gibt den Mittelwert der Spannungen wieder.

$$\sigma_{t,0,pred.} = f_{t,0,brutto} \cdot \frac{A_{netto}}{A_{brutto}} \quad (6.8)$$

Die Formeln (2.6) und (2.7) in Kapitel 2-2.4 erläuterten die jeweilige Berechnung der Nettoquerschnittsfläche nach [13] oder [33]. Die Spannung zufolge Formel (6.8) mit einer Nettoquerschnittsfläche nach [13], ist als roter Punkt gekennzeichnet. Die grüne Markierung berücksichtigt die Nettoquerschnittsfläche nach [33] in der Spannungsberechnung nach Formel (6.8). Es ist zu erkennen, dass die Spannungsberechnung mit der Querschnittsschwächung nach [13] mit Formel (2.6) am besten zum Mittelwert der Spannungen aus den Versuchsergebnissen übereinstimmt. Die Spannungen nach [13], weichen mit 26,83 N/mm<sup>2</sup> aber nur gering von den Spannungen nach [33], mit 27,69 N/mm<sup>2</sup> ab. Die berechneten Spannungen mit Formel (6.8) sind mit einer Nettoquerschnittsfläche nach [13] sind nur um drei Prozent geringer, als die Spannungen mit einer Nettoquerschnittsfläche nach [33], da sich die Schrauben bei dieser Prüfreihe nur wenig überkreuzen. Formel (2.7) nach [33] subtrahiert die projizierte Fläche der Schrauben ohne doppelten Abzug der sich überkreuzenden Bereiche, während Formel (2.6) nach [13] die gesamte projizierte Fläche der Schrauben mit Abzug der sich überkreuzenden Bereiche in Rechnung stellt.

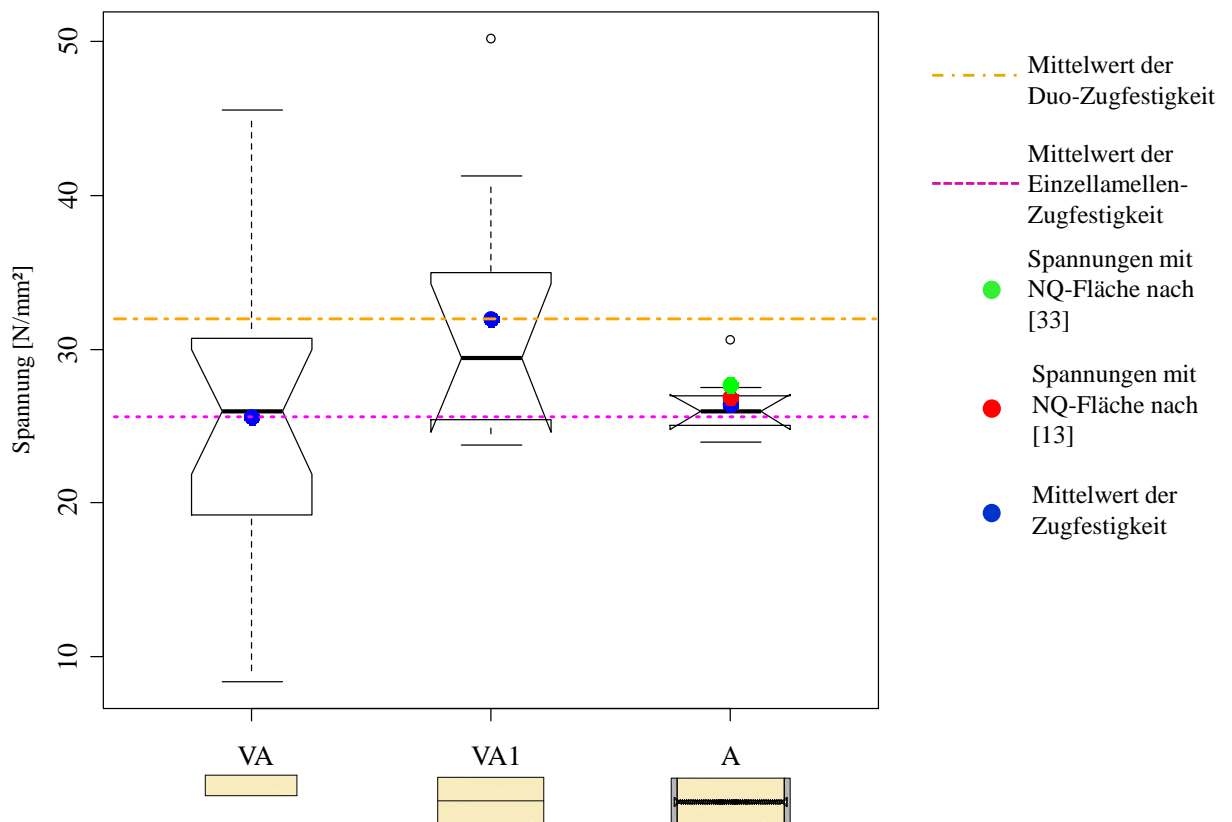


Abbildung 76: Vergleich der Spannungen im Querschnitt (Prüfreihe „A“ nur Nettoquerschnittsversagen)

## 6-2 PRÜFSERIE „B“

### 6-2.1 ZUGPRÜFUNGEN BRETTLAMELLE; PRÜFREIHE „VB“

Abbildung 77 und Abbildung 78 zeigen die QQ-Plots für die Normal- und Lognormalverteilung der Rohdichte und Zugfestigkeit. Das Bestimmtheitsmaß und die Signifikanztests nach Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov werden in den Diagrammen ausgewiesen.

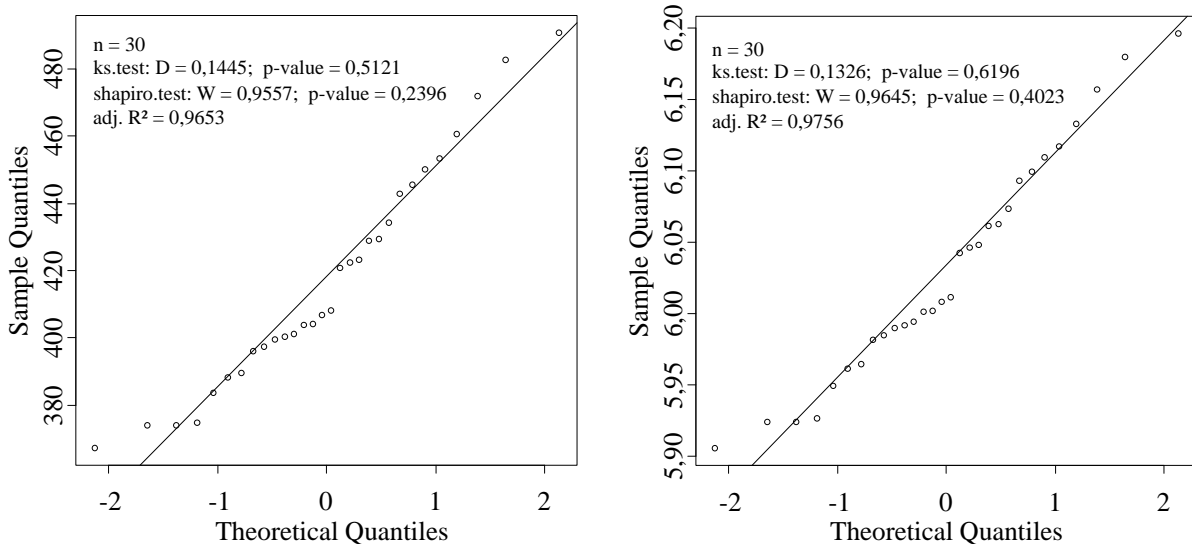


Abbildung 77: Modellvergleich Rohdichte für Normalverteilung (links) und Lognormalverteilung (rechts)

Das Bestimmtheitsmaß und beide Signifikanztests weisen für die Lognormalverteilung, wie auch bereits schon bei Prüfreihe „VA“ zu beobachten, höhere Werte auf. Die Daten können somit durch die Lognormalverteilung besser angenähert werden.

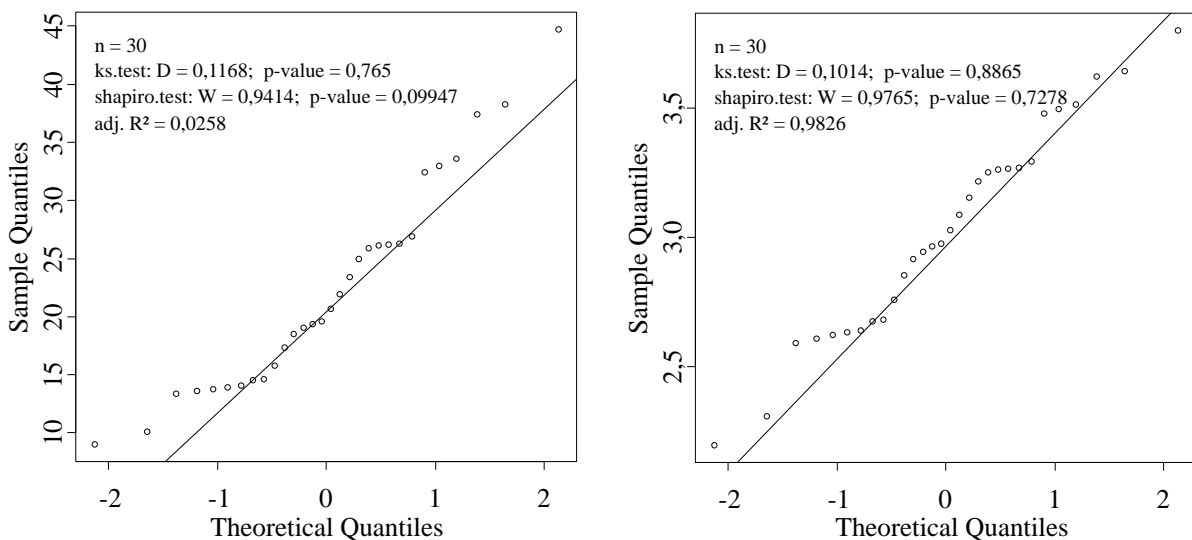
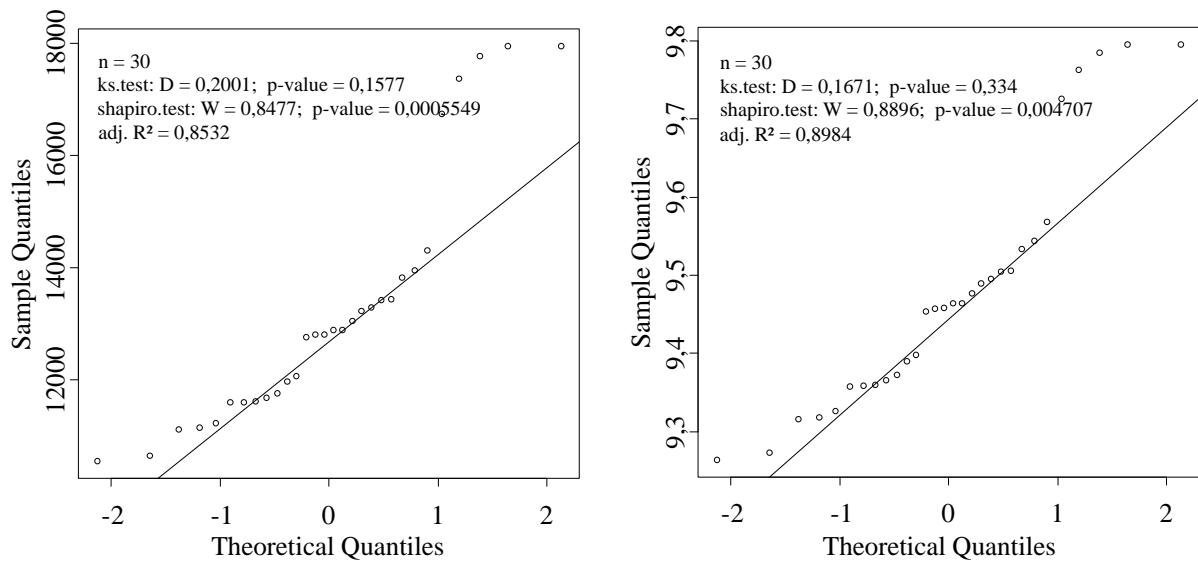


Abbildung 78: Modellvergleich Zugfestigkeit; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung

Die Ergebnisse der Signifikanztests und das Bestimmungsmaß weisen signifikant höhere Werte für die Lognormalverteilung auf, als für die Normalverteilung, im Gegensatz zu Prüfreihe „VA“, welche für die Normalverteilung eine bessere Annäherung bietet. Die logarithmisch verteilte Funktion kann als sehr gute Näherung für die vorliegenden Daten angenommen werden.

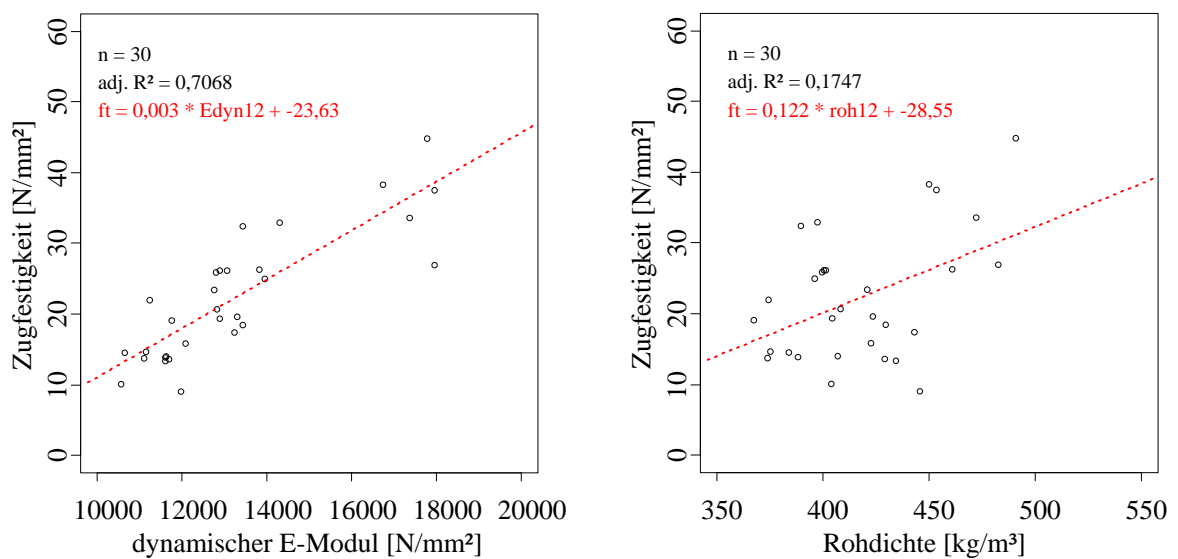


Die QQ-Plots für die Normal- und Lognormalverteilung der dynamischen E-Moduln ist in Abbildung 79 ersichtlich. Ebenfalls angegeben sind das Bestimmtheitsmaß und die Signifikanztests nach Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov.



**Abbildung 79: Modellvergleich dynamischer E-Modul; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung**

Die Normalverteilung bietet für die dynamischen E-Moduln eine günstigere Anpassung als die Lognormalverteilung.



**Abbildung 80: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und dynamischem E-Modul (links) und Korrelation zwischen Zugfestigkeit und Rohdichte (rechts)**

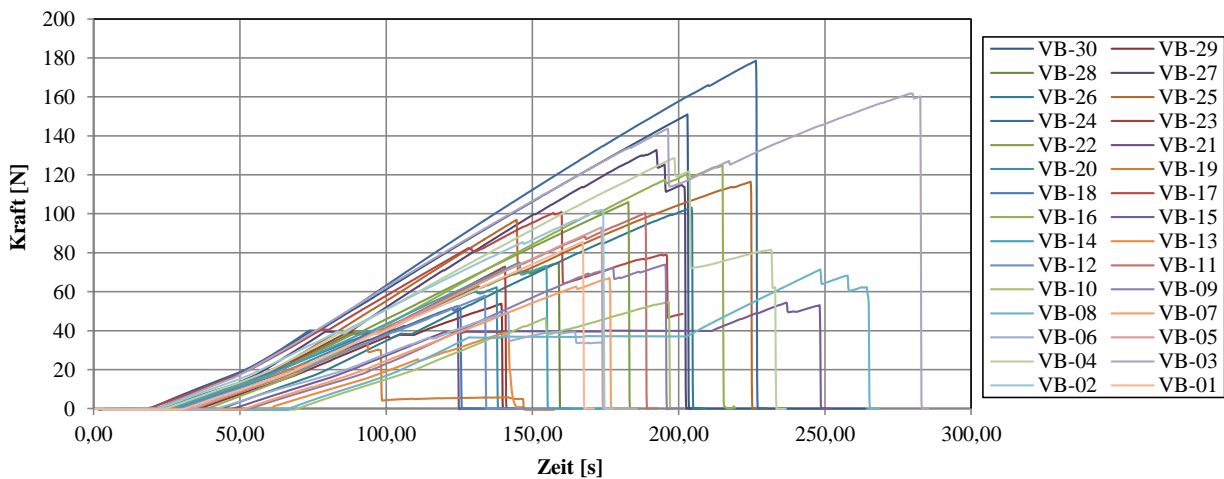
Abbildung 80 zeigt – im Gegensatz zu Prüfreihe „VA“ – mit einem adj.R<sup>2</sup>-Wert von 0.7068 eine hohe Korrelation zwischen der Zugfestigkeit und dem dynamischen E-Modul. Eine Korrelation zwischen Zugfestigkeit und Rohdichte ist, wie auch in Prüfreihe „VA“ beobachtbar, durch das Bestimmtheitsmaß mit dem Wert 0,1747 nicht festzustellen. Diese gering ausgeprägte Wechselbeziehung ist auf ein nicht merkmalsfreies Grundmaterial zurückzuführen, da Äste die Rohdichte des Querschnittes erhöhen, aber gleichzeitig, durch Umleitung der Fasern um die Äste, Schrägfasern erzeugen, welche den Kraftfluss stören und für eine Herabsetzung der Zugfestigkeit verantwortlich sind.

Die Zusammenfassung der Prüfreihe „VB“ ist in Tabelle 13 dargestellt. Eine ausführliche Ergebnisaufstellung ist im Anhang B-4 beigefügt.

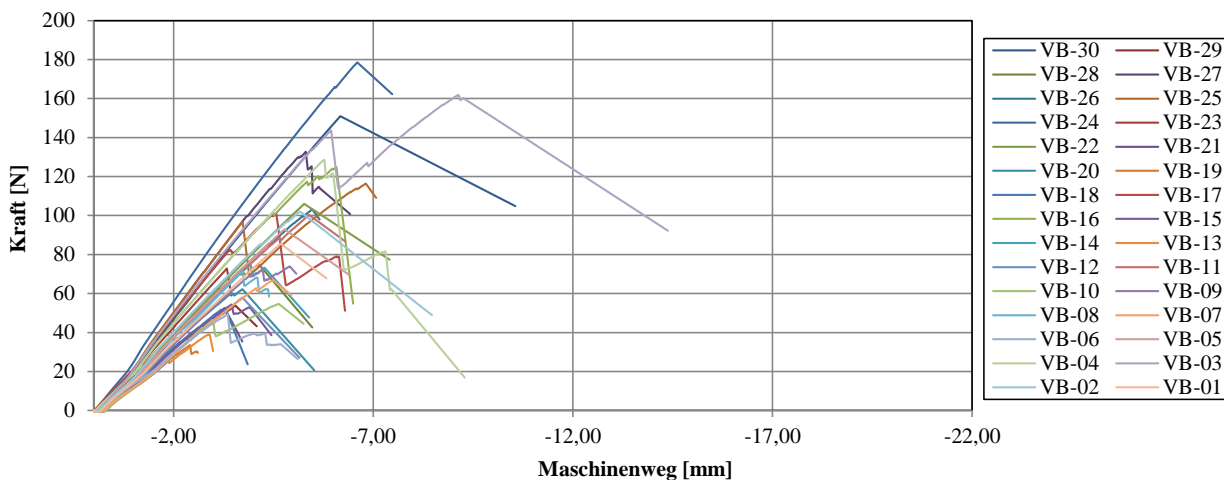
**Tabelle 13: Auswertung; Prüfreihe „VB“**

n = 30	$\rho$	u	$\rho_{12}$	t	v	$v_{12}$	$E_{dyn}$	$E_{dyn,12}$	F	$f_{t,0}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Min</b>	367	8,05	374	350	5111	5110	10555	10744	72,4	9,00
<b>Max</b>	491	9,11	498	431	6294	6293	17966	18252	360	44,8
<b>Mittelwert</b>	418	8,42	425	393	5617	5616	13256	13486	179	22,3
<b>Median</b>	408	8,36	415	394	5598	5597	12859	13092	162	20,1
<b>Standardabw.</b>	32,7	0,23	33,0	21,2	308	308	2160	2184	71,1	8,84
<b>COV</b>	7,84%	2,79%	7,77%	5,40%	5,48%	5,48%	16,3%	16,2%	39,7%	39,7%
<b>5% Quantile</b>	374	8,14	381	361	5177	5175	10863	11054	92,7	11,6

Abbildung 81 und Abbildung 82 bilden das Kraft-Maschinenweg-Diagramm und das Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfreihe „VB“ ab. Die einzelnen Versuchsergebnisse der Probekörper sind farblich dargestellt.



**Abbildung 81: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „VB“**



**Abbildung 82: Kraft-Maschinenweg-Diagramm; Prüfreihe „VB“**

**Klassifizierung der Brettlamellen für Brettschichtholz**

Die Umrechnung der Ergebniswerte der Prüfungen in charakteristische Werte erfolgt mit Hilfe von ÖNORM EN 14358 [3] und wurde bereits in Kapitel 6-1.1 erläutert. Mit den Formeln (6.1) bis (6.3) kann der charakteristische Wert der Zugfestigkeit aus den vorliegenden Versuchsergebnissen ermittelt werden, um eine Klassifizierung der Brettlamellen vornehmen zu können. Die Einordnung in die jeweilige T-Klasse erfolgt nach EN 14358 [3]. Diese Norm legt die Anforderungen für geklebte Schichtholzprodukte, wie zum Beispiel Brett- und Balkenschichtholz, fest. Auf Grundlage der charakteristischen Festigkeitskennwerte der Einzellamellen kann eine Klassifizierung in T-Klassen vorgenommen werden. Der Mittelwert laut Prüfungen beträgt 22,28 N/mm<sup>2</sup> für die Einzellamellen der Prüfreihe „VB“. Mit Formel (6.3) aus Kapitel 6-1.1 ergibt sich ein charakteristischer Wert für die Zugfestigkeit von 9,67 N/mm<sup>2</sup>. Diese Einzellamellenzugfestigkeit ermöglicht die Einordnung in eine Festigkeitsklasse mit Tabelle 14 und eine Berechnung der Brettschichtholzfestigkeit des geklebten Prüfbauteils nach [22]. Diese Berechnung vergleicht die gemessenen Werte der Zugfestigkeit der Duo-Balken mit den errechneten Werten der Zugfestigkeit und ist in Kapitel 6-1.2 angeführt.

Die Zugfestigkeit von 9,67 N/mm<sup>2</sup> lässt eine Einstufung in die T-Klassen T9 bis T10 zu. Mit dem empirisch ermittelten 5-Prozent-Quantilwert von 11,6 N/mm<sup>2</sup> ergibt sich eine T-Klasse von T11. Verglichen mit den Brettlamellen der Versuchsreihe A, sind die Brettlamellen der Versuchsreihe B in einer deutlich geringeren Klasse einzustufen.

***Tabelle 14: Charakteristische Festigkeitseigenschaften für T-Klassen nach ÖNORM EN 14080 [4]***

<b>T-Klasse der Brettlamellen</b>	<b><math>f_{t,0,1,k}</math></b>
T8 (C14)	8
T9	9
T10 (C16)	10
T11 (C18)	11
T12 (C20)	12
T13 (C22)	13
T14 (C24)	14
T14,5	14,5
T15	15
T16 (C27)	16
T18 (C30)	18
T21 (C35)	21
T22	22
T24 (C40)	24
T26	26
T27 (C45)	27
T28	28
T30 (C50)	30

Die Einordnung in eine Brettschichtholz-Festigkeitsklasse mit Hilfe der T-Klassen der Brettlamellen erfolgt mit

Tabelle 6 in Kapitel 6-1.1. Für T-Klassen T9 bis T10 liegt die zugehörige Festigkeitsklasse unter GL20h. Die T-Klasse T11 lässt eine Einstufung in die Brettschichtholzfestigkeitsklasse GL 20h zu.

**Bruchbilder / Versagensarten :**

Die folgenden Abbildungen zeigen die unterschiedlichen Bruchbilder der geprüften Probekörper.



*Abbildung 83: Astansammlung*



*Abbildung 84: Kantenast*



*Abbildung 85: Lokale Schrägfaser*



*Abbildung 86: Flügelast*





Abbildung 87: Längsriss



Abbildung 88: Sprödbruch



*Abbildung 89: Globale Schrägfaser*

## 6-2.2 ZUGPRÜFUNGEN DUOQUERSCHNITT; PRÜFREIHE „VB1“

Die folgenden Abbildungen zeigen die QQ-Plots für die Normal- und Lognormalverteilung der Rohdichte, der Zugfestigkeit und der dynamischen E-Moduln. Das Bestimmtheitsmaß und die Signifikanztests nach Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov werden in den Diagrammen dargestellt.

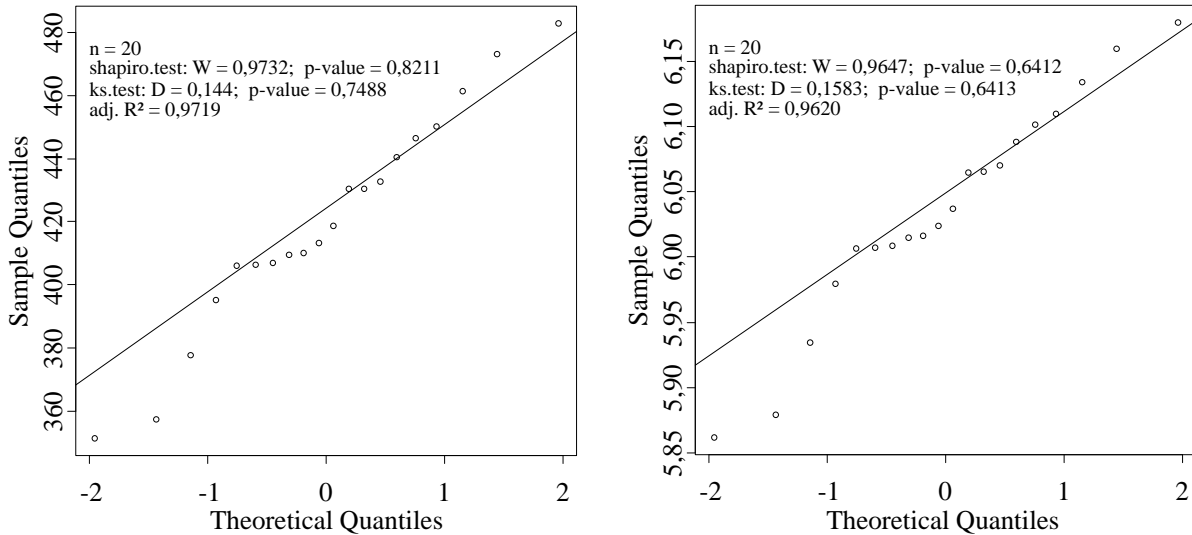


Abbildung 90: Modellvergleich Rohdichte: links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung

Das Bestimmtheitsmaß und beide Signifikanztests weisen für die Normalverteilung geringfügig höhere Werte auf als bei der Lognormalverteilung. Die Daten können durch die Normalverteilung etwas besser angenähert werden. Im Vergleich dazu ist die Rohdichte bei den Einzellamellen laut Prüfreihe „VB“ die Lognormalverteilung eine genauere Näherung.

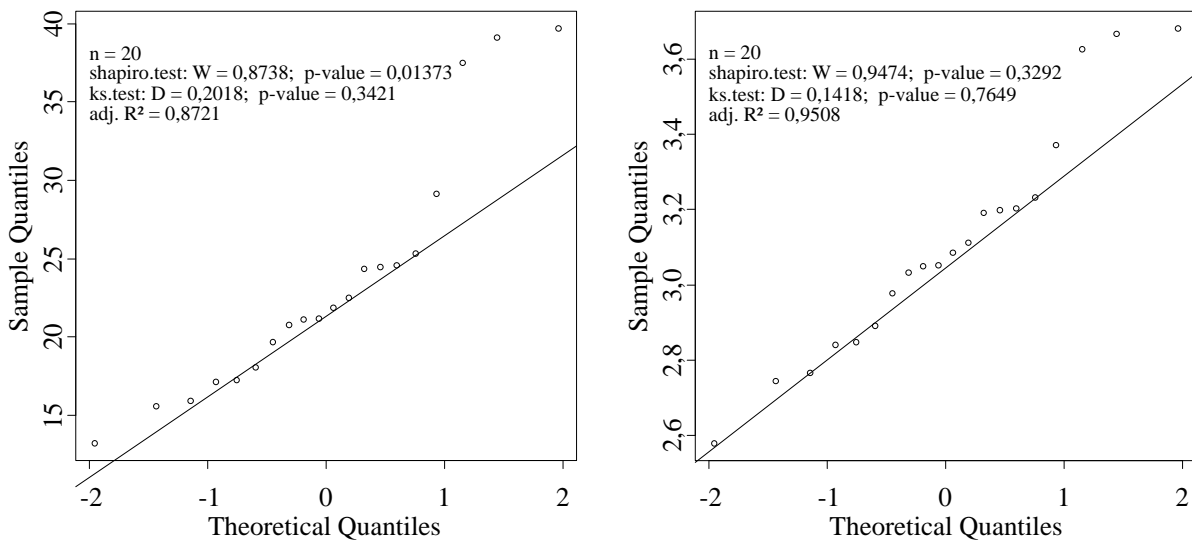
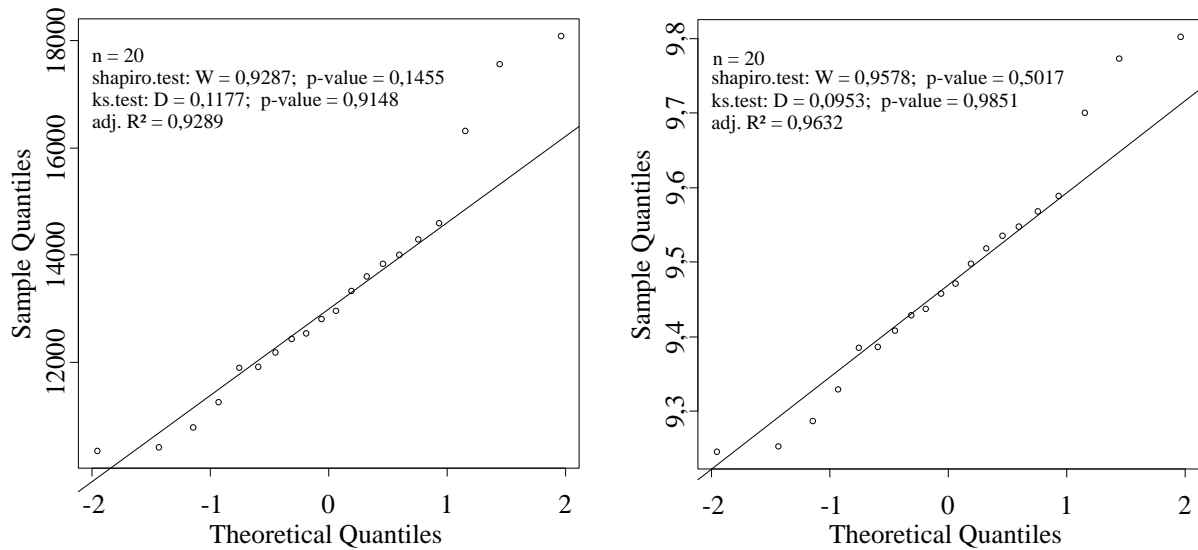


Abbildung 91: Modellvergleich Zugfestigkeit: links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung

Die Ergebnisse der Signifikanztests und das Bestimmungsmaß der Zugfestigkeitswerte weisen signifikant höhere Werte für die Lognormalverteilung auf, als für die Normalverteilung. Die logarithmisch verteilte Funktion kann als sehr gute Näherung für die vorliegenden Daten angenommen werden.

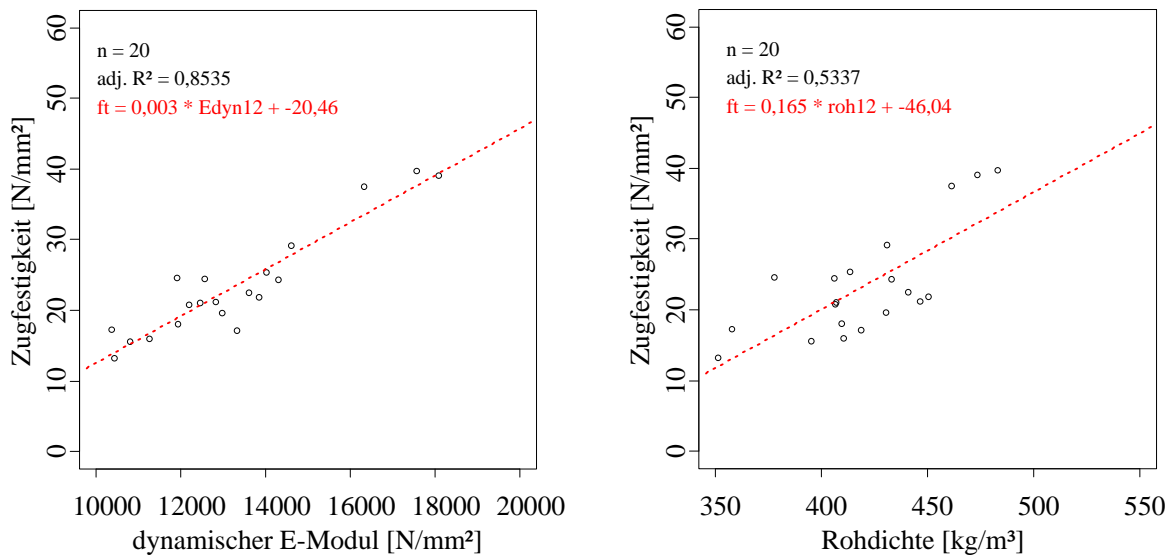


Die QQ-Plots für die Normal- und Lognormalverteilung der dynamischen E-Moduln ist in Abbildung 92 ersichtlich. Ebenfalls angegeben sind das Bestimmtheitsmaß und die Signifikanztests nach Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov.



**Abbildung 92: Modellvergleich dynamische E-Moduln: links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung**

Die Lognormalverteilung bietet für die dynamischen E-Moduln eine günstigere Anpassung als die normal verteilte Funktion. Abbildung 93 stellt die Zusammenhänge zwischen den Zugfestigkeiten und der dynamischen E-Moduln, den Zugfestigkeiten und der Rohdichte dar.



**Abbildung 93: links: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und dynamischem E-Modul; rechts: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und Rohdichte**

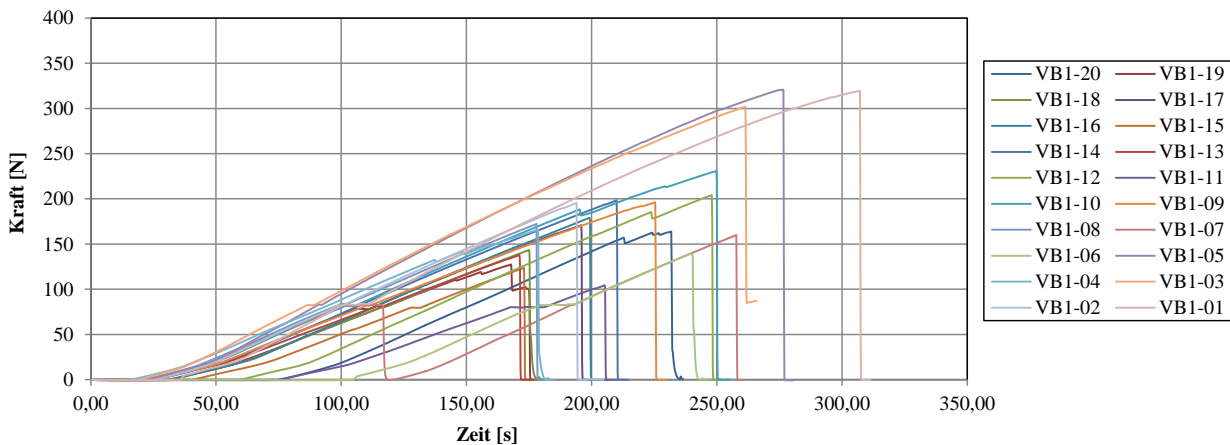
Abbildung 93 zeigt mit einem adj.R<sup>2</sup>-Wert von 0.8535 eine hohe Korrelation zwischen der Zugfestigkeit und dem dynamischen E-Modul. Die Korrelation zwischen Zugfestigkeit und Rohdichte ist mit einem Bestimmungsmaß von 0,5337 als geringer anzusehen. Die Ursachen dieses nur mäßig ausgeprägten Zusammenhanges sind in Kapitel 6-1.2 erklärt.

Die Zusammenfassung der Prüfreihe „VB1“ ist in Tabelle 15 dargestellt. Eine ausführliche Ergebnisaufstellung ist im Anhang B-5 beigefügt.

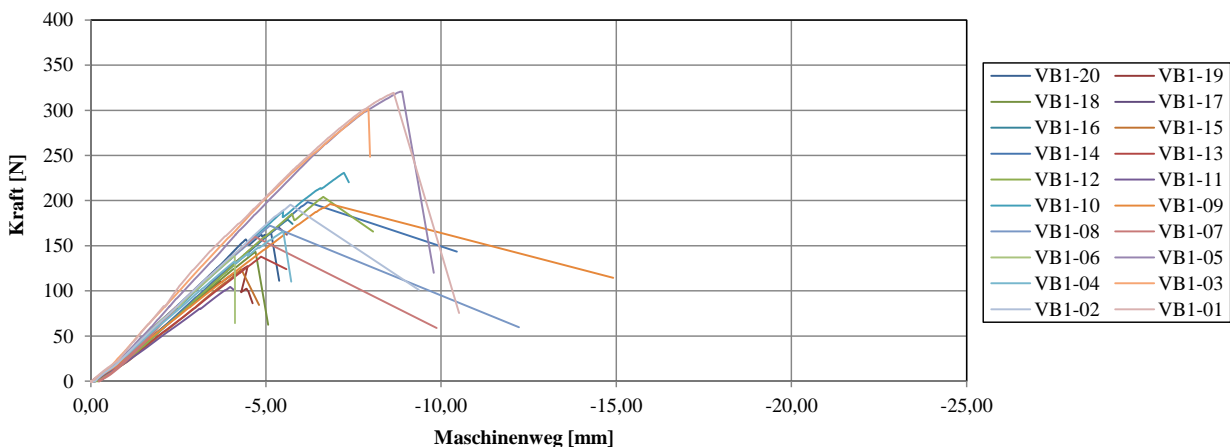
**Tabelle 15: Auswertung; Prüfreihe „VB1“**

n = 20	$\rho$	$u$	$\rho_{12}$	$t$	$v$	$v_{12}$	$E_{dyn}$	$E_{dyn,12}$	$F$	$f_{t,0}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Min</b>	351	7,77	359	356	5228	5227	10359	10553	212,04	13,2
<b>Max</b>	483	8,76	491	421	6183	6182	18095	18392	637,87	39,7
<b>Mittelwert</b>	420	8,29	428	394	5602	5600	13271	13510	375,87	23,4
<b>Median</b>	416	8,25	424	397	5551	5550	12899	13134	344,87	21,5
<b>Standardabw.</b>	33,8	0,27	34,1	17,1	250	250	2096	2123	120,18	7,47
<b>COV</b>	8,03%	3,26%	7,96%	4,35%	4,45%	4,46%	15,79%	15,7%	31,97%	31,9%
<b>5% Quantile</b>	357	7,78	364	365	5241	520	10429	10644	248,21	15,4

Die beiden unten abgebildeten Diagramme zeigen den Kraft-Maschinenweg und den Kraft-Zeitverlauf der einzelnen Versuche.



**Abbildung 94: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „VB1“**



**Abbildung 95: Kraft-Maschinenweg-Diagramm; Prüfreihe „VB1“**

Analog zu den Ausführungen in Kapitel 6-1.2 kann von der ermittelten Zugfestigkeit der Einzellamellen auf die Zugfestigkeit des Brettschichtholzes geschlossen werden. Die Werte aus den Versuchen werden mit der ÖNORM EN 14358 [3], wie bereits vorgestellt, in charakteristische Werte umgerechnet. Mit diesen charakteristischen Zugfestigkeiten der Einzellamellen  $f_{t,0,l,k}$  kann mit den Formeln nach [22], siehe Kapitel 6-1.2, die Zugfestigkeit von mehrschichtigem Brettschichtholz  $f_{t,0,g,k}$  ermittelt werden.

Die mittlere Zugfestigkeit der Einzellamellen ermittelt durch die Versuche VB ergibt sich zu:

$$f_{t,0,l,mean} = 22,28 \text{ N/mm}^2$$

Mit den Formel (6.4) bis (6.7) nach ÖNORM EN 14358[3] wird, wie bereits in Kapitel 6-1.1 erklärt, aus der versuchstechnisch ermittelten Zugfestigkeit auf eine charakteristische Festigkeit umgerechnet. Diese Umrechnung ergibt eine Zugfestigkeit von:

$$f_{t,0,l,k} = 9,67 \text{ N/mm}^2$$

Mit Formel (6.6) ergibt sich ein Systembeiwert von:

$$k_{sys,l,t,0} = 1,09$$

Der Volumenbeiwert  $k_{size,l,t,0}$  wird mit Formel (6.7) berechnet:

$$k_{size,l,t,0} = 1,04$$

Der nach dem Modell nach [22] ermittelte charakteristische Wert der Zugfestigkeit für einen zweilamelligen Brettschichtholzbalken ergibt sich zu:

$$f_{t,0,g,k} = 10,96 \text{ N/mm}^2$$

Der charakteristische Zugfestigkeitswert aus den Versuchen beträgt nach der Umrechnung nach ÖNORM EN 14358 [3] ein Wert von:

$$f_{t,0,g,k} = 14,11 \text{ N/mm}^2$$

Der versuchstechnisch ermittelte Wert liegt somit um 22 Prozent höher als der Wert nach dem Modell nach [22]. Eine geringe Prüfanzahl (hoher  $k_s$ -Wert) ist für diese Abweichung verantwortlich.

Bei der Berechnung der charakteristischen Zugfestigkeit mit dem empirisch ermittelten 5-Prozent-Quantilwert (11,6 N/mm<sup>2</sup>) beträgt der Wert:

$$f_{t,0,g,k} = 13,15 \text{ N/mm}^2$$

Verglichen mit dem empirisch ermittelten 5-Prozent-Quantilwert der geprüften Duo-Querschnitte, ergibt sich eine Abweichung von 15 Prozent.

**Bruchbilder / Versagensformen:**

Die folgenden Fotos zeigen typische Bruchursachen und Bruchbilder der geprüften Versuchskörper.



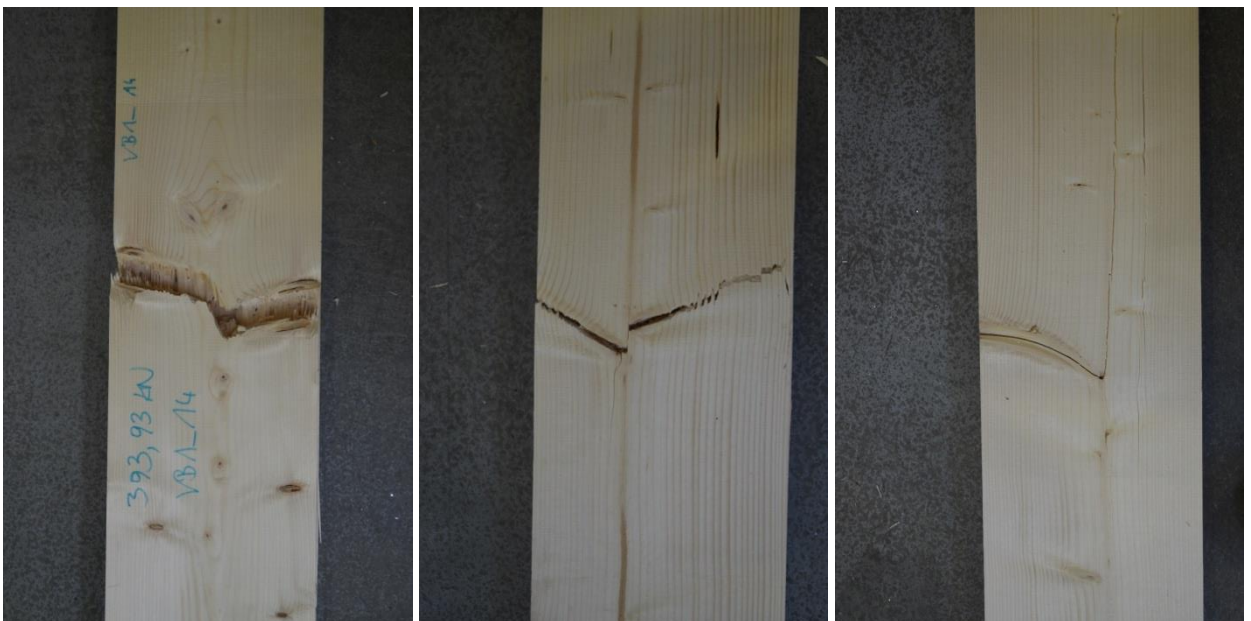
*Abbildung 96: Astansammlung*



*Abbildung 97: Kantenast*



*Abbildung 98: Lokale Schrägfaser*



*Abbildung 99: Flügelast*





*Abbildung 100: Längsriss*



*Abbildung 101: Spröder Holzbruch*



*Abbildung 102: Globale Schrägfaser*



## 6-2.3 HAUPTVERSUCHE

### 6-2.3.1 Prüfreihe „B1“

Die folgenden Abbildungen zeigen die QQ-Plots für die Normal- und Lognormalverteilung der dynamischen E-Moduln. Das Bestimmtheitsmaß und die Signifikanztests nach Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov werden in den Diagrammen dargestellt.

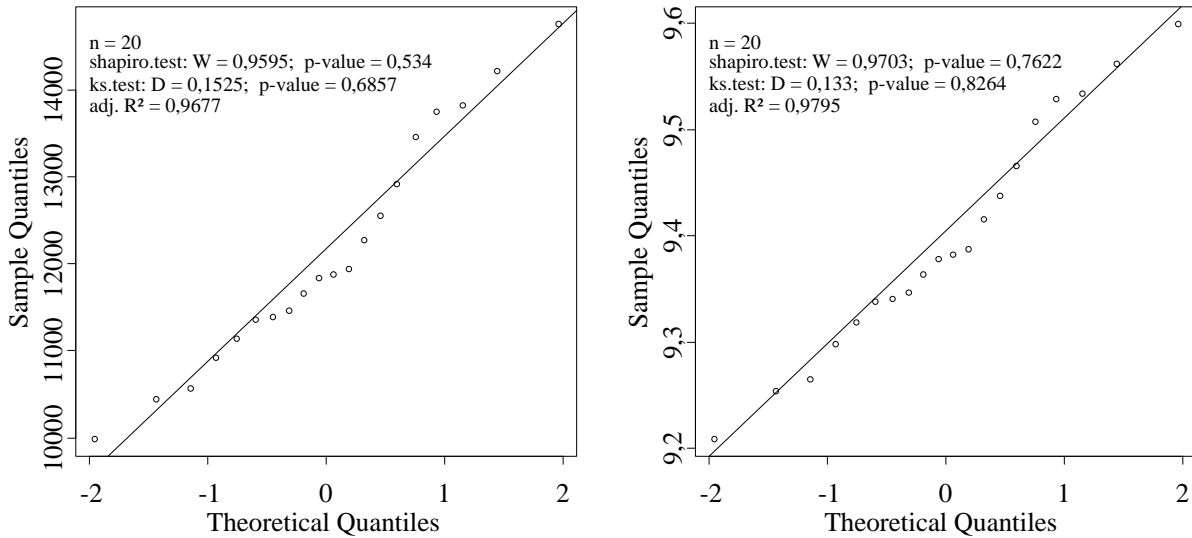


Abbildung 103: Modellvergleich dynamischer E-Modul; links: für Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung

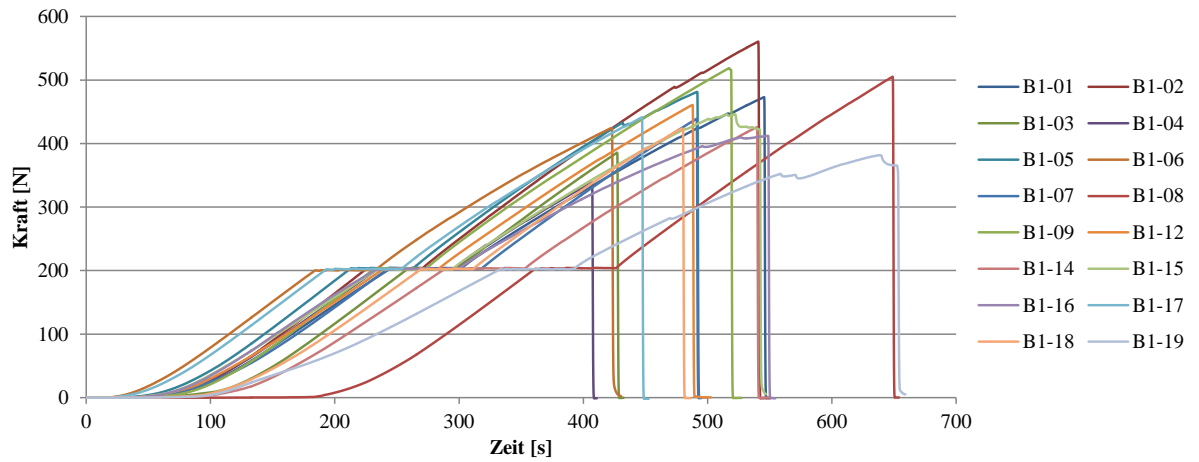
Die Lognormalverteilung bietet für die dynamischen E-Moduln eine günstigere Anpassung als die normal verteilte Funktion.

In Tabelle 16 und folgenden Tabellen sind die statistischen Auswertungen der Prüfreihe „B1“, getrennt nach den aufgetreten Versagensarten, dargestellt.

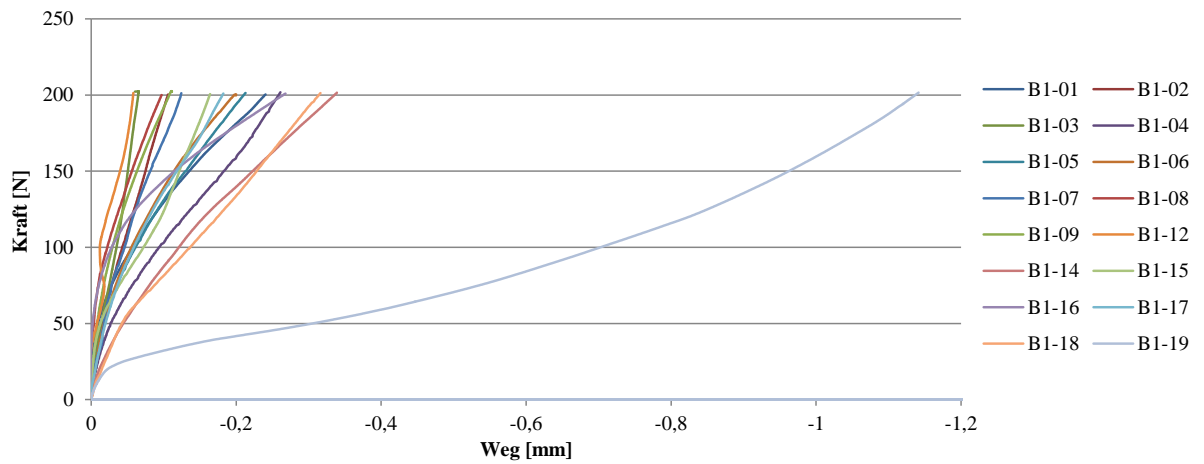
Tabelle 16: Auswertung; Prüfreihe „B1“; Nettoquerschnittsversagen

n = 16	$\rho$	$\rho_{12}$	t	v	$v_{12}$	$E_{dyn}$	$E_{dyn,12}$	F	$F_{max}/(N*2)$	$\sigma_{Bruch}$
	[kg/m³]	[kg/m³]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm²]	[N/mm²]	[kN]	[kN]	[N/mm²]
<b>Min</b>	377	383	170	5123	5122	9989	10168	339	8,91	14,0
<b>Max</b>	448	456	195	5876	5875	14768	15032	561	14,8	23,2
<b>Mittelwert</b>	402	409	182	5484	5483	12131	12348	445	12,1	18,4
<b>Median</b>	393	400	182	5503	5502	11750	11960	440	11,9	18,2
<b>Standardabw.</b>	22,6	23,0	6,2	186	186	1343	1367	53,6	1,40	2,22
<b>COV</b>	5,62%	5,62%	3,38%	3,39%	3,39%	11,1%	11,1%	12,1%	11,6%	12,0%
<b>5% Quantile</b>	378	385	173	5224	5223	10425	10612	371	9,84	15,3

Abbildung 104 und Abbildung 105 zeigen das Kraft-Zeit-Diagramm und das Kraft-Weg-Diagramm der Probekörper, welche im Nettoquerschnitt versagen.

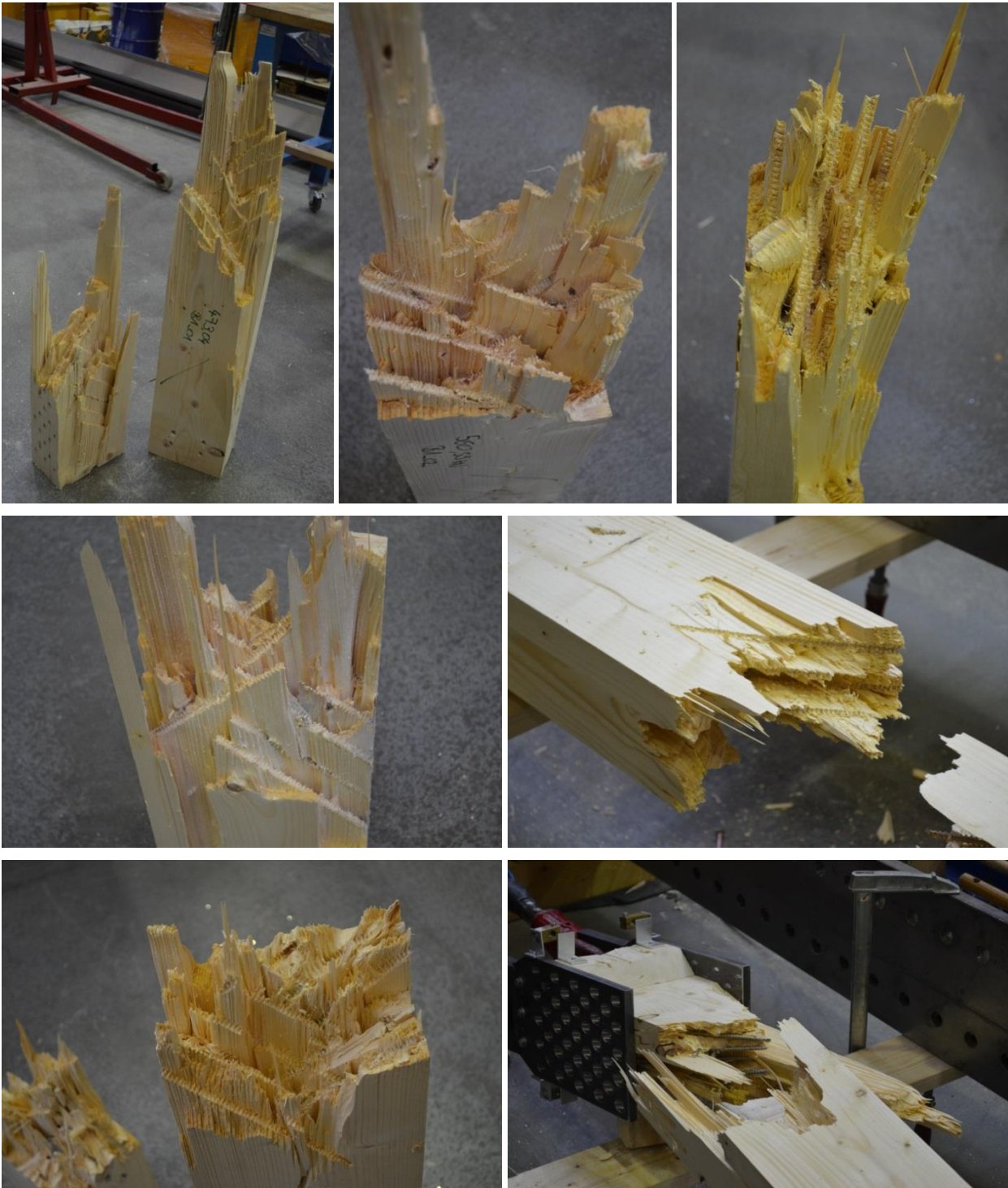


**Abbildung 104: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B1“; Nettoquerschnittsversagen**



**Abbildung 105: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B1“; Nettoquerschnittsversagen**

Es ist auch hier, wie bereits in Kapitel 6-1.3 erklärt, ein Abreißen der Holzfasern entlang der Schraubenachse aufgetreten. Dies erzeugt das typische Bruchbild eines Nettobruches in Form eines Keils. Die Überlappungen der Schrauben sind als verschobene „Halb-Keile“ in den Abbildungen zu erkennen.

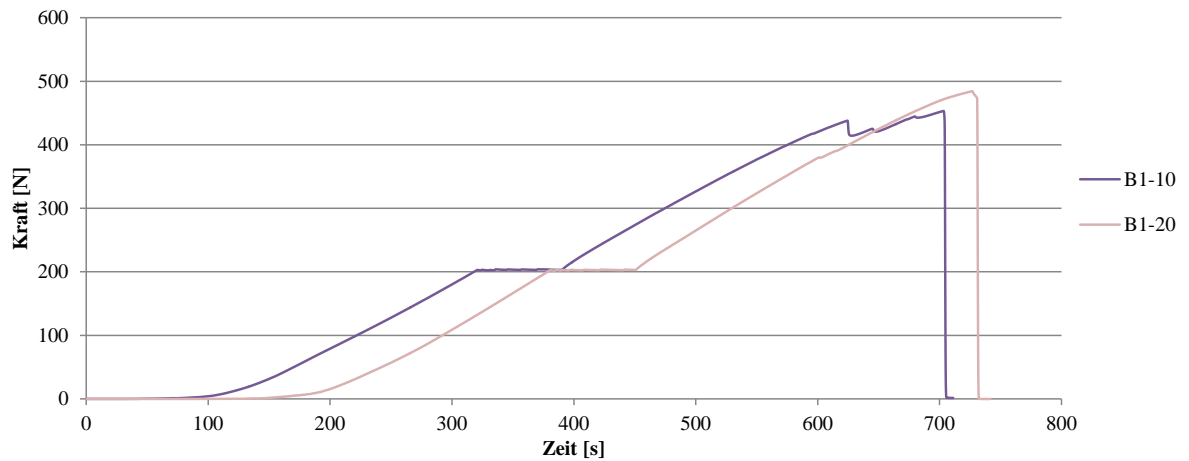


*Abbildung 106: Nettoquerschnittsbruch*

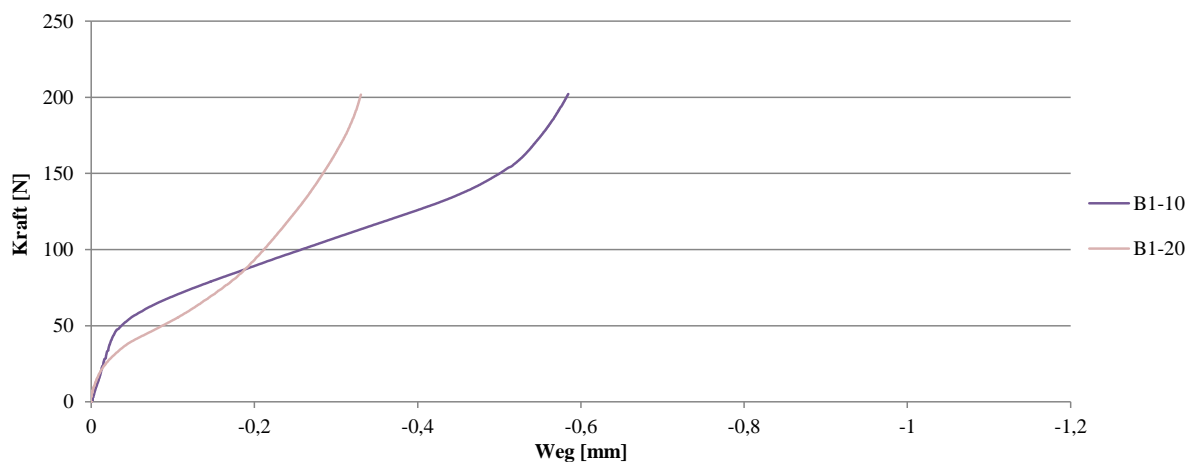
**Tabelle 17: Auswertung; Prüfreihe „B1“; Stahlversagen**

n = 2	$\rho$	$\rho_{12}$	t	v	v <sub>12</sub>	E <sub>dyn</sub>	E <sub>dyn,12</sub>	F	F <sub>max</sub> / (N*2)	$\sigma_{Bruch}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Min</b>	382	401,6	171	5643	5642	12562	12787	453	11,93	18,75
<b>Max</b>	390	401,7	177	5842	5841	13462	13703	484	16,1	20,04
<b>Mittelwert</b>	386	401,7	174	5743	5741	13012	13245	469	14,0	19,39
<b>Median</b>	386	401,7	174	5743	5741	13012	13245	469	14,0	19,39
<b>Standardabw.</b>	3,9	0,04	3,0	100	100	450	458	15,5	2,11	0,65
<b>COV</b>	1,02%	0,01%	1,72%	1,73%	1,73%	3,5%	3,46%	3,3%	15,0%	3,3%
<b>5% Quantile</b>	383	401,6	171	5653	5652	12607	12832	455	12,14	18,8

Die beiden unten abgebildeten Diagramme zeigen den Kraft-Wegverlauf und den Kraft-Zeitverlauf der einzelnen Versuche mit Stahlversagen.



**Abbildung 107: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B1“; Stahlversagen**



**Abbildung 108: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B1“; Stahlversagen**



Abbildung 109: Stahlbruch

Tabelle 18 zeigt die Auswertung der in Prüfreihe „B1“ aufgetretenen Bruttoversagensfälle.

Tabelle 18: Auswertung; Prüfreihe „B1“; Bruttoquerschnittversagen

n = 2	$\rho$	$\rho_{12}$	t	v	$v_{12}$	$E_{dyn}$	$E_{dyn,12}$	F	$F_{max}/(N \cdot 2)$	$\sigma_{Bruch}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Min</b>	382	389	181	5230	5229	10453	10640	229	6,02	9,46
<b>Max</b>	390	397	191	5520	5519	11886	12098	297	7,8	12,28
<b>Mittelwert</b>	386	393	186	5375	5374	11170	11369	263	6,9	10,87
<b>Median</b>	386	393	186	5375	5374	11170	11369	263	6,9	10,87
<b>Standardabw.</b>	3,9	4,02	5,0	145	145	716	729	34,4	0,90	1,41
<b>COV</b>	1,02%	1,02%	2,69%	2,70%	2,70%	6,4%	6,41%	13,1%	13,1%	12,9%
<b>5% Quantile</b>	383	390	182	5244	5243	10525	10713	232	6,11	9,6



Die folgenden Diagramme bilden das Kraft-Zeit- und Kraft-Weg-Diagramm der Bruttoquerschnittsversagenfälle ab.

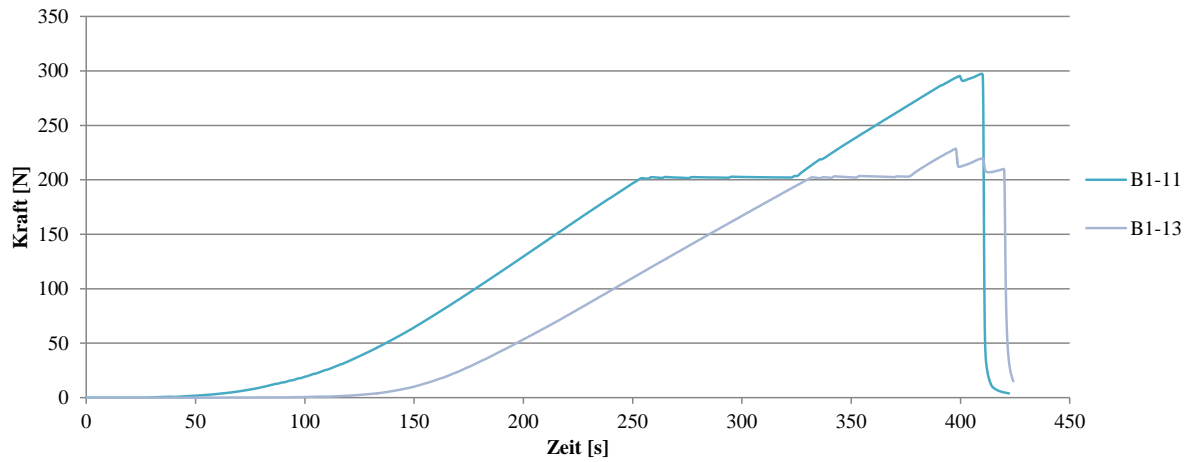


Abbildung 110: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B1“; Bruttoquerschnittsversagen

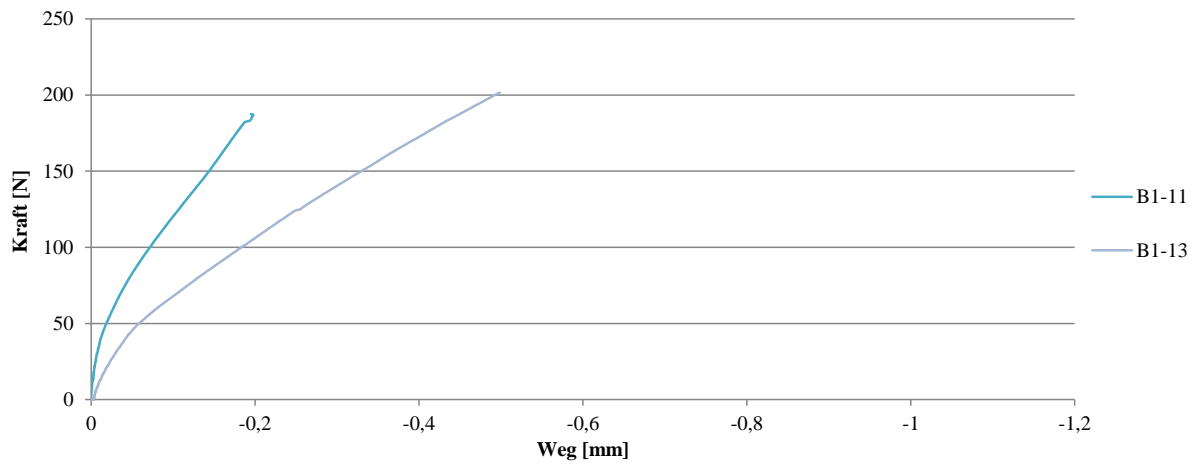


Abbildung 111: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B1“; Bruttoquerschnittsversagen



Abbildung 112: Bruttoquerschnittsversagen



Abbildung 113 zeigt die Boxplot-Darstellung der aufgetretenen Versagensarten anhand der vor dem Bruch vorhandenen maximalen Last. Jene Bauteile welche im Bruttoquerschnitt versagten, erreichten geringere Maximalkräfte als die Nettoquerschnittversagensfälle. Dies ist auf eine signifikante Schwächung des Holzes aufgrund der Äste zurückzuführen, da bei großflächigen Astansammlungen durch lokale Schrägfasern eine Lastumleitung stattfindet und der Querschnitt in diesem Bereich stärker als durch die Verbindungsmittel geschwächt wird, wodurch es zu einem Bruch im verbindungsmittelfreiem Holzbereich kommt. Als Bruttoversagen sind jene Bruchursachen zusammenzufassen, welche von Abbildung 96 bis Abbildung 102 gezeigt werden. In 16 Fällen wurde das in den Versuchen erwünschte Nettoquerschnittversagen erreicht und in zwei Fällen kam es zu einem Bruch der Schrauben.

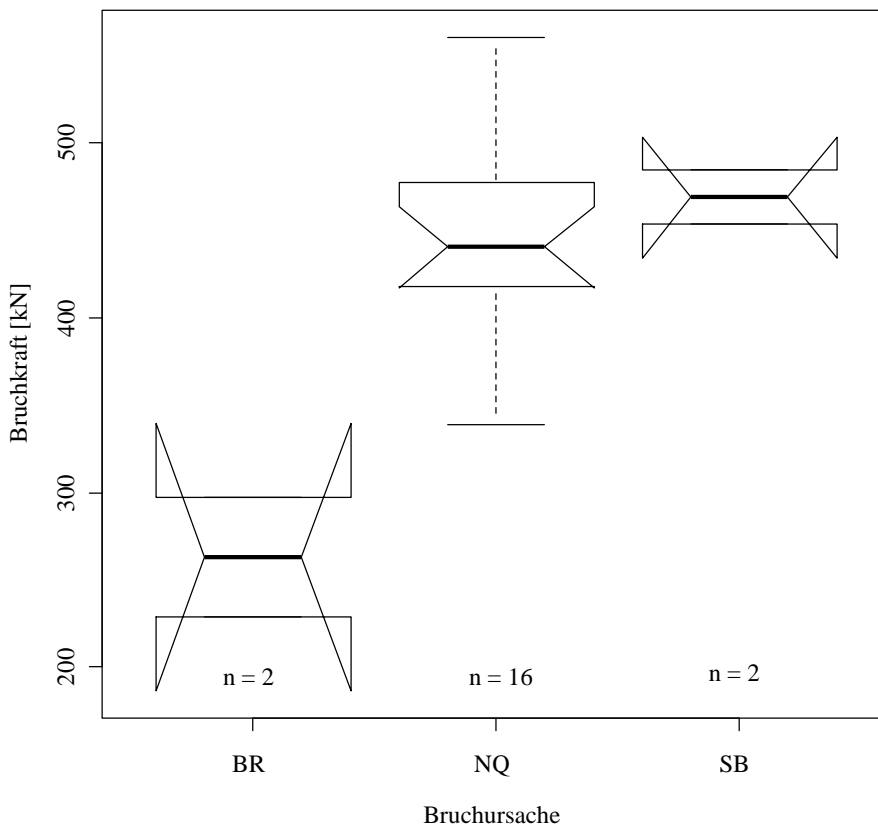


Abbildung 113: Vergleich der Bruchursachen; Prüfreihe „B1“



### 6-2.3.2 Prüfreihe „B2“

Die QQ-Plots für die Normal- und Lognormalverteilung der dynamischen E-Moduln sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß und die Werte der Signifikanztests nach Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov werden in den Diagrammen abgebildet.

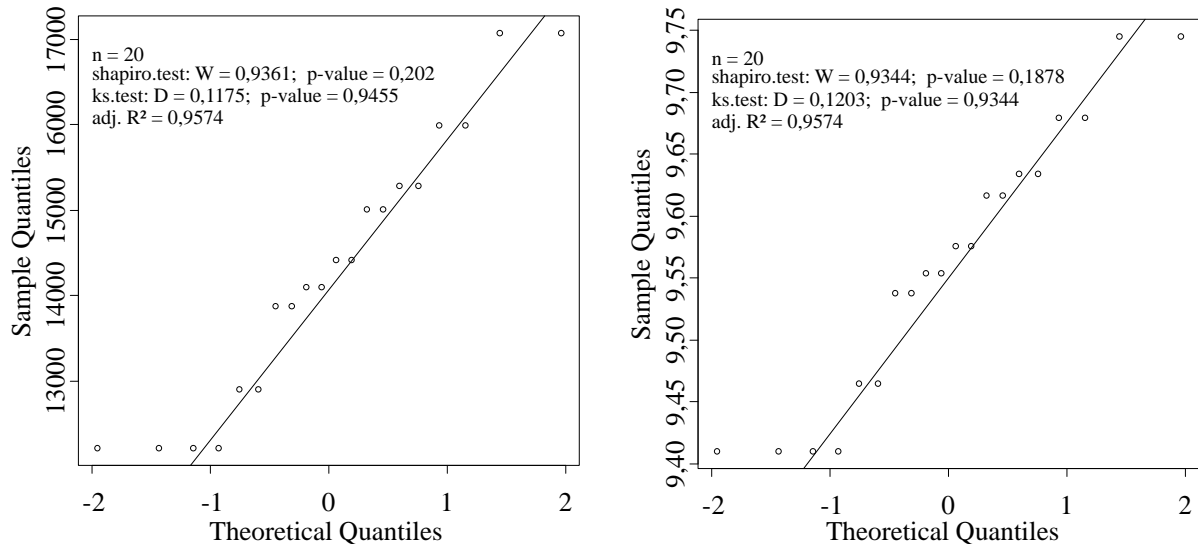


Abbildung 114: Modellvergleich dynamischer E-Modul ; rechts: Normalverteilung; links: Lognormalverteilung

Der Datensatz der dynamischen E-Moduln kann mit der normal verteilten Funktion etwas besser angenähert werden, da hier Signifikanztests höhere Werte liefern.

In den nachfolgenden Tabellen sind die statistischen Auswertungen der Prüfreihe „B2“, mit Unterscheidung der aufgetretenen Versagensfälle, dargestellt. Tabelle 19 zeigt die Auswertung der Nettoquerschnittsversagenfälle.

Tabelle 19: Auswertung; Prüfreihe „B2“; Nettoquerschnittsversagen

n = 9	$\rho$	$\rho_{12}$	t	v	v <sub>12</sub>	E <sub>dyn</sub>	E <sub>dyn,12</sub>	F	F <sub>max</sub> / (N*2)	$\sigma_{Bruch}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Min</b>	375	382	339	5310	5309	10682	10872	304	10,6	12,6
<b>Max</b>	439	447	377	5904	5903	14939	15205	629	23,4	26,1
<b>Mittelwert</b>	394	402	355	5643	5642	12600	12825	476	17,2	19,8
<b>Median</b>	386	393	349	5688	5687	12612	12837	477	17,5	19,8
<b>Standardabw.</b>	19,9	20,3	13,8	211	211	1389	1414	85,8	3,52	3,56
<b>COV</b>	5,05%	5,05%	3,90%	3,73%	3,73%	11,0%	11,0%	18,0%	20,4%	18,0%
<b>5% Quantile</b>	375	382	339	5310	5309	10682	10872	330,9	12,0	13,7

In Abbildung 115 und Abbildung 116 sind das Kraft-Zeit- sowie das Kraft-Weg-Diagramm dargestellt.

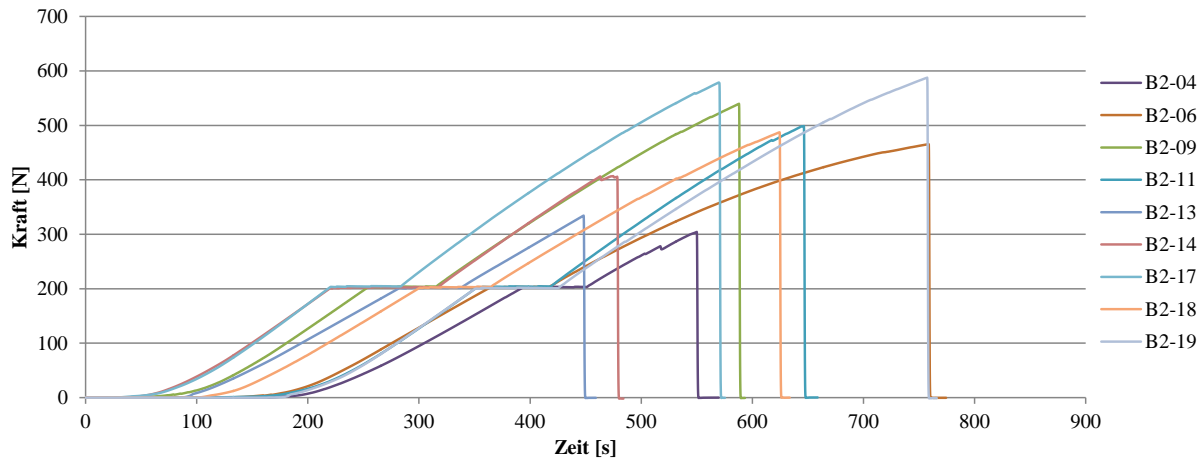


Abbildung 115: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B2“; Nettoquerschnittsversagen

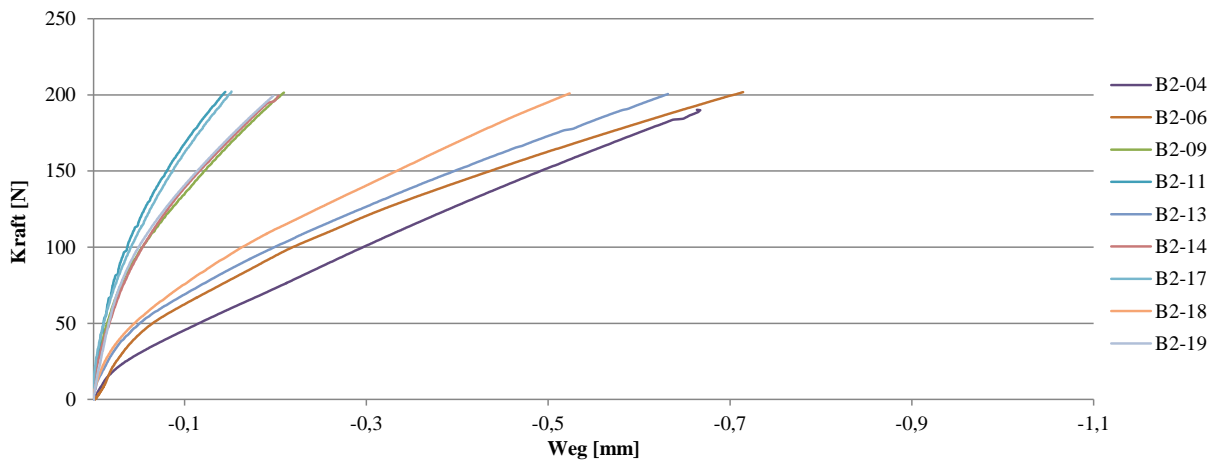


Abbildung 116: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B2“; Nettoquerschnittsversagen

Abbildung 117 zeigt Fotos der aufgetretenen Nettoquerschnittsversagen. Es ist wieder zu erkennen, dass das Holzmaterial entlang der Schraubenachse abreißt und dadurch die keilförmige Ausbildung des Bruches erzeugt.

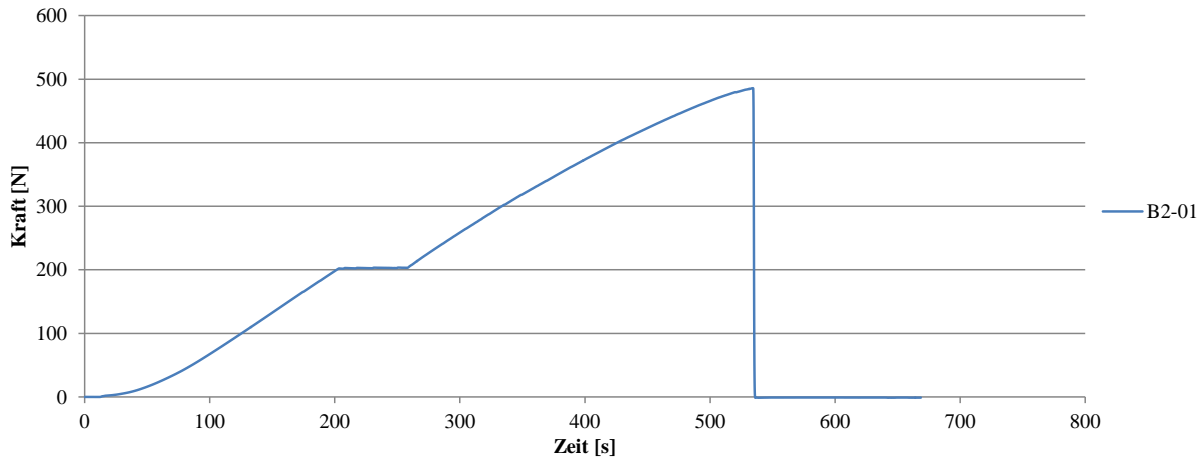


*Abbildung 117: Nettoquerschnittsversagen*

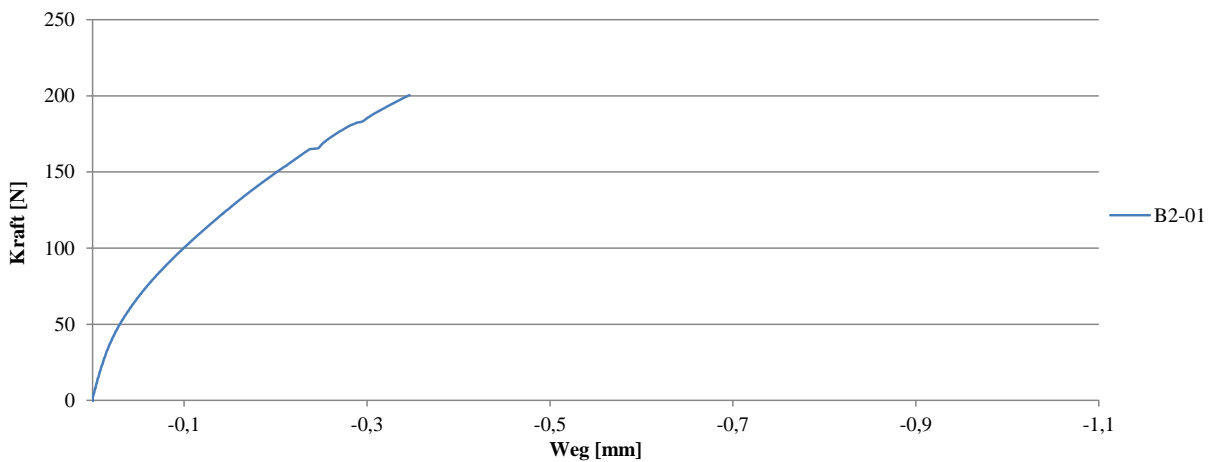
In der nachfolgenden Tabelle sind die Werte der Bruttoquerschnittsversagensfälle der Prüfreihe „B2“ aufgelistet. Da sich nur ein Prüfkörper im Bruttoquerschnitt versagte, wurde auf die statistische Auswertung verzichtet. Abbildung 118 und Abbildung 119 zeigen den Kraft-Zeit-Verlauf sowie den Kraft-Weg-Verlauf.

**Tabelle 20: Auswertung; Prüfreihe „B2“; Bruttoquerschnittsversagen**

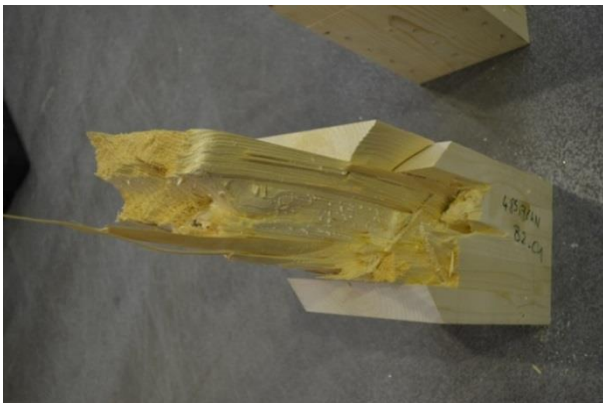
n = 1	$\rho$	$\rho_{12}$	t	v	$v_{12}$	$E_{dyn}$	$E_{dyn,12}$	F	$F_{max} / (N \cdot 2)$	$\sigma_{Bruch}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Wert</b>	390	397	342	5852	5851	13368	13607	486	20,2	20,1



**Abbildung 118: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „ B2“; Bruttoquerschnittsversagen**



**Abbildung 119: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „ B2“; Bruttoquerschnittsversagen**

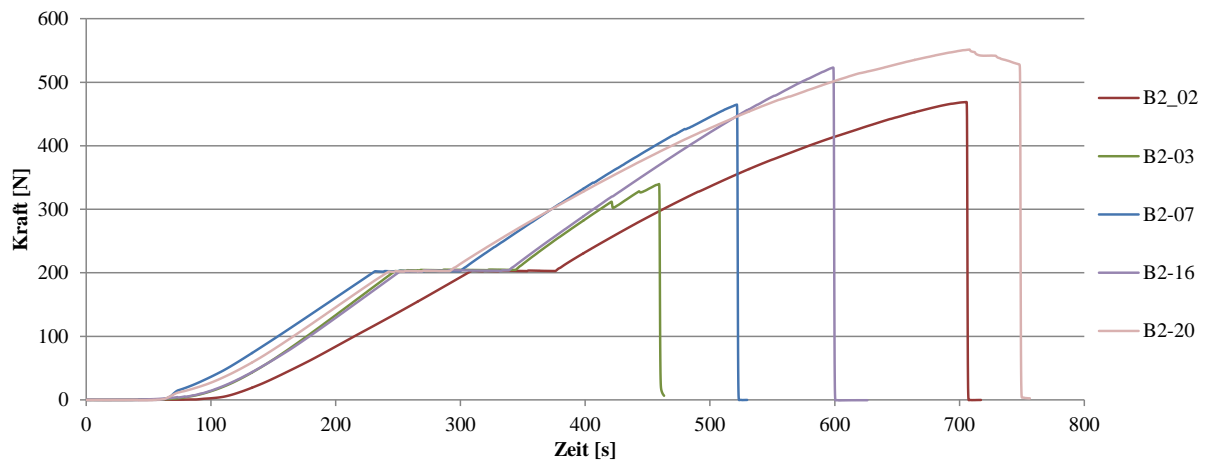


**Abbildung 120: Bruttoquerschnittsbruch**

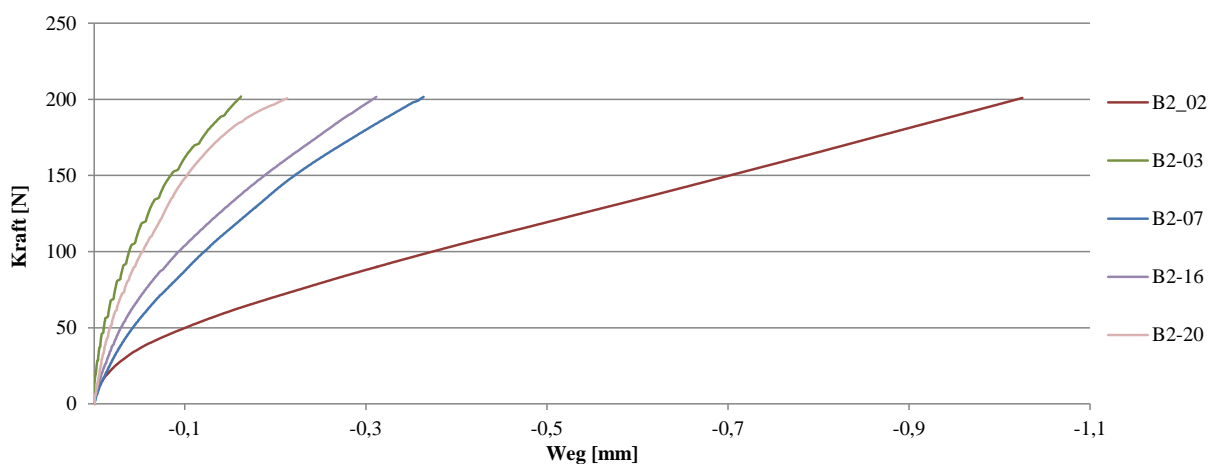
Die folgenden Tabellen und Diagramme zeigen die Auswertung der Prüfreihe „B2“ mit Mischbruch und Stahlversagen, sowie die zugehörigen Kraft-Weg- und Kraft-Zeit-Diagramme.

**Tabelle 21: Auswertung; Prüfreihe „B2“; Mischbruch**

n = 5	$\rho$	$\rho_{12}$	t	v	$v_{12}$	$E_{dyn}$	$E_{dyn,12}$	F	$F_{max}/(N \cdot 2)$	$\sigma_{Bruch}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Min</b>	377	384	349	5323	5322	10682	10873	340	10,6	14,1
<b>Max</b>	408	416	376	5736	5734	13131	13366	551	23,4	22,9
<b>Mittelwert</b>	389	396	361	5549	5548	12009	12223	470	18,5	19,5
<b>Median</b>	386	393	357	5607	5606	12335	12555	469	19,4	19,4
<b>Standardabw.</b>	10,7	10,9	10,3	157	157	896	912	72,7	4,73	3,03
<b>COV</b>	2,74%	2,74%	2,85%	2,83%	2,83%	7,46%	7,46%	15,5%	25,5%	15,6%
<b>5% Quantile</b>	378	385	350	5341	5340	10803	10996	364,8	11,8	15,1



**Abbildung 121: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „ B2“; Mischbruch**



**Abbildung 122: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „ B2“; Mischbruch**

Tabelle 22: Auswertung; Prüfreihe „B2“; Stahlbruch

n = 2	$\rho$	$\rho_{12}$	t	v	$v_{12}$	$E_{dyn}$	$E_{dyn,12}$	F	$F_{max}/(N \cdot 2)$	$\sigma_{Bruch}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Min</b>	392	400	343	5607	5606	12335	12555	399	12,5	16,5
<b>Max</b>	439	447	357	5835	5834	14939	15205	520	21,7	21,6
<b>Mittelwert</b>	416	423	350	5721	5720	13637	13880	459	17,1	19,1
<b>Median</b>	416	423	350	5721	5720	13637	13880	459	17,1	19,1
<b>Standardabw.</b>	23,2	23,6	7,00	114	114	1302	1325	60,4	4,60	2,54
<b>COV</b>	5,59%	5,59%	2,00%	1,99%	1,99%	9,55%	9,55%	13,2%	26,9%	13,3%
<b>5% Quantile</b>	395	402	344	5618	5617	12465	12688	405,0	12,9	16,8

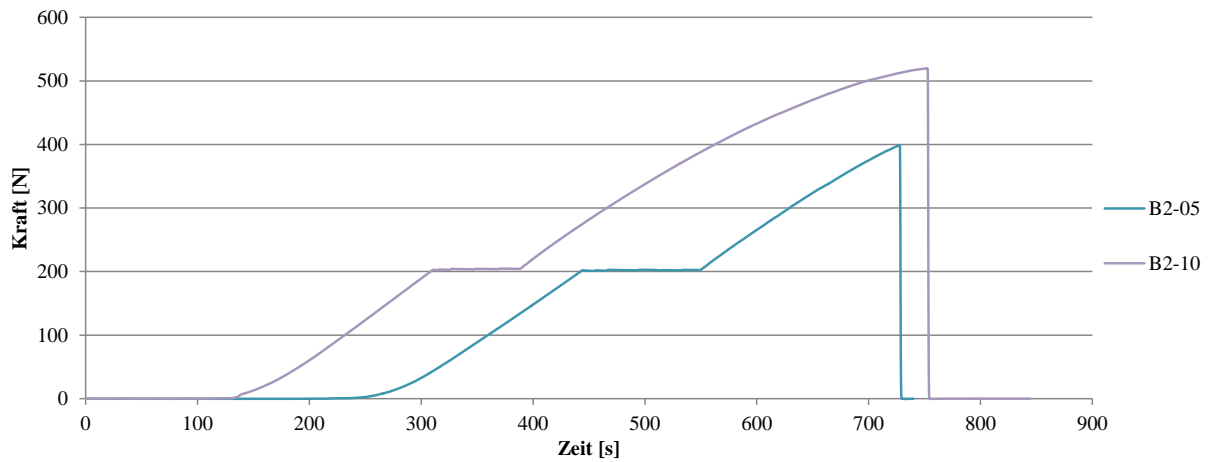


Abbildung 123: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „ B2“; Stahlbruch

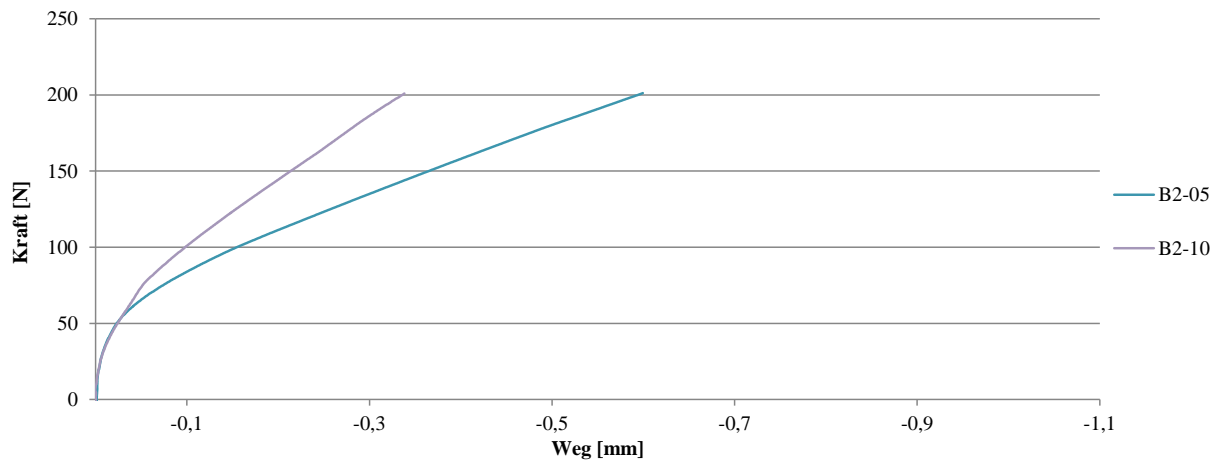


Abbildung 124: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „ B2“; Stahlbruch





Abbildung 125: Stahlbruch



Abbildung 126: Schubversagen (Blockscheren)

Tabelle 23: Auswertung; Prüfreihe „B2“; Schubversagen

n = 3	$\rho$	$\rho_{12}$	t	v	v <sub>12</sub>	E <sub>dyn</sub>	E <sub>dyn,12</sub>	F	F <sub>max</sub> / (N*2)	$\sigma_{Bruch}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Min</b>	401	409	339	5671	5670	13131	13366	418	19,7	17,3
<b>Max</b>	439	447	353	5904	5903	14939	15205	629	21,9	26,1
<b>Mittelwert</b>	416	424	345	5804	5802	14019	14270	524	20,8	21,7
<b>Median</b>	408	416	343	5835	5834	13988	14238	524	20,9	21,7
<b>Standardabw.</b>	16,3	16,6	5,89	98	97,8	738	751,	86,2	0,90	3,57
<b>COV</b>	3,91%	3,91%	1,71%	1,69%	1,69%	5,27%	5,27%	16,5%	4,33%	16,4%
<b>5% Quantile</b>	402	409	339	5687	5686	13217	13453	428,5	19,8	17,8

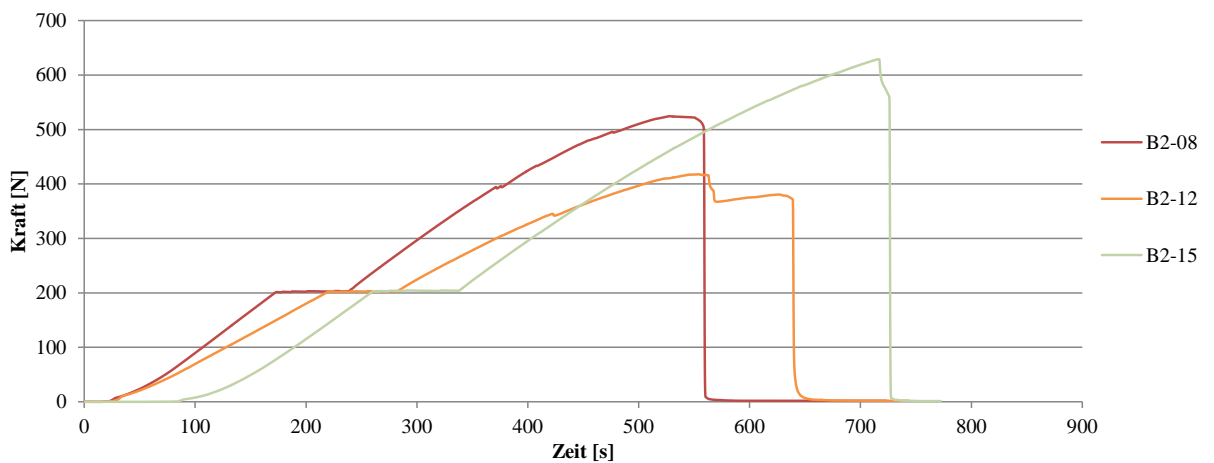


Abbildung 127: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „ B2“; Schubversagen



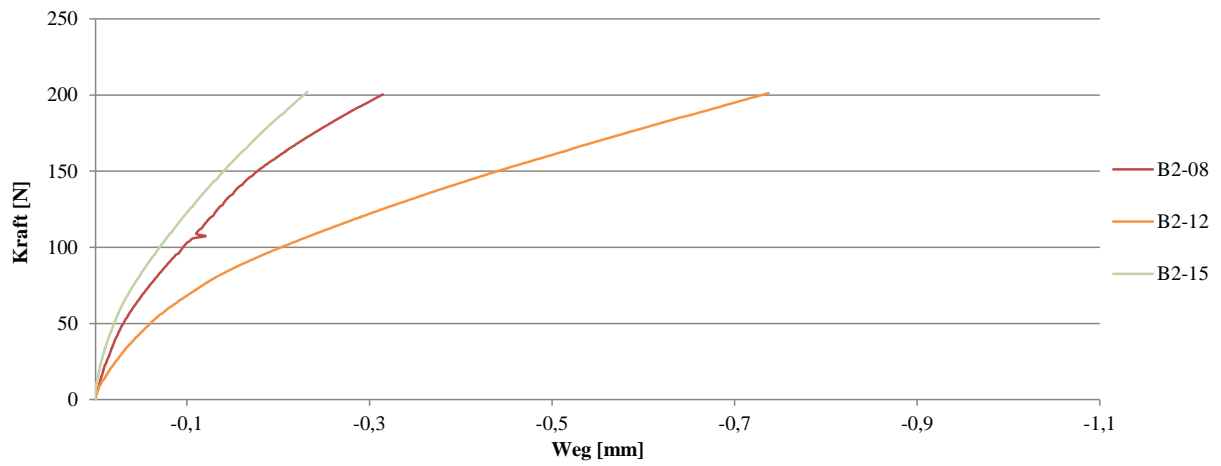


Abbildung 128: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B2“; Schubversagen

Abbildung 129 zeigt die Boxplot-Darstellung der erreichten Bruchkräfte der Versuchskörper in Prüfreihe „B2“, aufgeteilt nach Bruchursachen. Es trat nur ein einziger Bruttoquerschnittversagensfall auf, dessen maximale Last im Bereich des Mittelwertes der Nettoversagen liegt. Die Bruchkraft jener beiden Prüfkörper, welche auf Stahlbruch versagten, weichen stark voneinander ab, was auf die unterschiedlich hohe Schraubenanzahl zurückzuführen ist. Als Mischbruch sind Versagensfälle bezeichnet, die sowohl Anteile von Bruttoquerschnittversagen als auch Nettoquerschnittversagen aufweisen. Die Mehrheit der geprüften Verbindungen versagte im Nettoquerschnitt. Die Bruchkräfte sind hierbei stark streuend. Ein Schubversagen der geprüften Versuchskörper ist auf die besondere Form des Probekörpers und die unterschiedliche Anzahl der gegenüberliegenden Schrauben dieser Prüfreihe zurückzuführen. Abbildung 130 zeigt die Schraubenanordnung der Prüfreihe „B2“ und die daraus resultierende Asymmetrie, welche der Hauptgrund für das vermehrte Auftreten von Versagen zufolge Schubs ist.

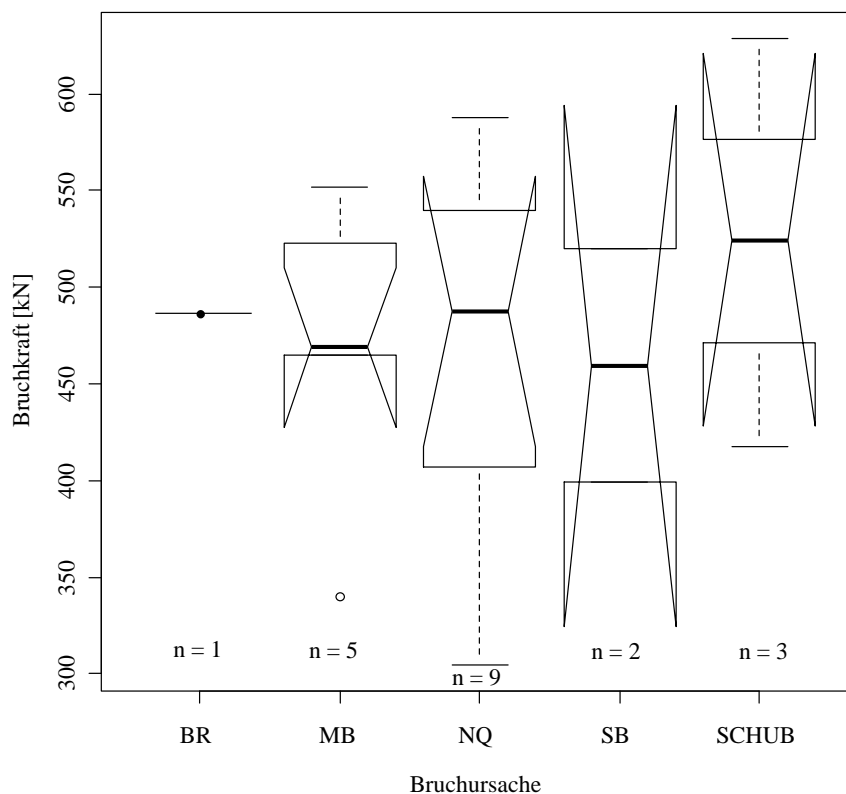


Abbildung 129: Vergleich der Bruchursachen; Prüfreihe „B2“

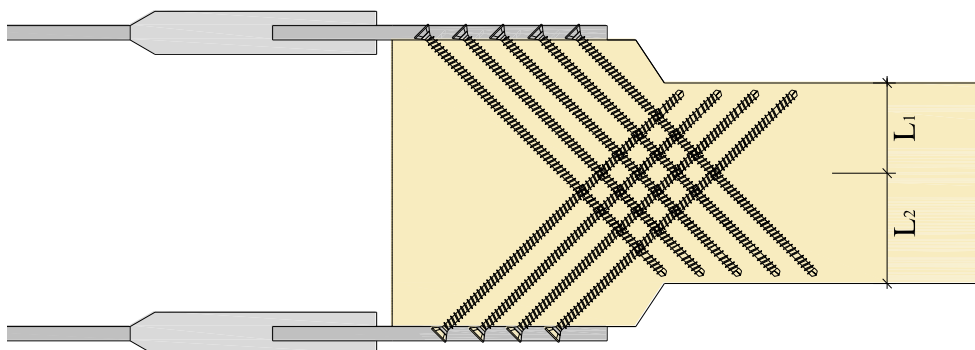
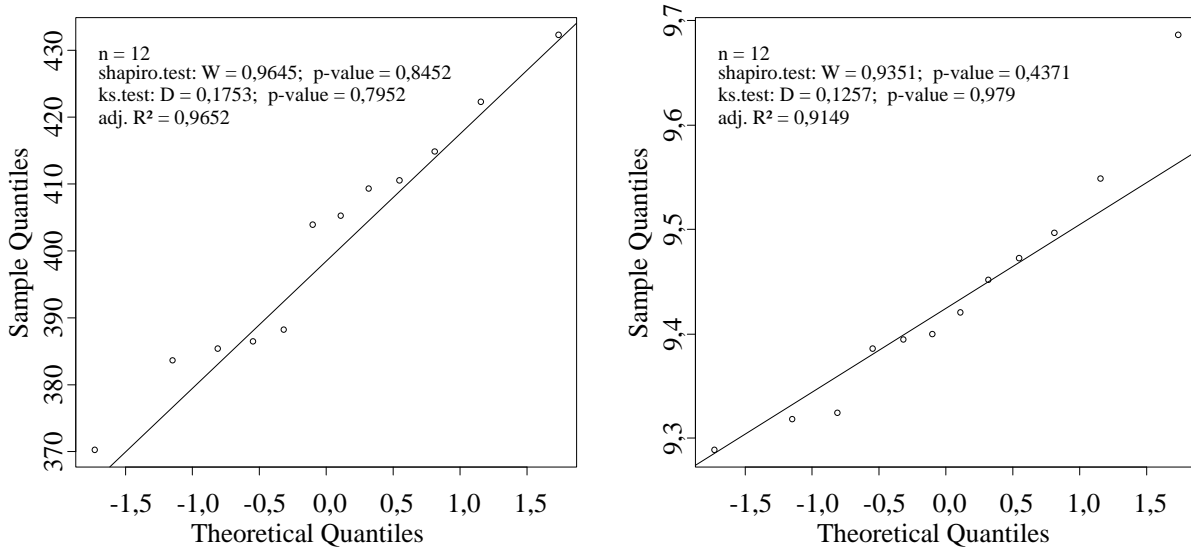


Abbildung 130: Schraubenanordnung; Prüfreihe "B2"

### 6-2.3.3 Prüfreihe „B3“

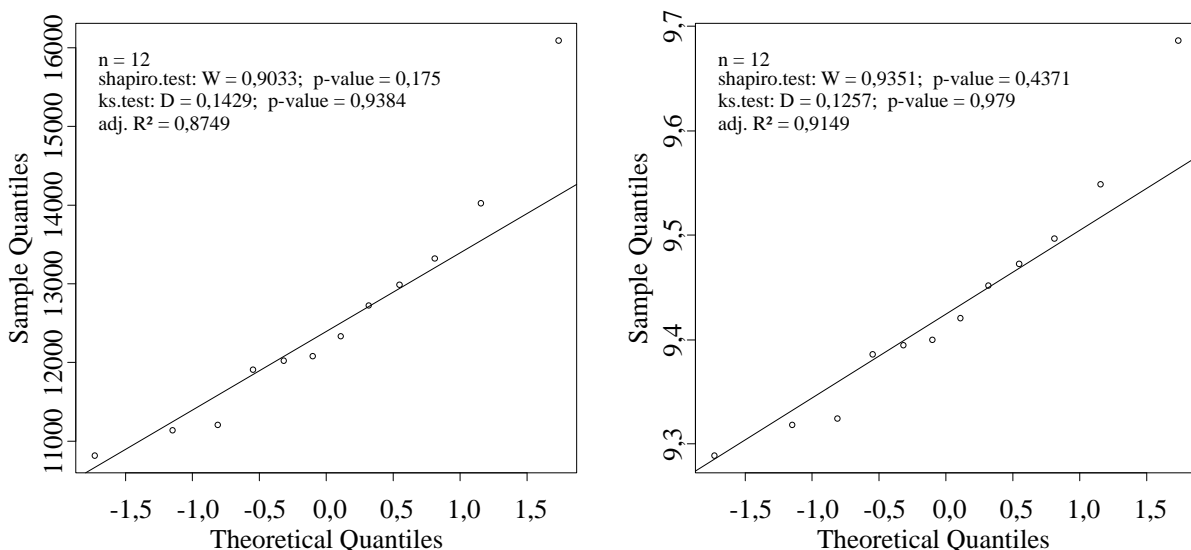
Die folgenden Abbildungen zeigen QQ-Plots für die Normal- und Lognormalverteilung der Rohdichte und der dynamischen E-Moduln. Das Bestimmtheitsmaß und die Signifikanztests nach Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov werden in den Diagrammen ausgewiesen.



**Abbildung 131: Modellvergleich Rohdichte: links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung**

Das Bestimmtheitsmaß „adjusted  $R^2$ “ und der Kolmogorov-Smirnov-Test erreichen bei der Lognormalverteilung und Normalverteilung der Rohdichte etwa gleich hohe Werte. Die Daten können somit durch die beiden Verteilungen gut angenähert werden.

Die QQ-Plots für die Normal- und Lognormalverteilung der dynamischen E-Moduln und das damit berechnete Bestimmtheitsmaß, wie auch die Signifikanztests nach Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov sind in Abbildung 132 ersichtlich.



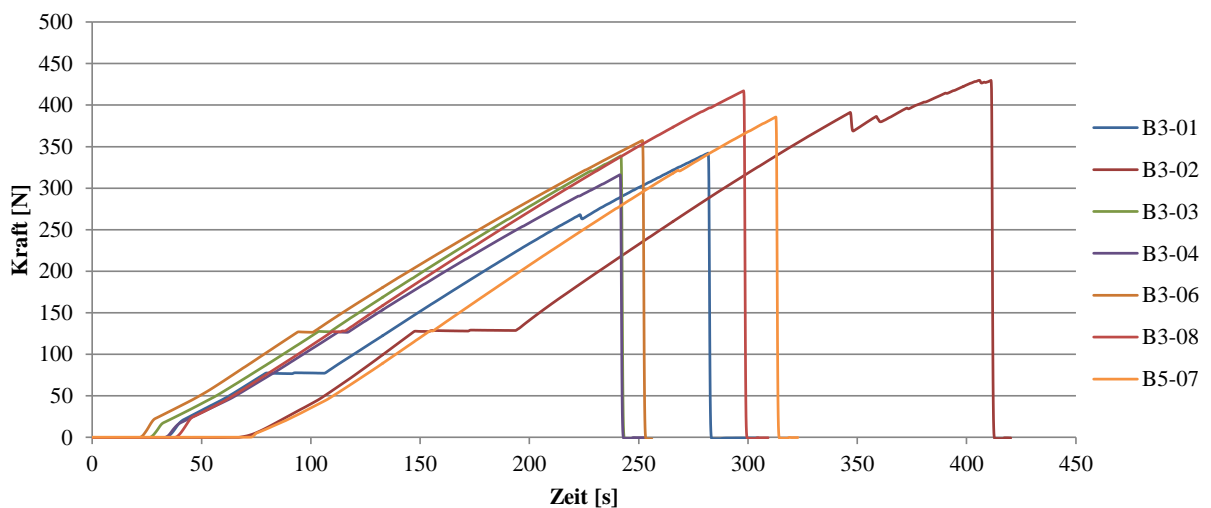
**Abbildung 132: Modellvergleich dynamischer E-Modul; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung**

Durch die Lognormalverteilung können die Werte der dynamischen E-Moduln idealer angenähert werden.

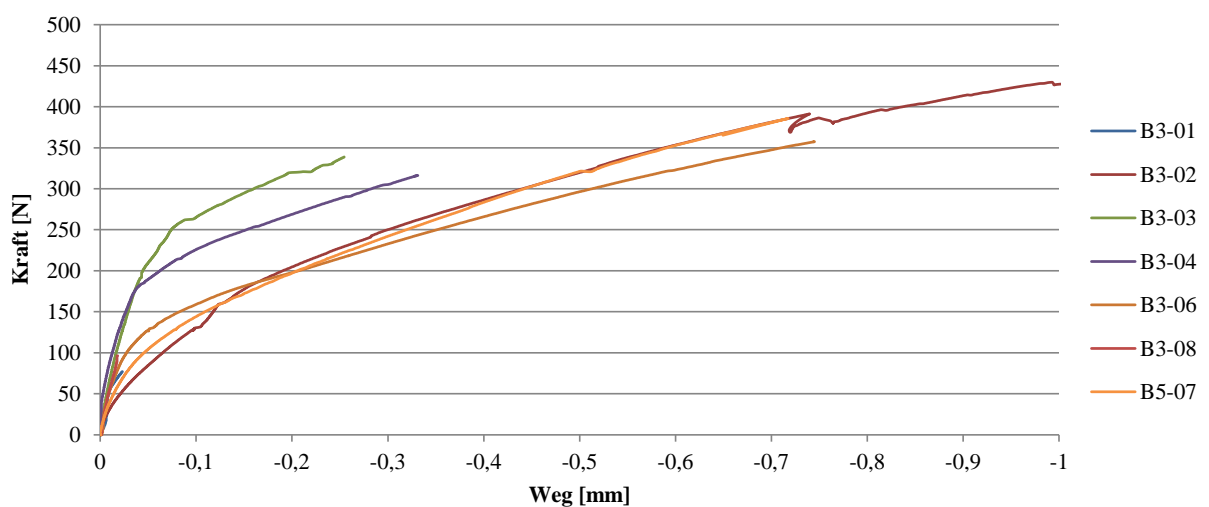
In Tabelle 24 und Tabelle 25 sind die statistischen Auswertungen der Prüfreihe „B3“ mit Unterscheidung der Brucharten als Nettoquerschnittsversagen und Bruttoquerschnittsversagen dargestellt. Die Diagramme zeigen die jeweiligen Kraft-Zeit- und Kraft-Weg-Verläufe.

**Tabelle 24: Auswertung; Prüfreihe „B3“; Nettoquerschnittsversagen**

n = 7	u	ρ	ρ <sub>12</sub>	t	v	v <sub>12</sub>	E <sub>dyn</sub>	E <sub>dyn,12</sub>	F	F <sub>max</sub> / (N*2)	σ <sub>Bruch</sub>
	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Min</b>	8,22	385	392	295	5407	5406	11920	12113	316	9,9	19,7
<b>Max</b>	8,86	432	439	333	6103	6102	16106	16353	430	13,4	26,7
<b>Mittelwert</b>	8,63	406	413	317	5691	5690	13175	13392	370	11,6	23,0
<b>Median</b>	8,67	411	418	322	5592	5591	12733	12940	357	11,2	22,3
<b>Standardabw.</b>	0,20	17,6	17,9	12,09	222	222	1362	1384	39,4	1,23	2,45
<b>COV</b>	2,28%	4,34%	4,34%	3,82%	3,89%	3,89%	10,34%	10,3%	10,6%	10,6%	10,7%
<b>5% Quantile</b>	8,32	386	392	299	5447	5446	11970	12162	323,0	10,1	20,1



**Abbildung 133: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B3“; Nettoquerschnittsversagen**



**Abbildung 134: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B3“; Nettoquerschnittsversagen**

Abbildung 135 gibt Aufschluss über die erzeugten Bruchbilder. Es ist wie bereits in allen anderen Prüfreiheiten mit Verbindungsmitteln bei einem Nettoquerschnittsbruch ein keilförmiges Bruchbild zu erkennen.



Abbildung 135: Nettoquerschnittsbruch

Tabelle 25: Auswertung; Prüfreihe „B3“; Bruttoquerschnittsversagen

n = 5	u	$\rho$	$\rho_{12}$	t	v	$v_{12}$	$E_{dyn}$	$E_{dyn,12}$	F	$F_{max}/(N*2)$	$\sigma_{Bruch}$
	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Min</b>	8,31	370	377	314	5234	5233	10823	11019	228	7,11	14,1
<b>Max</b>	9,07	409	415	344	5734	5733	13327	13548	372	11,6	23,2
<b>Mittelwert</b>	8,59	395	401	331	5444	5443	11709	11904	290	9,07	18,1
<b>Median</b>	8,51	404	411	333	5406	5405	11213	11373	275	8,61	17,2
<b>Standardabw.</b>	0,26	15,0	14,9	9,72	163	163	901	915	56,5	1,77	3,53
<b>COV</b>	3,04%	3,81%	3,71%	2,94%	2,99%	2,99%	7,70%	7,69%	19,5%	19,5%	19,5%
<b>5% Quantile</b>	8,33	373	380	317	5265	5265	10889	11084	229	7,17	14,3

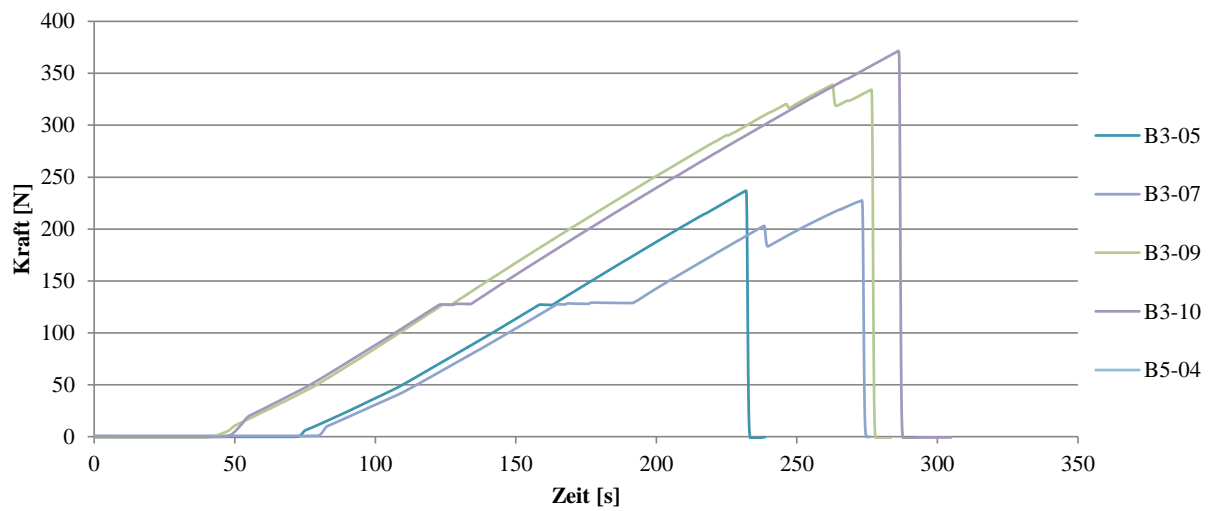


Abbildung 136: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B3“; Bruttoquerschnittsversagen

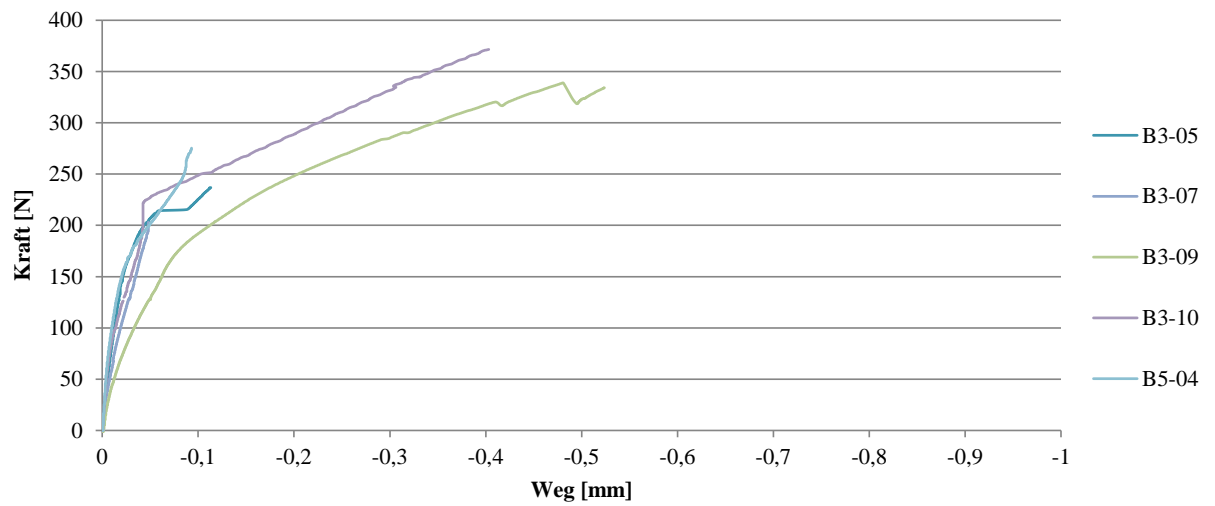


Abbildung 137: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B3“; Bruttoquerschnittsversagen



Abbildung 138: Bruttoquerschnittsbruch



Aus den Boxplots mit der Unterscheidung der Versagensmechanismen in Abbildung 139 ist zu erkennen, dass die maximalen Kräfte, welche beim Bruttoquerschnittversagen erreicht wurden, unter den Maximalwerten der Prüfkörper mit Nettoquerschnittversagen liegen. Dies lässt den Schluss zu, dass die Zugfestigkeit des Materials durch Fehlstellen so stark beeinflusst ist, dass der Querschnitt an der Stelle der größten Normabweichung bricht, anstatt an der Stelle der größten Querschnittsschwächung durch die Verbindungsmittel. Sieben Querschnitte versagten demnach im Nettoquerschnitt.

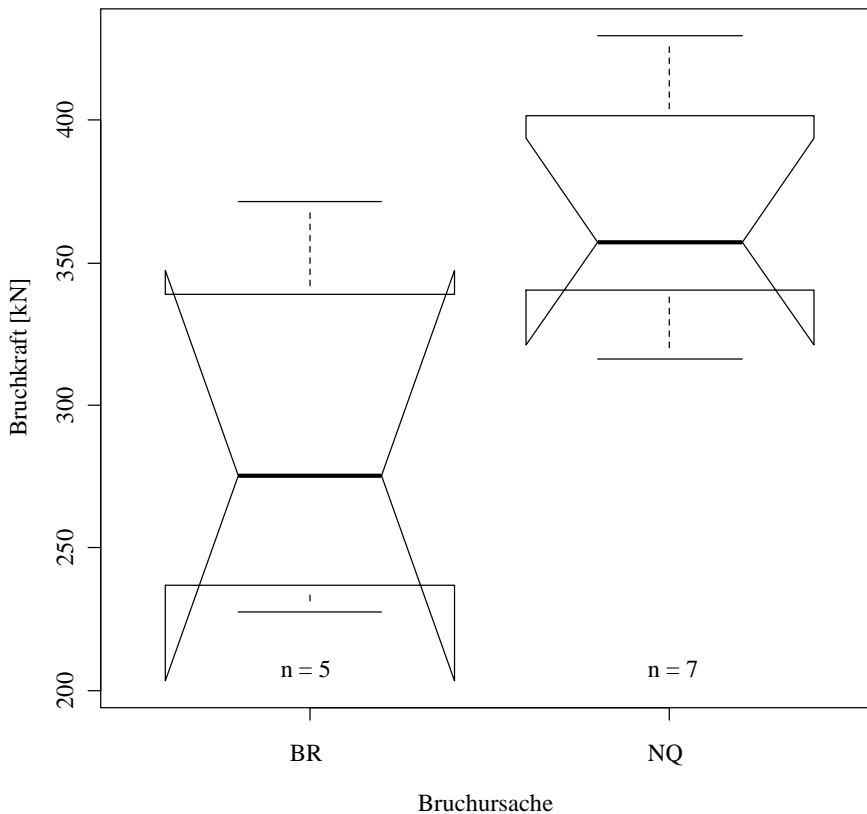
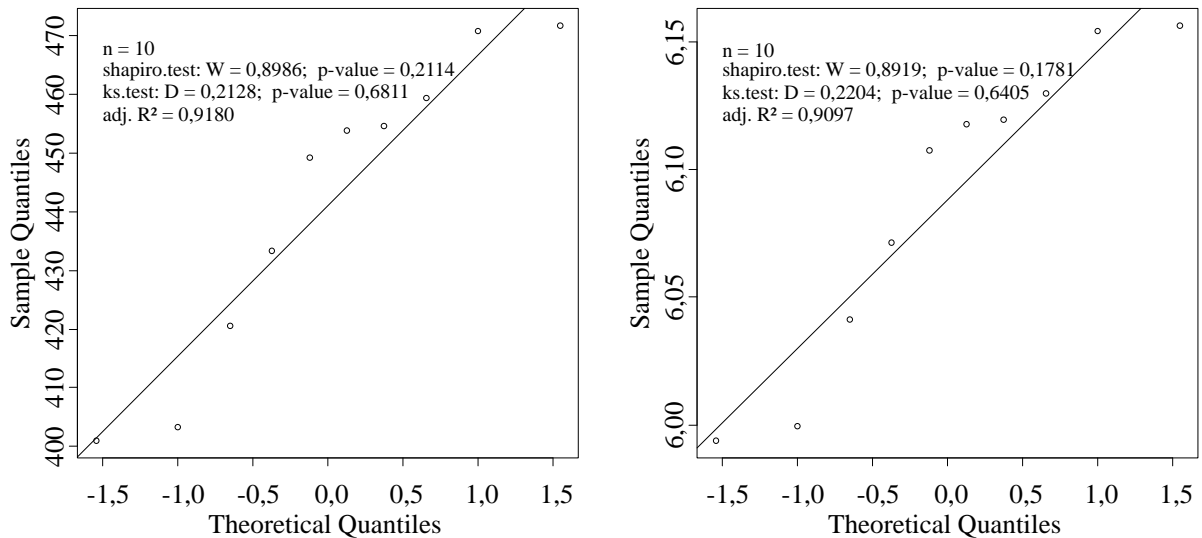


Abbildung 139: Vergleich der Bruchursachen; Prüfreihe „B3“

### 6-2.3.4 Prüfreihe „B4“

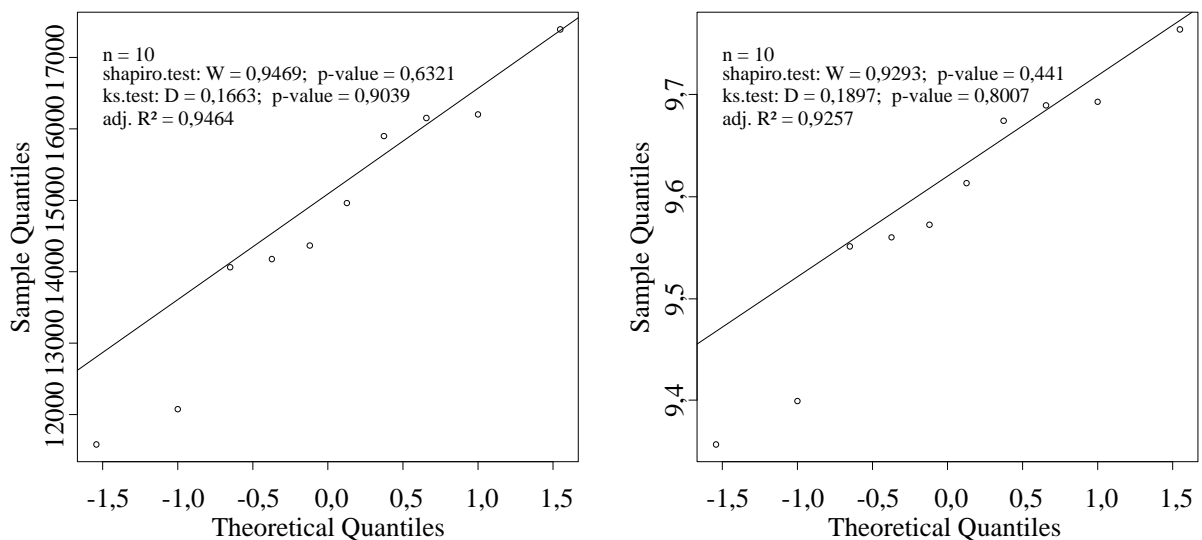
Die folgenden Abbildungen zeigen QQ-Plots für die Normal- und Lognormalverteilung der Rohdichte und der dynamischen E-Moduln. Das Bestimmtheitsmaß und die Signifikanztests nach Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov werden in den Diagrammen ausgewiesen.



**Abbildung 140: Modellvergleich Rohdichte; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung**

Das Bestimmtheitsmaß „adjusted R<sup>2</sup>“ und die Signifikanztests erreichen bei der Lognormalverteilung und Normalverteilung der Rohdichte etwa gleich hohe Werte. Die Daten können somit durch die beiden Verteilungen gut angenähert werden.

Die QQ-Plots für die Normal- und Lognormalverteilung der dynamischen E-Moduln und das damit berechnete Bestimmtheitsmaß, wie auch die Signifikanztests nach Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov sind in Abbildung 141 ersichtlich.



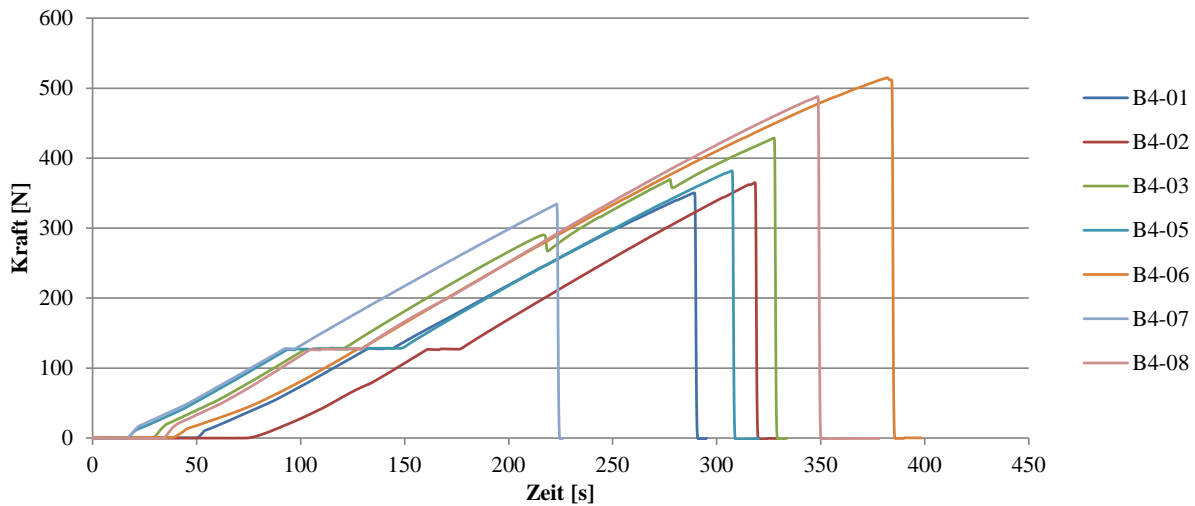
**Abbildung 141: Modellvergleich dynamischer E-Modul; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung**

Durch die Normalverteilung können die Werte der dynamischen E-Moduln besser angenähert werden.

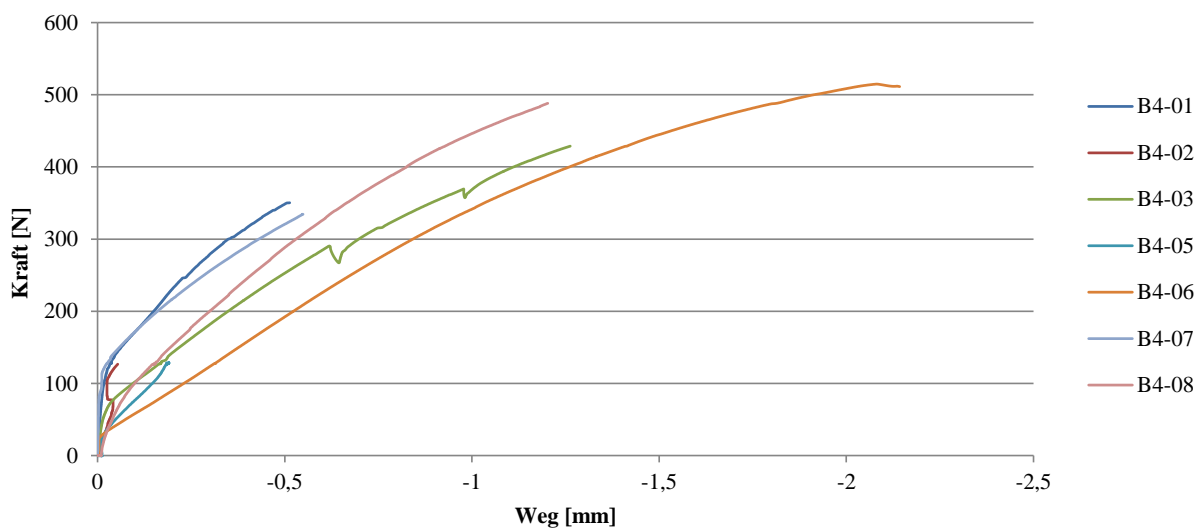
In den folgenden Tabellen sind die statistischen Auswertungen der Prüfreihe „B4“ getrennt nach Versagensart dargestellt. Die Kraft-Weg- und Kraft-Zeit-Diagramme sind im Anschluss dargestellt.

**Tabelle 26: Auswertung; Prüfreihe „B4“; Nettoquerschnittsversagen**

n = 7	u	$\rho$	$\rho_{12}$	t	v	$v_{12}$	$E_{dyn}$	$E_{dyn,12}$	F	$F_{max}/(N \cdot 2)$	$\sigma_{Bruch}$
	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Min</b>	8,51	403	410	302	5359	5358	11583	11763	334	11,1	20,8
<b>Max</b>	8,82	472	480	336	5961	5960	16220	16494	515	17,2	32,0
<b>Mittelwert</b>	8,63	442	450	314	5744	5743	14644	14886	409	13,6	25,5
<b>Median</b>	8,59	454	461	310	5808	5807	14373	14616	382	12,7	23,8
<b>Standardabw.</b>	0,10	22,4	22,9	11,14	198	198	1530	1558	64,9	2,16	4,04
<b>COV</b>	1,17%	5,07%	5,08%	3,55%	3,45%	3,45%	10,45%	10,5%	15,9%	15,9%	15,9%
<b>5% Quantile</b>	8,52	409	415	302	5429	5428	12328	12526	339	11,3	21,1



**Abbildung 142: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B4“; Nettoquerschnittsversagen**



**Abbildung 143: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B4“; Nettoquerschnittsversagen**



Abbildung 144: Nettoquerschnittsbruch

Tabelle 27: Auswertung; Prüfreihe „B4“; Bruttoquerschnittsversagen

n = 2	u	$\rho$	$\rho_{12}$	t	v	$v_{12}$	$E_{dyn}$	$E_{dyn,12}$	F	$F_{max}/(N \cdot 2)$	$\sigma_{Bruch}$
	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Min</b>	8,61	401	408	312	5489	5488	12084	12284	245	8,2	15,3
<b>Max</b>	8,76	449	457	328	5772	5771	14967	15204	310	10,3	19,3
<b>Mittelwert</b>	8,68	425	432	320	5631	5630	13525	13744	277	9,2	17,3
<b>Median</b>	8,68	425	432	320	5631	5630	13525	13744	277	9,2	17,3
<b>Standardabw.</b>	0,07	24,1	24,4	8,00	141	141	1441	1460	32,9	1,10	2,03
<b>COV</b>	0,82%	5,67%	5,64%	2,50%	2,51%	2,51%	10,66%	10,6%	11,9%	11,9%	11,7%
<b>5% Quantile</b>	8,62	403	410	313	5503	5502	12228	12430	248	8,3	15,5

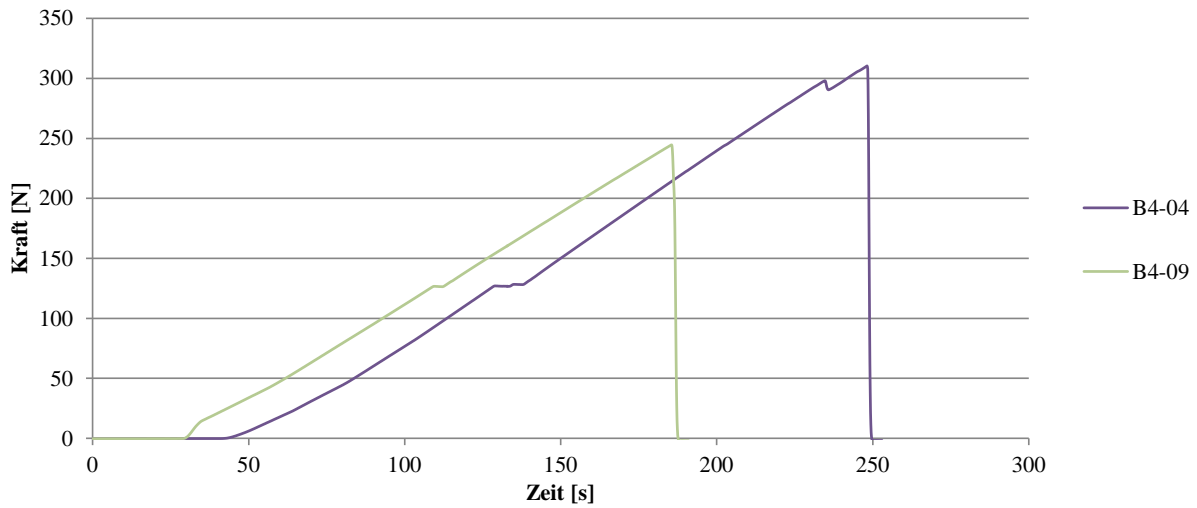


Abbildung 145: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B4“; Bruttoquerschnittsversagen

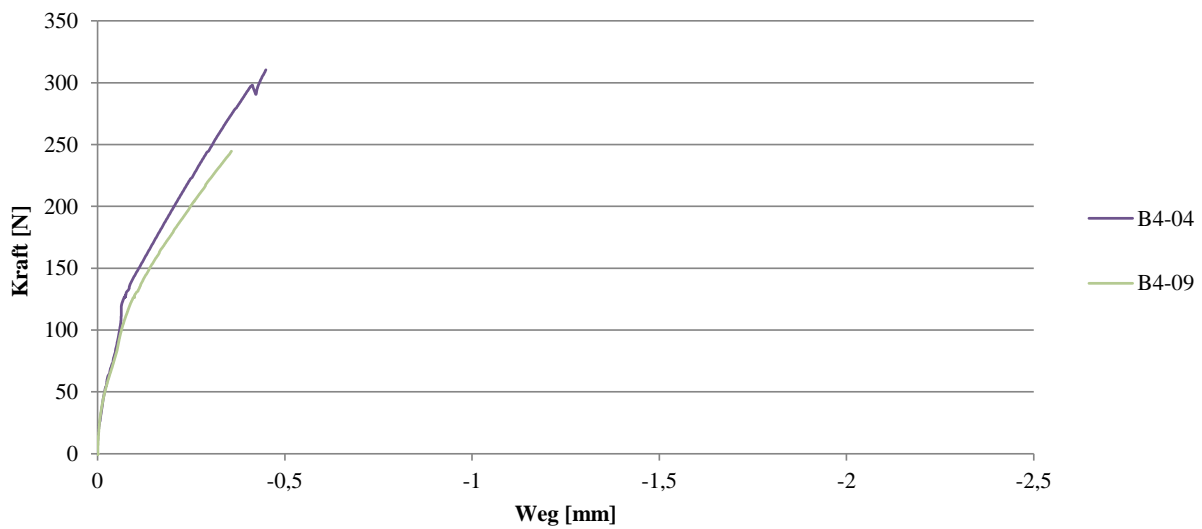


Abbildung 146: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B4“; Bruttoquerschnittsversagen

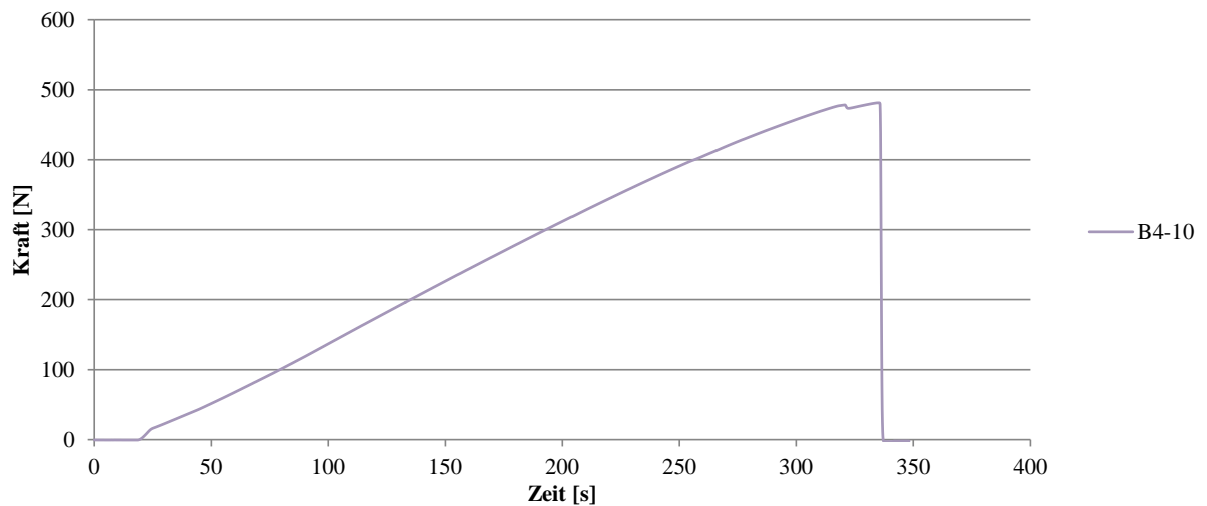


Abbildung 147: Bruttoquerschnittsbruch

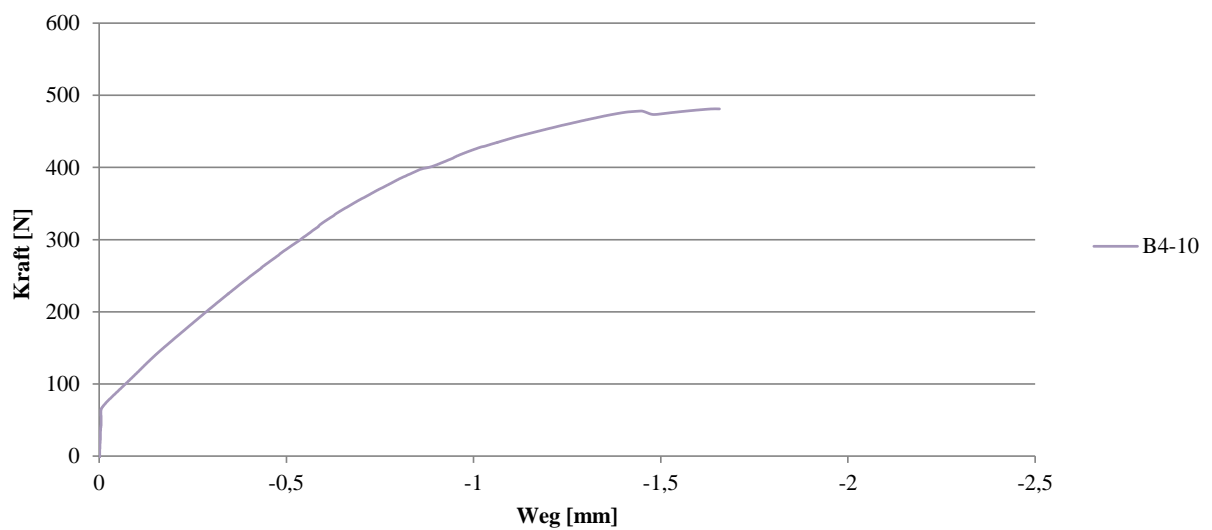
Da nur ein Prüfkörper auf Stahlbruch versagte, wurde auf eine statistische Auswertung verzichtet und die ermittelten Werte direkt angegeben.

**Tabelle 28: Auswertung; Prüfreihe „B4“; Stahlbruch**

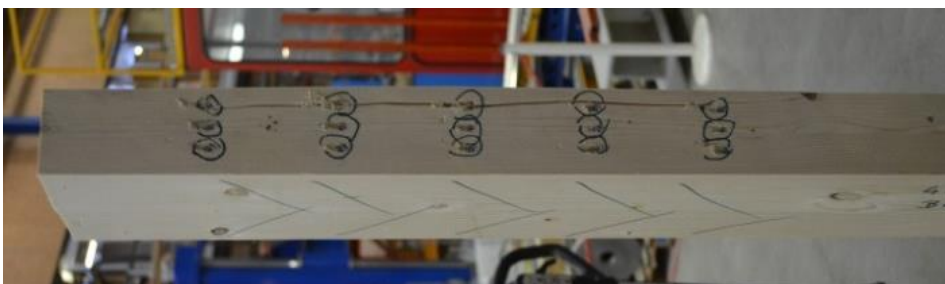
n = 1	u	$\rho$	$\rho_{12}$	t	v	v <sub>12</sub>	E <sub>dyn</sub>	E <sub>dyn,12</sub>	F	F <sub>max</sub> / (N*2)	$\sigma_{Bruch}$
	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Wert</b>	8,92	471	478	296	6082	6081	17412	17675	481	16,0	30,1



**Abbildung 148: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B4“; Stahlbruch**



**Abbildung 149: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B4“; Stahlbruch**



**Abbildung 150: Stahlbruch**



Der Boxplot der erreichten Bruchkräfte getrennt nach Versagensarten sind in Abbildung 151 dargestellt. Die Auswertung der Bruchursachen der Prüfreihe „B4“ ist aussagemäßig mit jener von „B3“ zu vergleichen.

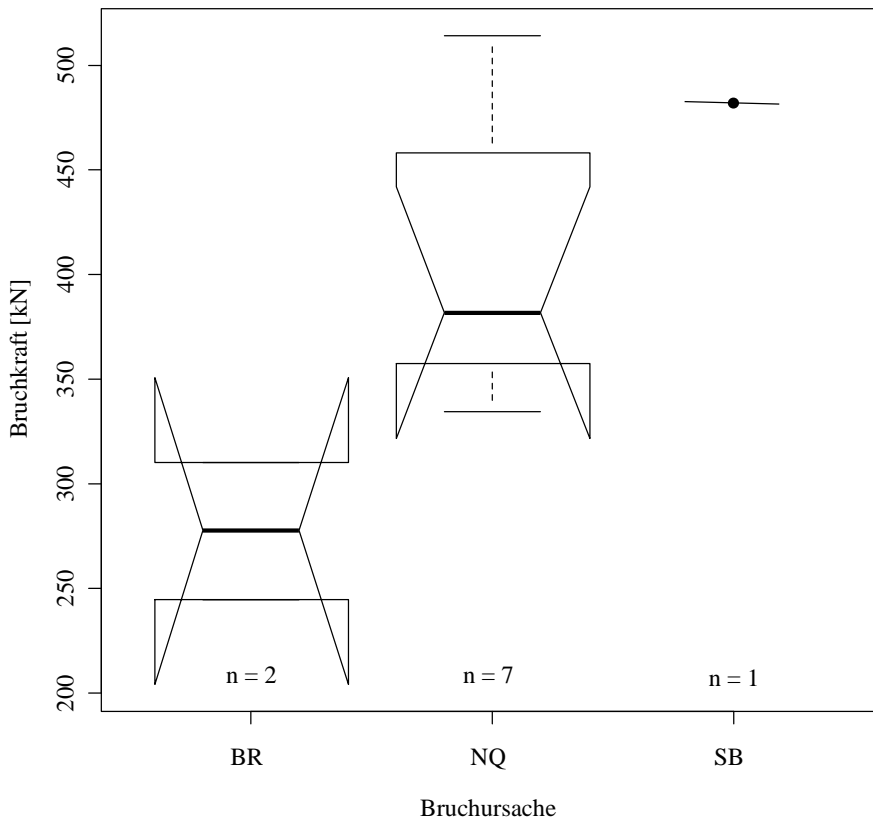


Abbildung 151: Vergleich der Bruchursachen; Prüfreihe „B4“

## 6-2.4 VERGLEICH UNTERSCHIEDLICHER PRÜFGRUPPEN

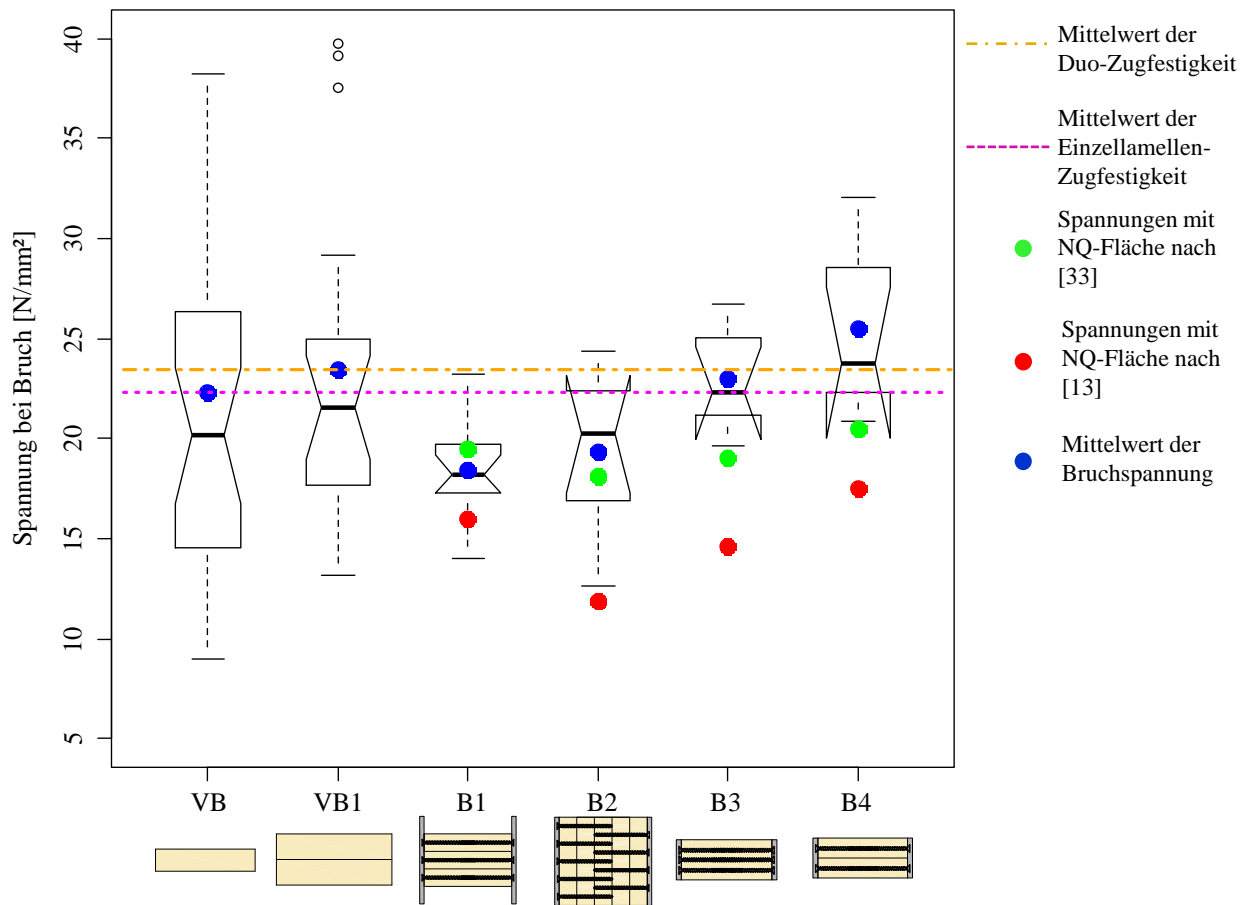


Abbildung 152: Vergleich der Spannungen von Nettoquerschnittsversagensfällen

Abbildung 152 zeigt die Verteilung der Spannungen bei Nettoquerschnittsversagen der verschiedenen Prüfreiheiten. Der blaue Punkt gibt den Mittelwert der jeweiligen experimentell ermittelten Bruchspannungen wieder.

$$\sigma_{t,0,pred.} = f_{t,0,brutto} \cdot \frac{A_{netto}}{A_{brutto}} \quad (6.9)$$

Die Formeln (2.6) und (2.7) in Kapitel 2-2.4 erläutern die jeweilige Berechnung der Nettoquerschnittsfläche nach [13] oder [33]. Der rote Punkt beschreibt die vorhergesagte Spannung nach Formel (6.9) mit der Nettoquerschnittsfläche nach [13] mit Formel (2.6). Die Spannung mit der Nettoquerschnittsfläche nach [33] mit Formel (2.7) ist mit einem grünen Punkt im Diagramm dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Spannung, mit der Nettoquerschnittsflächenermittlung nach Formel (2.7) mit 19,5 N/mm<sup>2</sup>, im Boxplot der Prüfreihe „B1“ am nächsten beim Mittelwert liegt. Die Annahme nach [13] mit Formel (2.7) zur Nettoquerschnittsermittlung (roter Punkt) ist mit 16,0 N/mm<sup>2</sup> um 18 Prozent geringer und somit konservativer.

Die errechneten Spannungen nach Formel (6.9) mit (2.6) und (2.7) ergeben sich für die Prüfreihe „B2“ zu 11,9 N/mm<sup>2</sup> (roter Punkt) beziehungsweise 18,1 N/mm<sup>2</sup> (grüner Punkt). Der Wert nach [13] mit einer Nettoquerschnittsfläche nach (2.6), weicht für Prüfreihe „B2“ stärker von der Spannung mit (2.7) ab als bei Prüfreihe „B1“, was auf eine größere Überlappungslänge der Schrauben zurückzuführen ist. Somit bietet die Spannung mit Gleichung (2.7) eine bessere Annäherung.

Die Festigkeitsvorhersagen mit den Theorien nach [13] mit Formel (2.6) und [33] mit Formel (2.7) liegen für die Prüfreiheiten „B3“ und „B4“ weit unter dem erreichten Wert. Diese Unstetigkeit gegenüber den

Prüfreihe „B1“ und „B2“ zeigt den Einfluss der Klassifizierung der Grundware. Die Ware der Prüfserie „B“ ist mit der Festigkeitsklasse T9 bis T10 zu beschreiben. Bei Betrachtung der empirisch ermittelten 5-Prozent-Quantile ergibt sich eine T-Klasse von T11. Da das Material dieser Prüfserie eine niedrigere Qualität aufweist als Prüfserie „A“, sind die Auswirkungen der Querschnittsschwächung durch die Verschraubung bei Serie „B“ nicht ausschlaggebend. Die Äste schwächen das Holz in einem so großen Ausmaß, dass nur Nettoquerschnittsversagen erreicht wird, wenn im Holzbauteil wenige Imperfektionen vorhanden sind.

Auf die Prüfreihe „B1“ und „B2“ hat dieser Einfluss weniger Bedeutung als für die Reihen „B3“ und „B4“, da die erstgenannten Reihen durch die Verklebung als Triobalken eine größere Homogenität und somit eine geringere Wahrscheinlichkeit für über den ganzen Querschnitt reichende Holzmerkmale (Astansammlungen) aufweisen als die Duobalken („B3“ und „B4“). Diese Homogenität macht den Bauteil weniger anfällig für astbedingtes Bruttoquerschnittsversagen. Zudem wurde bei den Prüfreihe „B1“ und „B2“ der Querschnitt etwas stärker geschwächt als bei „B3“ und „B4“.

Für Prüfreihe „B3“ ergeben sich Spannungen von 14,6 N/mm<sup>2</sup> (roter Punkt) beziehungsweise 19,0 N/mm<sup>2</sup> (grüner Punkt). Die Spannung mit Formel (6.9) und (2.6) liegt in Prüfreihe „B4“ mit 17,5 N/mm<sup>2</sup> um 14 Prozent unter jener Spannung (20,5 N/mm<sup>2</sup>) mit einer Nettoquerschnittsfläche nach (2.7).

## KAPITEL 7: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Schrauben weisen eine hohe axiale Beanspruchbarkeit auf und sind daher prädestiniert für den Einsatz als in Krafrichtung angeordnete Verbindungsmittel. Die unterschiedlichen Tragmechanismen und Versagensmodi wurden bereits hingehend erforscht. Dem Thema Nettoquerschnittsversagen wurde jedoch bis jetzt in der Fachwelt nur wenig Beachtung geschenkt. Da in ersten Forschungstätigkeiten zu dieser Thematik ein vermehrtes Auftreten von bisher als untypisch angesehenen Bruchbildern in Form von Nettoquerschnittsversagen auftrat, wurde das Thema in dieser Arbeit näher betrachtet und experimentell analysiert. Bisher war es üblich, bei Schrägschraubverbindungen nur die elliptische Schnittfläche der Schrauben vom Bruttoquerschnitt zu subtrahieren. Die Auswertung der durchgeführten Versuche zeigte jedoch, dass eine erhöhte Querschnittsschwächung durch die eingebrachten Schrauben in Rechnung zu stellen ist.

Es wurden zwei Prüfserien mit unterschiedlichen Holzqualitäten durchgeführt. Die erste Prüferie beinhaltet Zugversuche der Brettlamellen und Duo-Querschnitte ohne Verbindungsmittel, um die Zugfestigkeit des Materials zu bestimmen. Die Zugversuche mit schräg eingebrachten Holzschrauben wurden als einreihige Stahl-Holz-Verbindungen konzipiert.

Das bei dieser einreihigen Schraubenanordnung aufgetretene Aufspalten infolge Querzugversagen, konnte mit Hilfe von Querzugverstärkungen, welche normal zur Belastungsrichtung eingeschraubt wurden, verhindert werden. Da diese Versagensart nur bei einreihiger Verschraubung aufgetreten ist, kann davon ausgegangen werden, dass vor allem ein geringes Holzvolumen ein Spaltversagen begünstigt. Der Einfluss der Mindestabstände ist ebenfalls von Bedeutung für diese Betrachtungsweise. Ist ein Querschnitt ausreichend auf Querzug verstärkt oder die Spaltkraft aufgrund der Bauteil- und Verbindungsmittelkonfiguration gering, kommt es aufgrund einer Querschnittsschwächung durch die Verbindungsmittel zu einem Versagen im Nettoquerschnitt. Die Auswertung und der Vergleich der Ergebnisse mit den Theorien nach [13] und [33] ergab eine sehr gute Übereinstimmung der im Versuch ermittelten Spannungen, insbesondere mit den mittels Nettoquerschnittsfläche nach [13] ermittelten Spannungen.

Die zweite Prüferie erforderte ebenfalls die experimentelle Bestimmung der Zugfestigkeiten der Einzellamellen und Duo-Querschnitte. Die Duo-Querschnitte wurden in derselben Prüfkfiguration wie Prüferie „A“, allerdings mit zwei- beziehungsweise dreireihiger Anordnung der Schrauben geprüft. Weiters wurden Trioquerschnitte hergestellt, deren Prüfung mit vier Stahllaschen erfolgte. Die Auswertung dieser Prüfreihe ergab für die Duo-Querschnitte nur eine mäßige Übereinstimmung mit den oben genannten Theorien. Dies kann auf eine ausgeprägte Fehlerstellenhäufigkeit des Materials zurückzuführen sein. Da durch viele Äste der Querschnitt bereits mehr geschwächt ist als durch die verwendeten Verbindungsmittel, versagt der Prüfkörper im Bereich der größten Querschnittsschwächung – in diesem Fall in einem Abschnitt des Holzes mit den meisten Fehlstellen. Die Versuche mit Trio-Querschnitten lieferten jedoch eine bessere Übereinstimmung, insbesondere erneut mit der Theorie nach [33], da durch die Verklebung eine Homogenisierung des Holzes und dadurch ein geringerer Einfluss durch die Astigkeit besteht.

Mit ÖNORM EN 14080 [4] erfolgte, mit den in den Versuchen ermittelten Zugfestigkeiten und der Umrechnung dieser in charakteristische Werte mittels ÖNORM EN 14358 [3], eine Einordnung der Einzellamellenzugfestigkeit in T-Klassen. Die Auswertung ergab für das Material der Prüferie „A“ eine T-Klassenzugehörigkeit von T12 (mit empirisch ermittelter 5-Prozent-Quantile: T16) und für Prüferie

„B“ T9 bis T10 (mit empirisch ermittelter 5-Prozent-Quantile: T11). Das Holz der Prüfserie „B“ ist somit, durch die geringere T-Klassifizierung, von schlechterer Qualität als jenes von Prüfserie „A“.

Bezugnehmend auf den Vergleich der Spannungen der unterschiedlichen Prüfgruppen mit Berücksichtigung des Nettoquerschnittes kann zusammenfassend gesagt werden, dass mit zunehmender Sortierklasse und damit zunehmender Qualität des Grundmaterials, der Einfluss der Querschnittsschwächung durch das Verbindungsmittel zunimmt.

Bei Holzmaterialien mit höheren Grundfestigkeiten wird die Nettoquerschnittstragfähigkeit durch die Nettoquerschnittsformel nach [33] gut angenähert. Der Vorschlag nach [13] ist besonders in Fällen mit großen Überlappungslängen der gekreuzten Schrauben als zu konservativ anzusehen.

Diese Erkenntnisse lassen den Schluss zu, dass die bisherige Handhabung mit alleinigem Abzug der elliptischen Schnittflächen des Schraubenquerschnitts vom Bruttoquerschnitt, in bestimmten Fällen keine sichere Nachweisführung erlaubt. Es wird vorgeschlagen, die Nettoquerschnittsformel nach [33] in das Nachweisformat der Tragfähigkeitsberechnung aufzunehmen.

# ANHANG A VERZEICHNISSE

## A-1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schraubenbezeichnung und Schraubengeometrie .....	1
Abbildung 2: Mindestabstände.....	4
Abbildung 3: Schrägschraubverbindungen nach [13] .....	6
Abbildung 4: "Optimale" Schraubenneigung für eine duktile Verbindung nach [34] .....	6
Abbildung 5: Schrägschraubverbindungen mit Kräftedreieck nach [13].....	7
Abbildung 6: Mindestabstände für Schrägschraubverbindungen.....	7
Abbildung 7: Verschiedene Möglichkeiten von Verbindungen mit gekreuzt angeordneten Schrauben nach [27].....	8
Abbildung 8: Biegesteife Verbindungen nach [27];.....	8
Abbildung 9: Spannungen im geschwächten Bauteil nach [28]; oben: Verlauf der Spannungstrajektorien; .....	9
Abbildung 10: Verschiedene Varianten der Nettoquerschnittflächenberechnung;.....	14
Abbildung 11: KAR-Wert; Modell Holzteilstück, projizierte Flächen der Äste nach [31] .....	16
Abbildung 12: Prüfplan; Übersicht über das Versuchsprogramm .....	18
Abbildung 13: Probekörperherstellung; links: Gerät zum Auftrag des Klebers; rechts: hydraulische Presse.....	19
Abbildung 14: Einzellamellenbezeichnung, Prüfserie A .....	19
Abbildung 15: Einzellamellenbezeichnung, Prüfserie B .....	20
Abbildung 16: Messungen an Probekörpern; links: Schiebelehre und Maßband; rechts: Waage.....	21
Abbildung 17: Holzfeuchtebestimmung; links: Waage; rechts: Darrschrank .....	21
Abbildung 18: Schraubenkennzeichnung; Länge, effektive Länge, Kopf-, Kern- und Gewindedurchmesser.....	24
Abbildung 19: Lasche 1; oben: Ansicht; unten: Schnitt; ohne Maßstab .....	25
Abbildung 20: Lasche 2; links: Ansicht; rechts oben: Schnitt A; rechts unten: Schnitt B; ohne Maßstab .....	25
Abbildung 21: Lasche 3; oben: Ansicht; unten: Schnitt; ohne Maßstab .....	25
Abbildung 22: Versuchsaufbau, Prüfreihe „VA“ und „VA1“ .....	28
Abbildung 23: Versuchsaufbau, Prüfreihe „VA“ und „VA1“ .....	29
Abbildung 24: Versuchskonfiguration; Prüfreihe A; oben: Grundriss; unten: Ansicht .....	30
Abbildung 25: Versuchsaufbau, Prüfreihe A .....	31
Abbildung 26: Versuch mit Querszugverstärkung; Prüfreihe A.....	31
Abbildung 27: Prüfprinzip; Prüfreihe B1 und B2 .....	33
Abbildung 28: Versuchskonfiguration; Prüfreihe B1 und B2; oben: Grundriss; unten: Ansicht.....	33



Abbildung 29: Versuchsaufbau; Prüfreihe B1 und B2 .....	34
Abbildung 30: Versuchskonfiguration B3 und B4; oben: Grundriss; unten: Ansicht .....	34
Abbildung 31: Versuchsaufbau; Prüfreihe B3 und B4 .....	35
Abbildung 32: Modellvergleich Rohdichte; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung .....	36
Abbildung 33: Modellvergleich Zugfestigkeit; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung ...	37
Abbildung 34: Modellvergleich dynamischer E-Modul; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung .....	37
Abbildung 35: links: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und dynamischem E-Modul; rechts: Korrelation .....	38
Abbildung 36: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „VA“ .....	39
Abbildung 37: Kraft-Maschinenweg-Diagramm; Prüfreihe „VA“ .....	39
Abbildung 38: Astansammlung .....	42
Abbildung 39: Kantenast .....	42
Abbildung 40: Lokale Schrägfaser .....	43
Abbildung 41: Flügelast .....	43
Abbildung 42: Längsriss .....	44
Abbildung 43: Sprödbruch .....	44
Abbildung 44: Modellvergleich Rohdichte; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung .....	45
Abbildung 45: Modellvergleich Zugfestigkeit; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung ...	45
Abbildung 46: Modellvergleich dynamischer E-Modul; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung .....	46
Abbildung 47: links: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und dynamischem E-Modul; rechts: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und Rohdichte .....	46
Abbildung 48: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „VA1“ .....	47
Abbildung 49: Kraft-Maschinenweg-Diagramm; Prüfreihe „VA1“ .....	47
Abbildung 50: Astansammlung .....	50
Abbildung 51: Kantenast .....	50
Abbildung 52: Lokale Schrägfaser .....	51
Abbildung 53: Flügelast .....	51
Abbildung 54: Längsriss .....	52
Abbildung 55: Sprödbruch .....	52
Abbildung 56: Kräftedreieck 3D; Kraftrichtungen der Abscher- und Axialkomponenten .....	53
Abbildung 57: Aufspalten; Prüfreihe „A“ .....	54
Abbildung 58: Mindestabstände; Prüfreihe „A“ .....	54
Abbildung 59: Querzugverstärkungen; links oben: Querzugverstärkung mit zwei Schrauben im Vorholz; .....	55
Abbildung 60: Modellvergleich Rohdichte für Normalverteilung (links) und Lognormalverteilung (rechts) .....	55

Abbildung 61: Modellvergleich dynamischer E-Modul: links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung.....	56
Abbildung 62: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „A“; Bruttoquerschnittsbruch .....	57
Abbildung 63: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „A“; Bruttoquerschnittsbruch .....	57
Abbildung 64: Bruttoquerschnittsbruch .....	57
Abbildung 65: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „A“; Mischbruch.....	58
Abbildung 66: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „A“; Mischbruch .....	58
Abbildung 67: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „A“; Nettoquerschnittsbruch .....	59
Abbildung 68: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „A“; Nettoquerschnittsbruch .....	59
Abbildung 69: Nettoquerschnittsbruch .....	60
Abbildung 70: Nettoquerschnittsbruch .....	61
Abbildung 71: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „A“; Querzugversagen.....	62
Abbildung 72: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „A“; Querzugversagen.....	62
Abbildung 73: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „A“; Stahlbruch .....	63
Abbildung 74: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „A“; Stahlbruch .....	63
Abbildung 75: Vergleich der Bruchursachen; Prüfreihe „A“ .....	64
Abbildung 76: Vergleich der Spannungen im Querschnitt (Prüfreihe „A“ nur Nettoquerschnittsversagen) .....	65
Abbildung 77: Modellvergleich Rohdichte für Normalverteilung (links) und Lognormalverteilung (rechts).....	66
Abbildung 78: Modellvergleich Zugfestigkeit; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung ....	66
Abbildung 79: Modellvergleich dynamischer E-Modul; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung.....	67
Abbildung 80: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und dynamischem E-Modul (links) und Korrelation zwischen Zugfestigkeit und Rohdichte (rechts) .....	67
Abbildung 81: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „VB“ .....	68
Abbildung 82: Kraft-Maschinenweg-Diagramm; Prüfreihe „VB“ .....	68
Abbildung 83: Astansammlung.....	70
Abbildung 84: Kantenast.....	70
Abbildung 85: Lokale Schrägfaser.....	71
Abbildung 86: Flügelast .....	71
Abbildung 87: Längsriss .....	72
Abbildung 88: Sprödbbruch.....	72
Abbildung 89: Globale Schrägfaser .....	73
Abbildung 90: Modellvergleich Rohdichte: links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung .....	74
Abbildung 91: Modellvergleich Zugfestigkeit: links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung ....	74
Abbildung 92: Modellvergleich dynamische E-Moduln: links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung.....	75

Abbildung 93: links: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und dynamischem E-Modul; rechts: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und Rohdichte.....	75
Abbildung 94: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „VB1“ .....	76
Abbildung 95: Kraft-Maschinenweg-Diagramm; Prüfreihe „VB1“ .....	76
Abbildung 96: Astansammlung .....	78
Abbildung 97: Kantenast.....	78
Abbildung 98: Lokale Schrägfaser.....	79
Abbildung 99: Flügelast .....	79
Abbildung 100: Längsriss.....	80
Abbildung 101: Spröder Holzbruch .....	80
Abbildung 102: Globale Schrägfaser .....	81
Abbildung 103: Modellvergleich dynamischer E-Modul; links: für Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung .....	82
Abbildung 104: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B1“; Nettoquerschnittsversagen.....	83
Abbildung 105: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B1“; Nettoquerschnittsversagen.....	83
Abbildung 106: Nettoquerschnittsbruch.....	84
Abbildung 107: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B1“; Stahlversagen.....	85
Abbildung 108: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B1“; Stahlversagen.....	85
Abbildung 109: Stahlbruch.....	86
Abbildung 110: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B1“; Bruttoquerschnittsversagen.....	87
Abbildung 111: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B1“; Bruttoquerschnittsversagen .....	87
Abbildung 112: Bruttoquerschnittsversagen .....	87
Abbildung 113: Vergleich der Bruchursachen; Prüfreihe „B1“ .....	88
Abbildung 114: Modellvergleich dynamischer E-Modul ; rechts: Normalverteilung; links: Lognormalverteilung .....	89
Abbildung 115: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B2“; Nettoquerschnittsversagen.....	90
Abbildung 116: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B2“; Nettoquerschnittsversagen.....	90
Abbildung 117: Nettoquerschnittsversagen.....	91
Abbildung 118: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B2“; Bruttoquerschnittsversagen .....	92
Abbildung 119: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B2“; Bruttoquerschnittsversagen .....	92
Abbildung 120: Bruttoquerschnittsbruch .....	92
Abbildung 121: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B2“; Mischbruch.....	93
Abbildung 122: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B2“; Mischbruch.....	93
Abbildung 123: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B2“; Stahlbruch.....	94
Abbildung 124: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B2“; Stahlbruch.....	94
Abbildung 125: Stahlbruch                      Abbildung 126: Schubversagen (Blockscheren).....	95
Abbildung 127: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B2“; Schubversagen .....	95
Abbildung 128: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B2“; Schubversagen.....	96

Abbildung 129: Vergleich der Bruchursachen; Prüfreihe „B2“ .....	97
Abbildung 130: Schraubenanordnung; Prüfreihe "B2" .....	97
Abbildung 131: Modellvergleich Rohdichte: links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung .....	98
Abbildung 132: Modellvergleich dynamischer E-Modul; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung .....	98
Abbildung 133: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B3“; Nettoquerschnittsversagen.....	99
Abbildung 134: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B3“; Nettoquerschnittsversagen .....	99
Abbildung 135: Nettoquerschnittsbruch .....	100
Abbildung 136: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B3“; Bruttoquerschnittsversagen .....	101
Abbildung 137: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B3“; Bruttoquerschnittsversagen .....	101
Abbildung 138: Bruttoquerschnittsbruch .....	101
Abbildung 139: Vergleich der Bruchursachen; Prüfreihe „B3“ .....	102
Abbildung 140: Modellvergleich Rohdichte; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung .....	103
Abbildung 141: Modellvergleich dynamischer E-Modul; links: Normalverteilung; rechts: Lognormalverteilung .....	103
Abbildung 142: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B4“; Nettoquerschnittsversagen.....	104
Abbildung 143: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B4“; Nettoquerschnittsversagen .....	104
Abbildung 144: Nettoquerschnittsbruch .....	105
Abbildung 145: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B4“; Bruttoquerschnittsversagen .....	106
Abbildung 146: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B4“; Bruttoquerschnittsversagen .....	106
Abbildung 147: Bruttoquerschnittsbruch .....	106
Abbildung 148: Kraft-Zeit-Diagramm; Prüfreihe „B4“; Stahlbruch.....	107
Abbildung 149: Kraft-Weg-Diagramm; Prüfreihe „B4“; Stahlbruch .....	107
Abbildung 150: Stahlbruch .....	107
Abbildung 151: Vergleich der Bruchursachen; Prüfreihe „B4“ .....	108
Abbildung 152: Vergleich der Spannungen von Nettoquerschnittsversagensfällen .....	109

## A-2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Mindestabstände nach EN 1995-1-1 [1], Z-9.1-656 [6] und ETA-11/0190 [7]..	5
Tabelle 2: Parameter der verwendeten Schraubentypen.....	24
Tabelle 3: Prüfplan; Prüfserie „B“.....	35
Tabelle 4: Auswertung; Prüfreihe „VA“ .....	38
Tabelle 5: Charakteristische Festigkeitseigenschaften für T-Klassen nach ÖNORM EN 14080 [4].....	41
Tabelle 6: Balkenaufbau von homogenem Brettschichtholz und Mindestwerte für die Keilzinkenbiegefestigkeit in Lamellen [N/mm <sup>2</sup> ] .....	41
Tabelle 7: Auswertung; Prüfreihe „VA1“ .....	47
Tabelle 8: Auswertung; Prüfreihe „A“; Bruttoquerschnittsbruch.....	56
Tabelle 9: Auswertung; Prüfreihe „A“; Mischbruch .....	58
Tabelle 10: Auswertung; Prüfreihe „A“; Nettoquerschnittsbruch.....	59
Tabelle 11: Auswertung; Prüfreihe „A“; Querkzugversagen .....	62
Tabelle 12: Auswertung; Prüfreihe „A“; Stahlbruch.....	63
Tabelle 13: Auswertung; Prüfreihe „VB“ .....	68
Tabelle 14: Charakteristische Festigkeitseigenschaften für T-Klassen nach ÖNORM EN 14080 [4].....	69
Tabelle 15: Auswertung; Prüfreihe „VB1“ .....	76
Tabelle 16: Auswertung; Prüfreihe „B1“; Nettoquerschnittsversagen .....	82
Tabelle 17: Auswertung; Prüfreihe „B1“; Stahlversagen.....	85
Tabelle 18: Auswertung; Prüfreihe „B1“; Bruttoquerschnittsversagen.....	86
Tabelle 19: Auswertung; Prüfreihe „B2“; Nettoquerschnittsversagen .....	89
Tabelle 20: Auswertung; Prüfreihe „B2“; Bruttoquerschnittsversagen.....	92
Tabelle 21: Auswertung; Prüfreihe „B2“; Mischbruch .....	93
Tabelle 22: Auswertung; Prüfreihe „B2“; Stahlbruch .....	94
Tabelle 23: Auswertung; Prüfreihe „B2“; Schubversagen .....	95
Tabelle 24: Auswertung; Prüfreihe „B3“; Nettoquerschnittsversagen .....	99
Tabelle 25: Auswertung; Prüfreihe „B3“; Bruttoquerschnittsversagen.....	100
Tabelle 26: Auswertung; Prüfreihe „B4“; Nettoquerschnittsversagen .....	104
Tabelle 27: Auswertung; Prüfreihe „B4“; Bruttoquerschnittsversagen.....	105
Tabelle 28: Auswertung; Prüfreihe „B4“; Stahlbruch .....	107

## A-3 Literaturverzeichnis

### Normen und Zulassungen

- [1] ÖNORM EN 1995-1-1: 2009, "Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten, Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau"
- [2] ÖNORM EN 14592: 2012, „Holzbauwerke - Stiftförmige Verbindungsmittel – Anforderungen“
- [3] ÖNORM EN 14358: 2007, „Holzbauwerke - Berechnung der 5-Prozent-Quantile für charakteristische Werte und Annahmekriterien für Proben“
- [4] ÖNORM EN 14080: 2013, „Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen“
- [5] Produktdatenblatt „Rapid Vollgewinde“, Schmid Schrauben Hainfeld, 2014
- [6] Z-9.1-656, Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, „Holzschrauben Stardrive Vollgewinde und Stardrive 2 Gewinde als Holzverbindungsmittel“, Jahr 2012, gültig bis 1. Juli 2017
- [7] ETA-11-0190, Europäisch Technische Zulassung, Würth Schrauben, „Selbstbohrende Schrauben als Holzverbindungsmittel“, Jahr 2013, gültig bis 27. Juni 2018
- [8] EN 13183-3:2005, "Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz; Teil 3: Schätzung durch kapazitives Messverfahren"
- [9] EN 1382:1999; "Holzbauwerke – Prüfverfahren – Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmiteln"
- [10] EN 1383:1999; "Holzbauwerke – Prüfverfahren – Prüfung von Holzverbindungsmiteln auf Kopfdurchziehen"

### Forschungsberichte, Bücher, Abschlussarbeiten

- [11] KRENN H., "P06 connections – Verbindungstechnik im Ingenieurholzbau – Selbstbohrende Holzschrauben in hoch beanspruchten Bereichen“, Forschungsbericht, holz.bau forschung gmbh, Technische Universität Graz, März/April 2009
- [12] BLASS H.J., ENDERS-COMBERG M., "Fachwerksträger für den industriellen Holzbau“, Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 22, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktion (Hrsg.), Universitätsverlag Karlsruhe, 2012
- [13] RINGHOFER A., BRANDNER R., SCHICKHOFER G., „Entwicklung einer optimierten Schraubengeometrie für hochbeanspruchte Stahl-Holz-Verbindungen“, Bautechnik, DOI: 10.1002 / bate.201300072, pp 31-37, 2014
- [14] BLASS H.J., BEJTKA I., UIBEL T., „Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde“, Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 4, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktion (Hrsg.), Universitätsverlag Karlsruhe, 2006



- [15] ENDERS-COMBERG M., BLASS H.J., “Influence of fasteners in the compression area of timber members“, Working Commission W18, Meeting 46, Karlsruhe Institute of Technology, August 2013
- [16] TOMASI R., CROSATTI A., PIAZZA M., “Theoretical and experimental analysis of timber-to-timber joints connected with inclined screws“, Construction and Building Materials 24, pp 1560-1571, 2010
- [17] JOCKWER R., STEIGER R., FRANGI A., “Fully Threaded Self-tapping Screws Subjected to Combined Axial and Lateral Loading with Different Load to Grain Angles“, Rilem Bookseries 9, DOI: 10.1007/978-94-007-7811-5\_25, 2014
- [18] JOCKWER R., STEIGER R., FRANGI A., “Design Model für inclined screws unter varying load to grain angles“, Inter-Meeting Bath, 2014
- [19] BLASS H.J., BEJTKA I., “Joints with inclines screws“, Universität Karlsruhe, International Council für Research and Innovation in Building and Condruction, Working Commission W18, Japan 2002
- [20] KEVARINMÄKI A., “Joints with inclines srews“, VTT Building and Transport, International Council für Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18, Japan 2002
- [21] BLASS H.J., BEJTKA I., “Screws with continous threads in timber connections“, Universität Karlsruhe
- [22] BRANDNER R., „Klebertechnologie und Holzwerkstoffe – Brettschichtholz“, Skriptum, TU Graz
- [23] KRENN H., SCHICKHOFER G., “Joints with inclines screws and steel plates as outer members“, Paper präsentiert im Rahmen des 42. CIB-Meetings, Dübendorf, Schweiz, 2009
- [24] PIRNBACHER G. u.w., “Tagungsband: 6. Grazer Holzbau-Fachtagung“, holz.bau forschungsgmbh, TU Graz, 2007
- [25] OBERMAYR I., “Leistungsfähige Hirnholz-Schrauben- und Klebeverbindungen für schlanke Birken-Laubholzkonstruktionen“, Masterarbeit am Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 2014
- [26] SCHMID M., “Anwendung der Bruchmechanik auf Verbindungen mit Holz“, Dissertation, Karlsruhe, 2002
- [27] BEJTKA I., “Verstärkung von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben“, Dissertation Universitätsverlag Karlsruhe, 2005
- [28] COLLING F., “Holzbau – Grundlagen und Bemessung nach EC 5“, 4. Auflage, Springer Verlag, 2014
- [29] SCHNEIDER K., “Bautabellen für Ingenieure“, 20. Auflage, Werner Verlag, 2012

- [30] SCHICKHOFER G., “Holzbau – Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz”, Skriptum, TU Graz, 2009
- [31] AUGUSTIN M., “Eine zusammenfassende Darstellung der Festigkeitssortierung von Schnittholz”, Diplomarbeit, TU Graz, 2004
- [32] MAYDL P., TRITTHART J., “Baustofflehre GL – Vorlesung”, Skriptum, TU Graz, 2007
- [33] BRUNAUER A., “Arbeitsblatt Nettoquerschnittsnachweis”, unveröffentlichtes internes Arbeitsblatt, 2014
- [34] GEHRI E., “Schraubenverbindungen für Laubholzkonstruktionen”, Beitrag im Rahmen des 16. internationalen Holzbauforums (16. IHF 2010), Garmisch-Partenkirchen, 2010
- [35] RINGHOFER A., BRANDNER R., GRABNER M., SCHICKHOFER G., “Die Ausziehfestigkeit selbstbohrender Holzschrauben in geschichteten Holzprodukten”, Doktorandenkolloquium “Holzbau Forschung + Praxis”, Universität Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann, 2014



## ANHANG B ERGEBNISAUSWERTUNGEN

### B-1 Ergebnisse; Prüfreihe „VA“

lfd. Nr.	Probekörper- bezeichnung	Länge	Breite 1	Breite 2	Breite 3	Höhe/ Dicke 1	Höhe/ Dicke 2	Höhe/ Dicke 3	Masse m	Rohdichte $\rho$	MW Breite	MW Höhe	Datum Eingang	Masse Eingang
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm]	[mm]	[-]	[g]
1	VA_1	2201,0	200,23	200,51	200,29	30,20	30,21	30,22	4856	364,53	200,34	30,21	03.10.2014	66,47
2	VA_2	2201,0	200,17	200,23	200,48	30,19	30,19	30,08	5430	408,49	200,29	30,15	03.10.2014	46,54
3	VA_3	2201,0	200,34	200,46	200,27	30,25	30,21	30,19	5432	407,76	200,31	30,22	03.10.2014	72,68
4	VA_4	2201,0	200,16	200,27	200,1	30,25	30,14	30,20	5542	416,56	200,18	30,20	03.10.2014	74,91
5	VA_5	2201,0	200,32	200,39	200,42	30,24	30,18	30,19	5784	434,22	200,38	30,20	03.10.2014	72,46
6	VA_6	2201,0	200,37	200,25	200,31	30,28	30,2	30,25	5276	395,69	200,31	30,24	03.10.2014	65,11
7	VA_7	2201,0	200,57	200,48	200,44	30,18	30,11	30,18	5050	379,47	200,50	30,16	03.10.2014	65,61
8	VA_8	2201,5	200,16	200,24	200,26	30,24	30,17	30,17	5614	421,83	200,22	30,19	03.10.2014	87,40
9	VA_9	2201,4	199,86	200,17	200,35	30,26	30,22	29,79	6708	506,02	200,13	30,09	03.10.2014	87,59
10	VA_10	2201,0	200,09	200,17	200,26	30,20	30,13	30,18	5512	414,67	200,17	30,17	03.10.2014	75,37
11	VA_11	2200,5	200,84	200,26	200,18	30,31	30,19	30,2	5276	395,43	200,55	30,23	03.10.2014	73,92
12	VA_12	2201,0	200,18	200,28	200,28	30,23	30,14	30,15	5602	421,24	200,25	30,17	03.10.2014	84,80
13	VA_13	2201,0	199,99	200,9	200,36	30,22	30,17	30,19	5872	440,88	200,42	30,19	03.10.2014	73,36
14	VA_14	2201,2	199,96	200,23	200,28	30,24	30,12	30,19	6086	457,65	200,16	30,18	03.10.2014	63,58
15	VA_15	2001,4	200,26	200,34	200,32	30,24	30,20	29,91	5788	479,39	200,31	30,12	03.10.2014	49,92
16	VA_16	2201,0	200,37	200,15	200,34	30,25	30,18	30,10	5492	412,85	200,29	30,18	03.10.2014	80,65
17	VA_17	2201,3	200,04	200,19	200,25	30,23	30,19	30,02	5332	401,42	200,16	30,15	03.10.2014	70,10
18	VA_18	2201,0	199,79	200,20	200,15	30,19	30,14	30,20	5386	405,36	200,05	30,18	03.10.2014	74,04
19	VA_19	2201,0	200,21	200,12	200,16	30,25	30,18	30,22	6072	456,12	200,16	30,22	03.10.2014	57,75
20	VA_20	2201,2	200,19	200,11	200,2	30,23	30,25	30,23	5768	432,95	200,17	30,24	03.10.2014	76,52

lfd. Nr.	Probekörper- bezeichnung	Masse Ausgang	Datum Ausgang	Holz- feuchte u	Rohdichte $\rho_{12}$	Ultraschall- laufzeit t	Ultraschall- geschw. v	Ultraschall- geschw. $v_{12}$	dyn. E- Modul $E_{dyn}$	dyn. E- Modul $E_{dyn,12}$	Kraft F	Zugfestigkeit $f_{t,0}$	Lamellenbez.
[-]	[-]	[g]	[-]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
1	VA_1	59,59	07.10.2014	11,5	365,36	406,00	5421,18	5421,05	10713,24	10737,07	155,73	25,73	21_220
2	VA_2	41,91	07.10.2014	11,0	410,43	381,00	5776,90	5776,61	13632,27	13695,81	122,85	20,34	22_220
3	VA_3	65,10	07.10.2014	11,6	408,48	398,00	5530,15	5530,05	12470,25	12492,00	200,67	33,15	23_220
4	VA_4	67,50	07.10.2014	11,0	418,69	392,00	5614,80	5614,49	13132,34	13198,03	189,84	31,41	24_220
5	VA_5	65,01	07.10.2014	11,5	435,39	417,00	5278,18	5278,03	12096,90	12128,88	157,98	26,10	25_220
6	VA_6	58,11	07.10.2014	12,0	395,60	405,00	5434,57	5434,58	11686,45	11683,81	144,93	23,92	26_220
7	VA_7	59,05	07.10.2014	11,1	381,16	391,00	5629,16	5628,89	12024,51	12076,93	145,89	24,13	27_220
8	VA_8	78,70	07.10.2014	11,1	423,82	367,00	5998,64	5998,34	15178,91	15249,12	196,47	32,50	28_220
9	VA_9	78,65	07.10.2014	11,4	507,62	366,00	6014,75	6014,55	18306,39	18363,11	274,44	45,57	29_220
10	VA_10	67,31	07.10.2014	12,0	414,73	421,00	5228,03	5228,02	11334,01	11335,43	103,65	17,16	30_220
11	VA_11	66,10	07.10.2014	11,8	395,77	404,00	5446,78	5446,73	11731,53	11741,26	50,46	8,32	31_220
12	VA_12	76,24	07.10.2014	11,2	422,87	418,00	5265,55	5265,33	11679,44	11723,58	107,25	17,75	32_220
13	VA_13	65,75	07.10.2014	11,6	441,82	379,00	5807,39	5807,26	14869,03	14900,02	181,80	30,04	33_220
14	VA_14	57,36	07.10.2014	10,8	460,30	368,00	5981,52	5981,16	16374,14	16466,78	176,82	29,27	34_220
15	VA_15	44,78	07.10.2014	11,5	480,64	405,00	4941,73	4941,59	11707,12	11737,01	119,37	19,79	35_220
16	VA_16	72,64	07.10.2014	11,0	414,85	421,00	5228,03	5227,76	11284,00	11337,73	112,80	18,66	36_220
17	VA_17	63,12	07.10.2014	11,1	403,31	374,00	5885,83	5885,54	13906,24	13970,32	189,36	31,38	37_220
18	VA_18	66,67	07.10.2014	11,1	407,28	390,00	5643,59	5643,31	12910,84	12970,58	105,60	17,49	38_220
19	VA_19	51,85	07.10.2014	11,4	457,54	370,00	5948,65	5948,45	16140,51	16189,56	173,04	28,61	39_220
20	VA_20	68,38	07.10.2014	11,9	433,16	381,00	5777,43	5777,40	14451,37	14458,16	179,94	29,73	40_220

## B-2 Ergebnisse; Prüfreihe „VA1“

lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	Länge	Breite 1	Breite 2	Breite 3	Höhe/Dicke 1	Höhe/Dicke 2	Höhe/Dicke 3	Masse m	Rohdichte $\rho$	MW Breite	MW Höhe	Datum Eingang	Masse Eingang
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm]	[mm]	[-]	[g]
1	VA1_1	2201,2	200,19	200,19	200,16	60,46	60,41	60,25	10686	401,69	200,18	60,37	03.10.2014	124,66
2	VA1_2	2201,0	199,98	200,10	200,38	60,42	60,54	60,12	10606	398,86	200,15	60,36	03.10.2014	135,39
3	VA1_3	2201,3	200,20	200,19	200,19	60,40	60,36	60,17	11874	446,76	200,19	60,31	03.10.2014	129,12
4	VA1_4	2201,0	200,21	200,22	200,10	60,35	60,37	60,33	12840	482,90	200,18	60,35	03.10.2014	190,89
5	VA1_5	2201,1	200,22	200,12	199,95	60,44	60,44	60,24	11844	445,42	200,10	60,37	03.10.2014	140,02
6	VA1_6	2201,2	200,21	200,15	200,13	60,40	60,28	60,16	11320	426,22	200,16	60,28	03.10.2014	155,28
7	VA1_7	2001,5	200,29	200,14	199,95	60,35	60,30	60,09	10404	431,13	200,13	60,25	03.10.2014	131,56
8	VA1_8	2201,0	200,43	200,14	199,82	60,33	60,33	60,34	11796	443,86	200,13	60,33	03.10.2014	148,51
9	VA1_9	2201,4	200,21	200,19	200,00	60,36	60,33	60,21	12602	474,36	200,13	60,30	03.10.2014	184,95
10	VA1_10	2201,0	200,28	200,18	199,9	60,39	60,43	60,30	10800	569,58	200,12	60,37	03.10.2014	149,44

lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	Masse Ausgang	Datum Ausgang	Holzfeuchte u	Rohdichte $\rho_{12}$	Ultraschalllaufzeit t	Ultraschallgeschw. v	Ultraschallgeschw. $v_{12}$	dyn. E-Modul $E_{dyn}$	dyn. E-Modul $E_{dyn,12}$	Kraft F
[-]	[-]	[g]	[-]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]
1	VA1_1	111,92	07.10.2014	11,4%	402,93	376,00	5854,26	5854,06	13766,80	13808,36	306,66
2	VA1_2	122,07	07.10.2014	10,9%	401,03	399,00	5516,29	5515,97	12137,07	12201,70	287,07
3	VA1_3	115,94	07.10.2014	11,4%	448,18	383,00	5747,52	5747,33	14758,42	14804,07	370,29
4	VA1_4	171,68	07.10.2014	11,2%	484,85	373,00	5900,80	5900,55	16814,22	16880,91	340,26
5	VA1_5	126,18	07.10.2014	11,0%	447,72	360,00	6114,17	6113,83	16651,30	16735,35	423,09
6	VA1_6	139,10	07.10.2014	11,6%	427,00	399,00	5516,79	5516,68	12971,86	12995,23	332,79
7	VA1_7	118,24	07.10.2014	11,3%	432,71	376,00	5323,14	5322,93	12216,37	12260,30	288,39
8	VA1_8	133,57	07.10.2014	11,2%	445,67	384,00	5731,77	5731,52	14582,19	14640,34	404,67
9	VA1_9	166,68	07.10.2014	11,0%	476,82	355,00	6201,13	6200,79	18240,85	18333,58	606,54
10	VA1_10	133,89	07.10.2014	11,6%	570,68	372,00	5916,67	5916,55	19939,26	19976,93	498,36



lfd. Nr.	Probekörper- bezeichnung	$f_{t,0}$ Versuch Duo	$f_{t,0,2}$ Versuch Duo, mittel	$f_{t,0,1}$ Versuch Einzel, mittel	$f_{t,0,g,k}$ lt. EN 1194:1999	$k_{sys,l,t,0}$	$k_{size,l,t,0}$	$f_{t,0,g,k}$ laut [22]	Lamellenbezeichnung
[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
1	VA1_1	25,37	31,95	25,55	25,44	1,09	1,04	28,94	1_220 + 2_220
2	VA1_2	23,76							3_220 + 4_220
3	VA1_3	30,67							5_220 + 6_220
4	VA1_4	28,17							7_220 + 8_220
5	VA1_5	35,02							9_220 + 10_220
6	VA1_6	27,58							11_220 + 12_220
7	VA1_7	23,92							13_220 + 14_220
8	VA1_8	33,51							15_220 + 16_220
9	VA1_9	50,26							17_220 + 18_220
10	VA1_10	41,25							19_220 + 20_220

### B-3 Ergebnisse; Prüfreihe „A“

lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	Länge l	Breite 1	Breite 2	Breite 3	Höhe/Dicke h1	Höhe/Dicke h2	Höhe/Dicke h3	Masse m	Rohdichte ρ	MW Breite b	MW Höhe h	Datum Eingang	Masse Eingang
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m³]	[mm]	[mm]	[-]	[g]
1	A_01	1800,8	200,25	200,15	199,96	60,38	60,39	60,29	9614	442,03	200,12	60,35	03.10.2014	183,77
2	A_02	1800,5	200,35	200,13	200,23	60,30	60,36	60,16	8650	398,07	200,24	60,27	03.10.2014	154,35
3	A_03	1800,5	200,27	200,19	200,25	60,38	60,43	60,09	8676	399,09	200,24	60,30	03.10.2014	154,40
4	A_04	1800,5	200,04	200,13	200,29	60,32	60,38	60,08	10150	467,39	200,15	60,26	03.10.2014	168,16
5	A_05	1800,5	200,33	200,18	200,02	60,32	60,38	59,98	9622	443,27	200,18	60,23	03.10.2014	128,46
6	A_06	1800,5	199,9	200,18	200,28	60,34	60,37	60,04	8510	392,00	200,12	60,25	03.10.2014	143,05
7	A_07	1800,5	200,15	200,19	200,22	60,23	60,33	60,06	9122	420,36	200,19	60,21	03.10.2014	154,45
8	A_08	1800,5	200,14	200,08	200,23	60,35	60,36	60,06	9502	437,58	200,15	60,26	03.10.2014	141,44
9	A_09	1801,0	200,42	200,13	200,00	60,36	60,38	59,89	10412	479,65	200,18	60,21	03.10.2014	171,18
10	A_09g	1801,0	200,42	200,13	200,00	60,36	60,38	59,89	10412	479,65	200,18	60,21	03.10.2014	171,18
11	A_10	1800,5	199,90	200,09	200,21	60,34	60,40	60,26	8402	386,60	200,07	60,33	03.10.2014	120,84
12	A_11	1800,5	200,13	200,56	200,57	60,38	60,34	59,99	9900	455,45	200,42	60,24	03.10.2014	140,78
13	A_12	1800,5	199,95	200,01	200,23	60,33	60,42	60,2	8408	386,99	200,06	60,32	03.10.2014	105,57
14	A_13	1800,8	200,30	200,12	200,27	60,30	60,23	60,06	8216	378,52	200,23	60,20	03.10.2014	122,74
15	A_14	1792,5	200,75	200,09	200,28	60,29	60,26	60,22	8870	409,84	200,37	60,26	03.10.2014	120,59
16	A_15	1800,5	199,85	200,16	200,25	60,37	60,35	60,15	8876	408,66	200,09	60,29	03.10.2014	121,19
17	A_16	1800,8	200,09	200,17	200,25	60,31	60,32	60,17	8562	394,12	200,17	60,27	03.10.2014	106,00
18	A_17	1800,7	200,00	200,36	200,26	60,43	60,36	60,25	9754	448,34	200,21	60,35	03.10.2014	156,93
19	A_18	1800,7	200,81	200,05	200,32	60,38	60,39	59,98	8698	400,07	200,39	60,25	03.10.2014	105,91
20	A_19	1800,5	200,00	200,12	200,41	60,43	60,39	60,12	9418	433,25	200,18	60,31	03.10.2014	151,19
21	A_19n	1800,5	200,00	200,12	200,41	60,43	60,39	60,12	9418	433,25	200,18	60,31	03.10.2014	151,19
22	A_20	1800,5	199,88	200,03	200,22	60,17	60,32	60,12	9048	417,27	200,04	60,20	03.10.2014	147,33

lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	Masse Ausgang	Datum Ausgang	Holzfeuchte u	Rohdichte $\rho_{12}$	Ultraschalllaufzeit t	Ultraschallgeschw. v	Ultraschallgeschw. $v_{12}$	dyn. E-Modul $E_{dyn}$	dyn. E-Modul $E_{dyn,12}$	$d_{Schraube}$	$l_{Schraube}$	m	r	N
[-]	[-]	[g]	[-]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]	[Stk]	[Stk]	[Stk]
1	A_01	165,17	07.10.2014	11,3	443,66	317,00	5680,76	5680,53	14264,59	14316,17	8	240	1	8	8
2	A_02	139,13	07.10.2014	10,9	400,18	302,00	5961,92	5961,59	14149,03	14222,46	8	240	1	8	8
3	A_03	138,77	07.10.2014	11,3	400,56	309,00	5826,86	5826,63	13549,86	13598,71	8	200	1	8	8
4	A_04	151,18	07.10.2014	11,2	469,19	289,00	6230,10	6229,85	18141,43	18209,64	8	200	1	7	7
5	A_05	115,67	07.10.2014	11,1	445,36	303,00	5942,24	5941,95	15652,04	15724,24	8	200	1	8	8
6	A_06	128,65	07.10.2014	11,2	393,58	310,00	5808,06	5807,82	13223,66	13275,87	8	200	1	8	8
7	A_07	138,99	07.10.2014	11,1	422,20	330,00	5456,06	5455,81	12513,41	12567,10	8	200	1	8	8
8	A_08	126,87	07.10.2014	11,5	438,71	316,00	5697,78	5697,63	14206,05	14241,91	8	200	1	8	8
9	A_09	153,90	07.10.2014	11,2	481,50	294,00	6125,85	6125,60	17999,34	18067,34	8	200	1	8	8
10	A_09g	153,90	07.10.2014	11,2	481,50	294,00	6125,85	6125,60	17999,34	18067,34	8	200	1	8	8
11	A_10	109,01	07.10.2014	10,9	388,81	340,00	5295,59	5295,27	10841,41	10902,31	8	180	1	8	8
12	A_11	126,67	07.10.2014	11,1	457,41	294,00	6124,15	6123,87	17081,72	17153,68	8	180	1	8	8
13	A_12	94,92	07.10.2014	11,2	388,49	309,00	5826,86	5826,62	13139,05	13189,21	8	180	1	8	8
14	A_13	110,32	07.10.2014	11,3	379,93	314,00	5735,03	5734,81	12449,88	12495,07	8	180	1	8	8
15	A_14	108,58	07.10.2014	11,1	411,77	316,00	5672,47	5672,19	13187,53	13248,13	8	180	1	8	8
16	A_15	108,77	07.10.2014	11,4	409,85	306,00	5883,99	5883,81	14148,30	14188,55	8	180	1	8	8
17	A_16	95,62	07.10.2014	10,9	396,38	309,00	5827,83	5827,48	13385,90	13460,87	8	180	1	8	8
18	A_17	141,48	07.10.2014	10,9	450,76	302,00	5962,58	5962,24	15939,64	16023,85	8	180	1	8	8
19	A_18	95,27	07.10.2014	11,2	401,74	327,00	5506,73	5506,49	12131,79	12181,17	8	180	1	8	8
20	A_19	136,69	07.10.2014	10,6	436,27	301,00	5981,73	5981,29	15502,15	15607,75	8	180	1	8	8
21	A_19n	136,69	07.10.2014	10,6	436,27	301,00	5981,73	5981,29	15502,15	15607,75	8	180	1	8	8
22	A_20	132,59	07.10.2014	11,1	419,11	325,00	5540,00	5539,74	12806,62	12861,95	8	180	1	8	8

lfd. Nr.	Probekörper- bezeichnung	Vorböhrten	Eindreh- moment	Querzug- sicherung	Kraft $F_{max}$	Kraft pro VM $F_{max} / (n*2)$	$\sigma_{Bruch}$	Versagensart	Lamellenbezeichnung
[-]	[-]	Ja/Nein	[Nm]	[Stk]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
1	A_01	Nein	16,0	0	333,54	20,85	27,62	QZ	39_180 + 40_180
2	A_02	Nein	16,0	0	334,20	20,89	27,69	QZ	37_180 + 38_180
3	A_03	Nein	16,0	0	286,71	17,92	23,75	QZ	19_180 + 20_180
4	A_04	Nein	16,0	0	302,70	21,62	25,10	QZ	17_180 + 18_180
5	A_05	Ja	16,0	2	320,67	20,04	26,60	1*SB / HB entl. FLA	15_180 + 16_180
6	A_06	Ja	16,0	4	262,71	16,42	21,79	HB bei AA	13_180 + 14_180
7	A_07	Ja	16,0	4	288,36	18,02	23,93	NQV bei AA	11_180 + 12_180
8	A_08	Ja	16,0	4	340,08	21,26	28,20	1*SB (ES) / 8*SB (FI)	5_180 + 6_180
9	A_09	Ja	16,0	4	328,71	20,54	27,27	8*SB (ES)	7_180 + 8_180
10	A_09g	Ja	16,0	4	334,77	20,92	27,77	8*SB (FI) / 8*SB (ES)	7_180 + 8_180
11	A_10	Ja	16,0	4	256,20	16,01	21,22	HB entl. LSF	3_180 + 4_180
12	A_11	Ja	16,0	4	354,99	22,19	29,40	QZ	9_180 + 10_180
13	A_12	Ja	16,0	6	308,34	19,27	25,55	SPRHB	1_180 + 2_180
14	A_13	Ja	16,0	6	318,69	19,92	26,44	NQV	21_180 + 22_180
15	A_14	Ja	16,0	8	295,32	18,46	24,46	NQV / SPRHB	23_180 + 24_180
16	A_15	Ja	16,0	8	331,53	20,72	27,48	NQV	25_180 + 26_180
17	A_16	Ja	16,0	8	310,11	19,38	25,71	NQV	27_180 + 28_180
18	A_17	Ja	16,0	8	368,88	23,06	30,53	MB	29_180 + 30_180
19	A_18	Ja	16,0	8	312,99	19,56	25,92	NQV	31_180 + 32_180
20	A_19	Ja	16,0	8	365,76	22,86	30,29	16*SB (ES)	33_180 + 34_180
21	A_19n	Ja	16,0	8	369,63	23,10	30,62	MB / NQV	33_180 + 34_180
22	A_20	Ja	16,0	8	197,28	12,33	16,38	MB / KA / SPRHB	35_180 + 36_180

## B-4 Ergebnisse; Prüfreihe „VB“

lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	Länge	Breite 1	Breite 2	Breite 3	Höhe 1	Höhe 2	Höhe 3	Masse m	Rohdichte $\rho$	MW Breite	MW Höhe	Datum Eingang	Masse Eingang
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm]	[mm]	[-]	[g]
1	VB-01	2203,0	200,51	200,67	200,37	40,11	40,15	40,15	6632	374	200,52	40,14	07.11.2014	83,52
2	VB-02	2202,4	200,52	200,65	200,65	39,67	40,13	40,16	7072	400	200,61	39,99	07.11.2014	81,97
3	VB-03	2202,9	200,58	200,55	200,40	40,07	40,10	40,10	8030	453	200,51	40,09	07.11.2014	107,32
4	VB-04	2202,5	200,46	200,68	200,62	40,16	40,08	40,12	7044	397	200,59	40,12	07.11.2014	87,08
5	VB-05	2202,9	200,53	200,56	200,42	39,99	40,15	40,02	7448	421	200,50	40,05	07.11.2014	93,02
6	VB-06	2202,8	200,51	200,32	200,31	39,92	40,07	40,03	7576	429	200,38	40,01	07.11.2014	97,84
7	VB-07	2203,0	200,59	200,67	200,26	39,99	40,12	40,12	7840	443	200,51	40,08	07.11.2014	82,51
8	VB-08	2202,9	200,53	200,60	200,27	39,70	40,01	40,05	7126	404	200,47	39,92	07.11.2014	90,60
9	VB-09	2202,5	200,47	200,56	200,45	39,96	40,13	40,07	7220	408	200,49	40,05	07.11.2014	91,88
10	VB-10	2202,9	200,49	200,57	200,38	39,48	40,08	40,09	6604	375	200,48	39,88	07.11.2014	82,01
11	VB-11	2203,0	200,58	200,55	200,26	40,04	40,13	40,15	7076	400	200,46	40,11	07.11.2014	92,26
12	VB-12	2203,0	200,56	200,71	200,35	40,08	40,07	40,07	6792	384	200,54	40,07	07.11.2014	86,97
13	VB-13	2202,9	200,41	200,55	200,17	40,02	40,12	39,90	7136	404	200,38	40,01	07.11.2014	88,69
14	VB-14	2202,1	200,34	200,78	200,37	40,02	40,11	40,13	6500	367	200,50	40,09	07.11.2014	80,63
15	VB-15	2202,5	200,48	200,75	200,70	40,22	40,14	40,14	6638	374	200,64	40,17	07.11.2014	89,30
16	VB-16	2202,6	200,46	200,47	200,30	40,12	40,13	40,17	6902	390	200,41	40,14	07.11.2014	85,56
17	VB-17	2202,5	200,47	200,52	200,45	40,07	40,02	40,12	7010	396	200,48	40,07	07.11.2014	86,18
18	VB-18	2202,9	200,48	200,27	200,56	39,92	40,06	40,11	7676	434	200,44	40,03	07.11.2014	102,44
19	VB-19	2202,8	200,00	200,34	200,35	40,10	40,14	40,17	7890	446	200,23	40,14	07.11.2014	92,28
20	VB-20	2202,5	200,28	200,26	200,45	40,18	40,03	40,08	7476	423	200,33	40,10	07.11.2014	87,05
21	VB-21	2202,5	200,33	200,62	200,54	40,11	40,08	40,05	6874	388	200,50	40,08	07.11.2014	88,44
22	VB-22	2202,5	200,58	200,58	200,51	40,13	40,09	40,10	7108	401	200,56	40,11	07.11.2014	86,47
23	VB-23	2203,0	200,44	200,66	200,41	40,13	40,09	39,97	7600	429	200,50	40,06	07.11.2014	80,23
24	VB-24	2202,5	200,69	200,73	200,51	40,06	40,05	40,10	8694	491	200,64	40,07	07.11.2014	114,97

lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	Länge	Breite 1	Breite 2	Breite 3	Höhe 1	Höhe 2	Höhe 3	Masse m	Rohdichte $\rho$	MW Breite	MW Höhe	Datum Eingang	Masse Eingang
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm]	[mm]	[-]	[g]
25	VB-25	2202,4	200,44	200,53	200,57	40,13	40,09	40,08	8548	483	200,51	40,10	07.11.2014	120,50
26	VB-26	2202,5	200,66	200,72	200,67	39,93	40,18	40,06	8158	461	200,68	40,06	07.11.2014	108,66
27	VB-27	2202,5	200,54	200,55	200,48	40,11	40,04	40,01	8352	472	200,52	40,05	07.11.2014	103,02
28	VB-28	2203,0	200,36	200,63	200,54	40,18	40,15	40,08	7506	423	200,51	40,14	07.11.2014	81,79
29	VB-29	2202,2	200,54	200,69	200,51	40,07	40,18	40,17	7214	407	200,58	40,14	07.11.2014	93,04
30	VB-30	2202,5	200,56	200,60	200,61	40,01	39,96	39,99	7952	450	200,59	39,99	07.11.2014	70,42



lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	Masse Ausgang	Datum Ausgang	Holzfeuchte u	Rohdichte $\rho_{12}$	Ultraschalllaufzeit t	Ultraschallgeschw. v	Ultraschallgeschw. $v_{12}$
[-]	[-]	[g]	[-]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]
1	VB-01	77,05	13.11.2014	8,40%	380,80	402	5480,10	5479,05
2	VB-02	75,7	13.11.2014	8,28%	407,74	388	5676,29	5675,17
3	VB-03	98,71	13.11.2014	8,72%	460,90	350	6294,00	6292,91
4	VB-04	80,32	13.11.2014	8,42%	404,53	367	6001,36	6000,22
5	VB-05	85,88	13.11.2014	8,31%	428,76	400	5507,25	5506,17
6	VB-06	90,15	13.11.2014	8,53%	436,46	422	5219,91	5218,95
7	VB-07	76,14	13.11.2014	8,37%	450,92	403	5466,50	5465,45
8	VB-08	83,78	13.11.2014	8,14%	412,02	390	5648,46	5647,31
9	VB-09	84,84	13.11.2014	8,30%	415,77	393	5604,33	5603,23
10	VB-10	75,83	13.11.2014	8,15%	382,15	404	5452,72	5451,61
11	VB-11	85,07	13.11.2014	8,45%	406,59	389	5663,24	5662,17
12	VB-12	80,34	13.11.2014	8,25%	390,83	418	5270,33	5269,29
13	VB-13	81,87	13.11.2014	8,33%	411,44	431	5111,14	5110,14
14	VB-14	74,49	13.11.2014	8,24%	374,16	389	5660,93	5659,80
15	VB-15	82,26	13.11.2014	8,56%	380,40	404	5451,73	5450,74
16	VB-16	78,67	13.11.2014	8,76%	395,85	375	5873,60	5872,59
17	VB-17	79,53	13.11.2014	8,36%	403,41	371	5936,66	5935,51
18	VB-18	94,62	13.11.2014	8,26%	442,40	426	5171,13	5170,10
19	VB-19	85,27	13.11.2014	8,22%	454,11	425	5183,06	5182,02
20	VB-20	80,24	13.11.2014	8,49%	429,99	412	5345,87	5344,88
21	VB-21	81,85	13.11.2014	8,05%	396,05	403	5465,26	5464,12
22	VB-22	79,76	13.11.2014	8,41%	408,41	386	5705,96	5704,87
23	VB-23	74,01	13.11.2014	8,40%	437,19	394	5591,37	5590,31
24	VB-24	105,5	13.11.2014	8,98%	498,40	366	6017,76	6016,80
25	VB-25	110,44	13.11.2014	9,11%	489,68	361	6100,83	6099,90
26	VB-26	100,36	13.11.2014	8,27%	469,36	402	5478,86	5477,77

lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	Masse Ausgang	Datum Ausgang	Holzfeuchte u	Rohdichte ρ12	Ultraschalllaufzeit t	Ultraschallgeschw. v	Ultraschallgeschw. v12
[-]	[-]	[g]	[-]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]
27	VB-27	94,74	13.11.2014	8,74%	479,84	363	6067,49	6066,44
28	VB-28	75,55	13.11.2014	8,26%	431,28	393	5605,60	5604,49
29	VB-29	85,89	13.11.2014	8,32%	414,35	412	5345,15	5344,10
30	VB-30	64,95	13.11.2014	8,42%	458,18	361	6101,11	6099,95

lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	dyn. E-Modul $E_{dyn}$	dyn. E-Modul $E_{dyn,12}$	Bruchursache	Kraft F	Zugfestigkeit $f_{t,0}$	Lamellenbezeichnung
[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
1	VB-01	11233,50	11431,50	AA, SPRB, GSF	176,28	21,90	1_220
2	VB-02	12897,76	13132,31	KA, A, SPRB, LR	209,67	26,14	2_220
3	VB-03	17963,96	18252,00	A, LR, LSF	300,93	37,44	3_220
4	VB-04	14313,31	14564,25	A, LR, LSF	265,38	32,98	4_220
5	VB-05	12768,92	12999,18	A, KA, GSF, LSF, SPRB	187,92	23,40	5_220
6	VB-06	11689,70	11888,13	AA; LSF, BU	108,93	13,59	6_220
7	VB-07	13234,27	13469,54	AA, LSF	139,56	17,37	7_220
8	VB-08	12896,70	13140,21	AA, LSF	155,07	19,38	8_220
9	VB-09	12821,22	13053,42	AA, KA, LSF	165,90	20,66	9_220
10	VB-10	11147,48	11357,44	AA, KA, LSF	116,94	14,63	10_220
11	VB-11	12813,02	13035,43	FLA, A, SPRB, LSF	208,11	25,88	11_220
12	VB-12	10656,22	10851,58	KA, BU, LSF, MR, SPRB	116,82	14,54	12_220
13	VB-13	10554,63	10744,12	FLA, BU, LSF, A	80,76	10,07	13_220
14	VB-14	11769,12	11985,45	SPRB, LR, LSF, GSF	152,94	19,03	14_220
15	VB-15	11114,76	11301,90	FLA, AA	110,94	13,77	15_220
16	VB-16	13438,52	13651,66	FLA, LR	260,61	32,40	16_220
17	VB-17	13963,55	14212,09	FLA, LR	200,79	24,99	17_220
18	VB-18	11613,09	11825,30	AA, GSF, LSF	107,22	13,36	18_220
19	VB-19	11973,02	12194,37	WB, BU, A, LSF	72,36	9,00	19_220
20	VB-20	12076,37	12283,92	AA, KA, GSF	126,75	15,78	20_220
21	VB-21	11600,60	11824,69	KA, A	111,81	13,91	21_220
22	VB-22	13062,76	13292,01	KA, A, SPRB, GSF	210,75	26,20	22_220
23	VB-23	13426,63	13662,81	A, LSF, GSF, KA	148,44	18,48	23_220
24	VB-24	17779,90	18042,92	FLAmRE, SPRB, A	359,82	44,75	24_220
25	VB-25	17966,30	18220,42	LA, AmRE, SPRB	216,45	26,92	25_220
26	VB-26	13831,25	14083,62	KA, LSF	211,59	26,32	26_220

lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	dyn. E-Modul $E_{dyn}$	dyn. E-Modul $E_{dyn,12}$	Bruchursache	Kraft F	Zugfestigkeit $f_{t,0}$	Lamellenbezeichnung
[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
27	VB-27	17381,59	17658,83	FLA, LSF, SPRB	269,88	33,60	27_220
28	VB-28	13303,34	13546,78	FLA, LSF, GSF	157,83	19,61	28_220
29	VB-29	11624,48	11833,49	SPRB, LSF, A	113,10	14,05	29_220
30	VB-30	16755,35	17048,64	SPRB, LSF	306,78	38,25	30_220

## B-5 Ergebnisse; Prüfreihe „VB1“

lfd. Nr.	Probekörper- bezeichnung	Länge	Breite 1	Breite 2	Breite 3	Höhe/ Dicke 1	Höhe/ Dicke 2	Höhe/ Dicke 3	Masse m	Rohdichte $\rho$	MW Breite	MW Höhe
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm]	[mm]
1	VB1-01	2201,1	199,88	200,32	200,37	80,02	80,36	80,27	17076	483	200,19	80,22
2	VB1-02	2201,5	199,90	200,62	200,35	80,35	80,27	80,16	15320	433	200,29	80,26
3	VB1-03	2201,0	200,11	200,28	199,92	80,25	80,32	80,5	16330	461	200,10	80,36
4	VB1-04	2201,5	200,71	200,21	200,73	80,33	80,01	80,55	14410	406	200,55	80,30
5	VB1-05	2201,1	200,35	200,30	200,10	80,35	80,31	80,48	16770	473	200,25	80,38
6	VB1-06	2201,0	200,23	200,20	199,61	79,88	80,18	80,48	14782	419	200,01	80,18
7	VB1-07	2201,5	200,14	199,76	199,70	80,27	80,17	80,41	15212	431	199,87	80,28
8	VB1-08	2201,5	200,06	199,84	200,06	80,38	80,31	80,46	14402	407	199,99	80,38
9	VB1-09	2201,5	200,00	200,33	200,34	80,2	80,11	79,85	13334	378	200,22	80,05
10	VB1-10	2201,2	200,15	200,28	199,73	79,96	80,11	80,41	15202	431	200,05	80,16
11	VB1-11	2201,5	200,43	200,19	200,08	80,35	80,33	80,28	12440	351	200,23	80,32
12	VB1-12	2201,2	200,15	200,26	199,11	79,88	80,24	80,31	14572	413	199,84	80,14
13	VB1-13	2201,5	200,02	200,19	199,71	80,35	80,12	80,39	12638	358	199,97	80,29
14	VB1-14	2201,5	200,17	200,21	200,03	80,45	80,21	80,55	14392	406	200,14	80,40
15	VB1-15	2201,1	200,21	200,31	200,01	80,19	80,24	80,43	13982	395	200,18	80,29
16	VB1-16	2201,0	199,67	200,41	200,09	80,29	79,92	80,24	15552	441	200,06	80,15
17	VB1-17	2201,1	199,69	200,10	200,18	80,22	80,16	79,96	15882	450	199,99	80,11
18	VB1-18	2201,5	199,86	200,32	200,23	80,2	80,15	79,82	14448	410	200,14	80,06
19	VB1-19	2201,5	199,97	200,18	200,23	79,97	79,88	79,98	14448	410	200,13	79,94
20	VB1-20	2202,3	199,69	200,07	200,14	80,14	79,92	79,88	15726	446	199,97	79,98

lfd. Nr.	Probekörper- bezeichnung	Datum Eingang	Masse Eingang	Masse Ausgang	Datum Ausgang	Holzfeuchte u	Rohdichte $\rho_{12}$	Ultraschalllaufzeit t	Ultraschallgeschw. v	Ultraschallgeschw. $v_{12}$
[-]	[-]	[-]	[g]	[g]	[-]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]
1	VB1-01	10.11.2014	224,94	206,83	13.11.2014	8,76%	490,94	365,00	6030,41	6029,37
2	VB1-02	10.11.2014	215,43	199,87	13.11.2014	7,79%	442,02	383,00	5748,04	5746,76
3	VB1-03	10.11.2014	207,55	190,92	13.11.2014	8,71%	469,00	370,00	5948,65	5947,61
4	VB1-04	10.11.2014	221,46	203,96	13.11.2014	8,58%	413,42	402,00	5476,37	5475,38
5	VB1-05	10.11.2014	219,48	202,03	13.11.2014	8,64%	481,30	356,00	6182,87	6181,76
6	VB1-06	10.11.2014	214,62	198,23	13.11.2014	8,27%	426,60	390,00	5643,59	5642,47
7	VB1-07	10.11.2014	233,4	215,94	13.11.2014	8,09%	439,06	401,00	5490,02	5488,89
8	VB1-08	10.11.2014	184,95	170,31	13.11.2014	8,60%	413,87	398,00	5531,41	5530,41
9	VB1-09	10.11.2014	183,31	169,4	13.11.2014	8,21%	385,03	392,00	5616,07	5614,94
10	VB1-10	10.11.2014	236,47	218,47	13.11.2014	8,24%	438,76	378,00	5823,28	5822,12
11	VB1-11	10.11.2014	194,63	180,59	13.11.2014	7,77%	358,77	404,00	5449,26	5448,04
12	VB1-12	10.11.2014	192,75	178,19	13.11.2014	8,17%	421,26	378,00	5823,28	5822,10
13	VB1-13	10.11.2014	176,41	163,08	13.11.2014	8,17%	364,40	409,00	5382,64	5381,55
14	VB1-14	10.11.2014	185,6	171,37	13.11.2014	8,30%	413,77	396,00	5559,34	5558,25
15	VB1-15	10.11.2014	189,14	174,51	13.11.2014	8,38%	402,40	421,00	5228,27	5227,26
16	VB1-16	10.11.2014	197,29	182,18	13.11.2014	8,29%	448,83	396,00	5558,08	5556,99
17	VB1-17	10.11.2014	246,65	227,96	13.11.2014	8,20%	458,91	397,00	5544,33	5543,22
18	VB1-18	10.11.2014	192,25	177,94	13.11.2014	8,04%	417,71	408,00	5395,83	5394,70
19	VB1-19	10.11.2014	191,64	177,35	13.11.2014	8,06%	418,29	420,00	5241,67	5240,57
20	VB1-20	10.11.2014	228,79	210,89	13.11.2014	8,49%	454,32	411,00	5358,39	5357,40

lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	dyn. E-Modul $E_{dyn}$	dyn. E-Modul $E_{dyn,12}$	Bruchursache	Kraft F	$f_{L,0}$ Versuch Duo	$f_{L,0,g}$ Versuch Duo, mittel	$f_{L,0,1}$ Versuch Einzel, mittel
[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
1	VB1-01	17568,44	17847,26	32: A, LR, SPRB ... bei Klemmbacke 31: SPRB, LSF, BU	637,87	39,72	23,41	22,28
2	VB1-02	14302,81	14597,72	34: KA,A,LSF 33: A, SPRB, LSF	390,90	24,32		
3	VB1-03	16327,76	16590,53	36: A, SPRB, LR 35: SPRB, FLA, LR	603,33	37,52		
4	VB1-04	12190,19	12394,14	38: A, KA, GSF 37: FLA, LR	334,20	20,75		
5	VB1-05	18094,74	18392,42	40: LAF, A 39: WB ... bei Klemmbacke	629,52	39,11		
6	VB1-06	13338,26	13581,76	42: SPRB; BU 41: GSF, AA, KA, LSF	274,77	17,13		
7	VB1-07	12979,28	13227,82	44: SPRB, A, LR 43: FLA ,A	315,15	19,64		
8	VB1-08	12451,12	12658,46	46: A, SPRB, KA 45: FLA, SPRB	339,12	21,10		
9	VB1-09	11918,26	12139,16	48: A, SPRB 47: MR, SPRB	394,23	24,60		
10	VB1-10	14604,04	14872,73	50: AA, GSF 49: KA, A, LSF	467,07	29,13		
11	VB1-11	10433,17	10648,83	52: A, KA 51: 2* FLA	212,04	13,18		
12	VB1-12	14016,68	14279,23	54: 2*KA, LSF 53: AA, KA, SPRB	405,48	25,32		
13	VB1-13	10359,41	10553,31	56: AA, SPRB 55: A, SPRB	277,08	17,26		
14	VB1-14	12555,93	12782,97	58: 2*FLA 57: SPRB	393,93	24,48		
15	VB1-15	10804,09	10995,24	60: A, BU, SPRB, GSF 59: AA, KA	250,11	15,56		
16	VB1-16	13613,17	13859,98	62: A, LSF, GSF 61: KA, LSF, AA	360,21	22,46		
17	VB1-17	13843,66	14101,09	64: AA, SPRB, LSF 63: FLA, FLAmRE	350,61	21,88		



lfd. Nr.	Probekörper- bezeichnung	dyn. E-Modul $E_{dyn}$	dyn. E-Modul $E_{dyn,12}$	Bruchursache	Kraft F	$f_{t,0}$ Versuch Duo	$f_{t,0,g}$ Versuch Duo, mittel	$f_{t,0,1}$ Versuch Einzel, mittel
[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
18	VB1-18	11925,65	12156,55	66: A, Riss bei Klemmbacke 65: AA, LSF, GSF	288,90	18,03	23,41	22,28
19	VB1-19	11270,43	11487,80	68: A, LSF, GSF 67: FLA	254,22	15,89		
20	VB1-20	12819,53	13039,80	70: AA, LSF, GSF 69: A, Riss bei Klemmbacke	338,64	21,17		

lfd. Nr.	Probekörper- bezeichnung	$f_{t,0,g,k}$ laut EN 1194:1999	$k_{sys,L,t,0}$	$k_{size,L,t,0}$	$f_{t,0,g,k}$ laut [22]	Lamellenbez.
[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
1	VB1-01	22,82	1,09	1,04	25,24	31_220+32_220
2	VB1-02					33_220+34_220
3	VB1-03					35_220+36_220
4	VB1-04					37_220+38_220
5	VB1-05					39_220+40_220
6	VB1-06					41_220+42_220
7	VB1-07					43_220+44_220
8	VB1-08					45_220+46_220
9	VB1-09					47_220+48_220
10	VB1-10					49_220+50_220
11	VB1-11					51_220+52_220
12	VB1-12					53_220+54_220
13	VB1-13					55_220+56_220
14	VB1-14					57_220+58_220
15	VB1-15					59_220+60_220
16	VB1-16					61_220+62_220
17	VB1-17					63_220+64_220
18	VB1-18					65_220+66_220
19	VB1-19					67_220+68_220
20	VB1-20					69_220+70_220

## B-6 Ergebnisse; Prüfreihe „B1“

lfd. Nr.	Probekörper- bezeichnung	Länge l	Breite 1	Breite 2	Breite 3	Höhe/ Dicke h1	Höhe/ Dicke h2	Höhe/ Dicke h3	Masse m	Rohdichte ρ	MW Breite b
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm]
1	B1-01	999,0	201,03	200,78	199,54	120,59	120,51	120,81	9738	403,11	200,45
2	B1-02	998,6	200,64	200,65	200,43	120,73	120,39	120,44	10222	423,46	200,57
3	B1-03	998,9	200,71	200,44	199,21	120,60	120,40	120,75	9176	380,67	200,12
4	B1-04	999,1	200,69	200,73	200,04	120,78	120,21	120,77	9234	382,29	200,49
5	B1-05	999,0	200,92	200,61	200,26	120,41	120,31	120,63	10814	448,01	200,60
6	B1-06	998,6	200,83	200,83	200,49	120,39	120,41	120,62	9354	387,37	200,72
7	B1-07	999,0	200,71	200,53	199,78	120,53	120,46	120,61	9536	395,30	200,34
8	B1-08	999,0	200,49	200,44	200,16	120,52	120,39	120,70	9936	411,82	200,36
9	B1-09	999,2	200,77	200,71	200,50	120,53	120,15	120,84	9134	378,04	200,66
10	B1-10	998,8	200,62	200,67	200,45	120,65	120,14	120,79	9526	394,51	200,58
11	B1-11	999,1	200,99	200,79	201,31	120,30	120,43	120,73	9440	390,09	201,03
12	B1-12	999,1	200,74	200,59	200,68	120,00	120,32	120,49	10350	429,23	200,67
13	B1-13	998,9	200,54	200,42	200,64	120,54	120,29	120,62	9224	382,19	200,53
14	B1-14	999,0	200,49	200,57	200,69	120,04	120,41	120,63	9082	376,56	200,58
15	B1-15	999,1	200,83	200,89	200,90	120,05	120,02	120,61	10656	441,63	200,87
16	B1-16	999,0	200,63	200,50	200,82	120,37	120,31	120,33	9374	388,62	200,65
17	B1-17	999,1	200,72	200,52	200,67	120,49	120,61	120,70	9422	389,74	200,64
18	B1-18	999,0	200,82	200,71	200,56	120,52	120,33	120,53	10018	414,79	200,70
19	B1-19	998,5	200,75	200,77	200,59	120,55	120,36	120,46	9242	382,85	200,70
20	B1-20	999,0	200,85	200,44	200,51	120,51	120,23	120,65	9522	394,44	200,60

lfd. Nr.	Probekörper- bezeichnung	MW Höhe h	Holzfeuchte u	Rohdichte $\rho_{12}$	Ultraschalllaufzeit t	Ultraschall- geschw. v	Ultraschall- geschw. $v_{12}$	dyn. E-Modul $E_{dyn}$	dyn. E-Modul $E_{dyn,12}$	$d_{Schraube}$	$l_{Schraube}$
[-]	[-]	[mm]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]
1	B1-01	120,64	8,35	410,46	181	5519,34	5518,27	12279,84	12499,11	8	220
2	B1-02	120,52	8,35	431,19	188	5311,70	5310,67	11947,57	12160,90	8	220
3	B1-03	120,58	8,35	387,62	195	5122,56	5121,57	9989,15	10167,52	8	220
4	B1-04	120,59	8,35	389,27	190	5258,42	5257,40	10570,78	10759,53	8	220
5	B1-05	120,45	8,35	456,19	174	5741,38	5740,27	14768,04	15031,74	8	220
6	B1-06	120,47	8,35	394,44	182	5486,81	5485,75	11661,97	11870,20	8	220
7	B1-07	120,53	8,35	402,51	190	5257,89	5256,88	10928,23	11123,36	8	220
8	B1-08	120,54	8,35	419,34	170	5876,47	5875,33	14221,38	14475,32	8	220
9	B1-09	120,51	8,35	384,94	184	5430,43	5429,38	11148,23	11347,29	8	220
10	B1-10	120,53	8,35	401,71	177	5642,94	5641,85	12562,38	12786,69	8	180
11	B1-11	120,49	8,35	397,21	181	5519,89	5518,82	11885,68	12097,91	8	180
12	B1-12	120,27	8,35	437,07	176	5676,70	5675,61	13831,98	14078,96	8	180
13	B1-13	120,48	8,35	389,17	191	5229,84	5228,83	10453,48	10640,14	8	220
14	B1-14	120,36	8,35	383,44	181	5519,34	5518,27	11471,30	11676,14	8	220
15	B1-15	120,23	8,35	449,69	179	5581,56	5580,48	13758,59	14004,27	8	180
16	B1-16	120,34	8,35	395,71	181	5519,34	5518,27	11838,49	12049,88	8	180
17	B1-17	120,60	8,35	396,85	185	5400,54	5399,50	11367,13	11570,11	8	220
18	B1-18	120,46	8,35	422,36	179	5581,01	5579,93	12919,85	13150,55	8	220
19	B1-19	120,46	8,35	389,84	183	5456,28	5455,23	11397,94	11601,46	8	180
20	B1-20	120,46	8,35	401,63	171	5842,11	5840,98	13462,19	13702,57	8	180

lfd. Nr.	Probekörper- bezeichnung	m	r	N	Vorborehren	Eindreh- moment	Querzug- sicherung	Kraft $F_{\max}$	Kraft pro VM $F_{\max} / (N \cdot 2)$	$\sigma_{\text{Bruch}}$
[-]	[-]	[Stk]	[Stk]	[Stk]	Ja/Nein	[Nm]	[Stk]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
1	B1-01	3	9	19	Nein	16	4	473,04	12,44	19,56
2	B1-02	3	9	19	Nein	16	4	560,55	14,75	23,18
3	B1-03	3	9	19	Nein	16	4	385,65	10,14	15,98
4	B1-04	3	9	19	Nein	16	4	338,61	8,91	14,01
5	B1-05	3	9	19	Nein	16	4	481,32	12,66	19,92
6	B1-06	3	9	19	Nein	16	4	424,29	11,16	17,54
7	B1-07	3	9	19	Nein	16	4	439,02	11,55	18,18
8	B1-08	3	9	19	Nein	16	4	505,14	13,29	20,91
9	B1-09	3	9	19	Nein	16	4	518,61	13,64	21,44
10	B1-10	3	9	19	Nein	16	4	453,24	11,92	18,74
11	B1-11	3	9	19	Nein	16	4	297,36	7,82	12,27
12	B1-12	3	9	19	Nein	16	0	460,65	12,12	19,08
13	B1-13	3	9	19	Nein	16	4	228,66	6,01	9,46
14	B1-14	3	9	19	Nein	16	4	425,91	11,20	17,64
15	B1-15	3	9	19	Nein	16	0	446,04	11,73	18,46
16	B1-16	3	9	15	Nein	16	0	412,11	13,73	17,06
17	B1-17	3	9	19	Nein	16	4	441,36	11,61	18,24
18	B1-18	3	9	19	Nein	16	4	423,54	11,14	17,52
19	B1-19	3	9	15	Nein	16	0	381,54	12,71	15,78
20	B1-20	3	9	15	Nein	16	0	484,29	16,14	20,04

lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	Versagensart	Lamellenbezeichnung
[-]	[-]	[-]	[-]
1	B1-01	NQ	1.1_200 + 2.1_200 + 3.1_200
2	B1-02	NQ	4.1_200 + 5.1_200 + 6.1_200
3	B1-03	NQ	7.1_200 + 8.1_200 + 9.1_200
4	B1-04	NQ	10.1_200 + 11.1_200 + 12.1_200
5	B1-05	MB	13.1_200 + 14.1_200 + 15.1_200
6	B1-06	MB	16.1_200 + 17.1_200 + 18.1_200
7	B1-07	NQ	19.1_200 + 20.1_200 + 21.1_200
8	B1-08	MB	22.1_200 + 23.1_200 + 24.1_200
9	B1-09	NQ	25.1_200 + 26.1_200 + 27.1_200
10	B1-10	SB	28.1_200 + 29.1_200 + 30.1_200
11	B1-11	BR	1.1_200 + 2.1_200 + 3.1_200
12	B1-12	MB	4.1_200 + 5.1_200 + 6.1_200
13	B1-13	BR	7.1_200 + 8.1_200 + 9.1_200
14	B1-14	NQ	10.1_200 + 11.1_200 + 12.1_200
15	B1-15	MB	13.1_200 + 14.1_200 + 15.1_200
16	B1-16	MB	16.1_200 + 17.1_200 + 18.1_200
17	B1-17	NQ	19.1_200 + 20.1_200 + 21.1_200
18	B1-18	NQ	22.1_200 + 23.1_200 + 24.1_200
19	B1-19	MB	25.1_200 + 26.1_200 + 27.1_200
20	B1-20	SB	28.1_200 + 29.1_200 + 30.1_200

## B-7 Ergebnisse; Prüfreihe „B2“

lfd. Nr.	Probekörper- bezeichnung	Länge l	Breite 1	Breite 2	Breite 3	Höhe/ Dicke h <sub>1</sub>	Höhe/ Dicke h <sub>2</sub>	Höhe/ Dicke h <sub>3</sub>	Masse m	Rohdichte ρ	MW Breite b	MW Höhe h	Holzfeuchte u
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm]	[mm]	[%]
1	B2-01	2001,5	200,13	200,78	200,78	120,08	120,28	120,56	18850	390	200,56	120,31	8,35
2	B2-02	2001,9	200,07	200,75	200,64	119,96	120,22	120,69	19712	408	200,49	120,29	8,35
3	B2-03	2001,6	200,37	200,62	200,69	119,74	120,52	120,52	18198	377	200,56	120,26	8,35
4	B2-04	2001,8	200,16	200,45	200,55	120,25	120,28	120,48	18288	379	200,39	120,34	8,35
5	B2-05	2001,4	200,20	200,91	200,66	120,13	120,43	120,40	21194	439	200,59	120,32	8,35
6	B2-06	2001,7	200,15	200,68	199,95	119,83	120,20	120,75	18482	383	200,26	120,26	8,35
7	B2-07	2001,5	200,22	200,84	200,64	120,45	120,42	120,23	18634	386	200,57	120,37	8,35
8	B2-08	2001,6	200,19	200,84	200,66	119,88	120,39	120,45	19368	401	200,56	120,24	8,35
9	B2-09	1968,0	200,66	200,13	199,74	120,11	120,21	120,72	17794	375	200,18	120,35	8,35
10	B2-10	2001,7	200,18	200,70	200,52	120,02	120,07	120,05	18900	392	200,47	120,05	8,35
11	B2-11	2001,5	200,13	200,78	200,78	120,08	120,28	120,56	18850	390	200,56	120,31	8,35
12	B2-12	2001,9	200,07	200,75	200,64	119,96	120,22	120,69	19712	408	200,49	120,29	8,35
13	B2-13	2001,6	200,37	200,62	200,69	119,74	120,52	120,52	18198	377	200,56	120,26	8,35
14	B2-14	2001,8	200,16	200,45	200,55	120,25	120,28	120,48	18288	379	200,39	120,34	8,35
15	B2-15	2001,4	200,20	200,91	200,66	120,13	120,43	120,40	21194	439	200,59	120,32	8,35
16	B2-16	2001,7	200,15	200,68	199,95	119,83	120,20	120,75	18482	383	200,26	120,26	8,35
17	B2-17	2001,5	200,22	200,84	200,64	120,45	120,42	120,23	18634	386	200,57	120,37	8,35
18	B2-18	2001,6	200,19	200,84	200,66	119,88	120,39	120,45	19368	401	200,56	120,24	8,35
19	B2-19	1968,0	200,66	200,13	199,74	120,11	120,21	120,72	17794	375	200,18	120,35	8,35
20	B2-20	2001,7	200,18	200,70	200,52	120,02	120,07	120,05	18900	392	200,47	120,05	8,35



lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	Rohdichte $\rho_{12}$	Ultraschalllaufzeit t	Ultraschallgeschw. v	Ultraschallgeschw. $v_{12}$	dyn. E-Modul $E_{dyn}$	dyn. E-Modul $E_{dyn,12}$	$d_{Schraube}$	$l_{Schraube}$	m	r
[-]	[-]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]	[Stk]	[Stk]
1	B2-01	397,44	342,00	5852,34	5851,21	13368,22	13606,92	8	240	4(3)	3(4)
2	B2-02	415,75	353,00	5671,10	5670,01	13131,33	13365,80	8	240	5(4)	2(3)
3	B2-03	383,83	376,00	5323,40	5322,37	10682,18	10872,92	8	240	5(4)	5(4)
4	B2-04	385,77	377,00	5309,81	5308,79	10681,63	10872,36	8	240	5(4)	2(3)
5	B2-05	446,77	343,00	5834,99	5833,86	14938,65	15205,40	8	240	5(4)	5(4)
6	B2-06	390,38	349,00	5735,53	5734,42	12611,93	12837,13	8	240	5(4)	5(4)
7	B2-07	392,68	370,00	5409,46	5408,41	11284,78	11486,29	8	240	4(3)	3(4)
8	B2-08	408,57	339,00	5904,42	5903,28	13988,21	14237,99	8	240	4(3)	3(4)
9	B2-09	382,17	346,00	5687,86	5686,76	12142,24	12359,06	8	240	5(4)	5(4)
10	B2-10	399,51	357,00	5607,00	5605,92	12334,80	12555,05	8	240	5(3)	4(3)
11	B2-11	397,44	342,00	5852,34	5851,21	13368,22	13606,92	8	240	5(4)	5(4)
12	B2-12	415,75	353,00	5671,10	5670,01	13131,33	13365,80	8	240	5(4)	2(3)
13	B2-13	383,83	376,00	5323,40	5322,37	10682,18	10872,92	8	240	5(4)	5(4)
14	B2-14	385,77	377,00	5309,81	5308,79	10681,63	10872,36	8	240	5(4)	5(4)
15	B2-15	446,77	343,00	5834,99	5833,86	14938,65	15205,40	8	240	5(4)	5(4)
16	B2-16	390,38	349,00	5735,53	5734,42	12611,93	12837,13	8	240	5(4)	5(4)
17	B2-17	392,68	370,00	5409,46	5408,41	11284,78	11486,29	8	240	5(4)	5(4)
18	B2-18	408,57	339,00	5904,42	5903,28	13988,21	14237,99	8	240	5(4)	5(4)
19	B2-19	382,17	346,00	5687,86	5686,76	12142,24	12359,06	8	240	3(4)	5(4)
20	B2-20	399,51	357,00	5607,00	5605,92	12334,80	12555,05	8	240	4(3)	3(4)

lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	N	Vorbohren	Eindrehmoment	Querzug-sicherung	Kraft $F_{max}$	Kraft pro VM $F_{max} / (N*2)$	$\sigma_{Bruch}$	Versagensart	Lamellenbez.
[-]	[-]	[Stk]	Ja/Nein	[Nm]	[Stk]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
1	B2-01	12	n	16	0	485,76	20,240	20,13	BR	1.2_200 + 2.2_200 + 3.2_200
2	B2-02	10	n	16	2	468,78	23,439	19,44	NQ	4.2_200 + 5.2_200 + 6.2_200
3	B2-03	16	n	16	4	339,75	10,617	14,09	NQ	7.2_200 + 8.2_200 + 9.2_200
4	B2-04	10	n	16	0	304,38	15,219	12,62	NQ	10.2_200 + 11.2_200 + 12.2_200
5	B2-05	16	n	16	4	398,97	12,468	16,53	SB	13.2_200 + 14.2_200 + 15.2_200
6	B2-06	16	n	16	4	465,54	14,548	19,33	NQ	16.2_200 + 17.2_200 + 18.2_200
7	B2-07	12	n	16	0	464,82	19,368	19,25	NQ	19.2_200 + 20.2_200 + 21.2_200
8	B2-08	12	n	16	0	524,49	21,854	21,75	SCHUB	22.2_200 + 23.2_200 + 24.2_200
9	B2-09	16	n	16	4	539,73	16,867	22,40	NQ	25.2_200 + 26.2_200 + 27.2_200
10	B2-10	12	n	16	2	519,84	21,660	21,60	SB	28.2_200 + 29.2_200 + 30.2_200
11	B2-11	16	n	16	4	498,75	15,586	20,67	NQ	1.2_200 + 2.2_200 + 3.2_200
12	B2-12	10	n	16	0	417,84	20,892	17,33	SCHUB	4.2_200 + 5.2_200 + 6.2_200
13	B2-13	16	n	16	4	334,29	10,447	13,86	NQ	7.2_200 + 8.2_200 + 9.2_200
14	B2-14	16	n	16	4	406,8	12,713	16,87	NQ	10.2_200 + 11.2_200 + 12.2_200
15	B2-15	16	n	16	4	628,98	19,656	26,06	SCHUB	13.2_200 + 14.2_200 + 15.2_200
16	B2-16	16	n	16	4	523,05	16,345	21,72	NQ	16.2_200 + 17.2_200 + 18.2_200
17	B2-17	16	n	16	4	578,67	18,083	23,97	NQ	19.2_200 + 20.2_200 + 21.2_200
18	B2-18	16	n	16	4	487,32	15,229	20,21	NQ	22.2_200 + 23.2_200 + 24.2_200
19	B2-19	16	n	16	0	587,67	18,365	24,39	NQ	25.2_200 + 26.2_200 + 27.2_200
20	B2-20	12	n	16	4	551,46	22,978	22,92	NQ	28.2_200 + 29.2_200 + 30.2_200

## B-8 Ergebnisse; Prüfreihe „B3“

lfd. Nr.	Probekörper- bezeichnung	Länge l	Breite b <sub>1</sub>	Breite b <sub>2</sub>	Breite b <sub>3</sub>	Höhe/ Dicke h <sub>1</sub>	Höhe/ Dicke h <sub>2</sub>	Höhe/ Dicke h <sub>3</sub>	Masse m	Rohdichte ρ	MW Breite b
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm]
1	B3-01	1800,5	200,07	200,21	200,26	80,37	80,32	80,07	11182	387	200,18
2	B3-02	1800,5	200,89	200,2	200,24	80,16	80,12	80,32	12514	432	200,44
3	B3-03	1800,5	200,73	200,27	200,32	80,14	80,27	80,21	12224	422	200,44
4	B3-04	1800,5	199,95	200,67	200,33	80,23	80,29	80,32	12012	415	200,32
5	B3-05	1800,7	200,21	200,03	200,18	80,33	80,26	80,15	11684	404	200,14
6	B3-06	1800,8	200,18	199,99	200,25	80,38	80,28	79,88	11220	388	200,14
7	B3-07	1800,6	200,18	200,21	200,3	80,38	80,29	80,35	11114	384	200,23
8	B3-08	1800,5	200,11	200,14	200,27	80,45	80,27	80,15	11154	385	200,17
9	B3-09	1800,5	200,03	200,18	200,2	80,33	80,17	80,1	11714	405	200,14
10	B3-10	1800,5	200,21	200,03	200,14	80,26	80,29	80,05	11828	409	200,13
11	B5-04	1800,2	200,05	200,03	199,98	80,24	80,24	79,88	10684	370	200,02
12	B5-07	1800,5	199,89	200,21	199,96	80,19	80,21	79,57	11828	411	200,02

lfd. Nr.	Probekörper- bezeichnung	MW Höhe	Datum Eingang	Masse Eingang	Masse Ausgang	Datum Ausgang	Holzfeuchte u	Rohdichte $\rho_{12}$	Ultraschall- laufzeit t	Ultraschall- geschw. v	Ultraschall- geschw. $v_{12}$
[-]	[-]	[mm]	[-]	[g]	[g]	[-]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]
1	B3-01	80,25	03.12.2014	152,88	140,47	09.12.2014	8,83	392,70	322,00	5591,61	5590,68
2	B3-02	80,20	03.12.2014	207,3	190,43	09.12.2014	8,86	439,14	295,00	6103,39	6102,37
3	B3-03	80,21	03.12.2014	166,98	153,78	09.12.2014	8,58	429,52	333,00	5406,91	5405,93
4	B3-04	80,28	03.12.2014	174,96	161,00	09.12.2014	8,67	421,76	325,00	5540,00	5539,02
5	B3-05	80,25	03.12.2014	163,93	151,08	09.12.2014	8,51	411,07	330,00	5456,67	5455,66
6	B3-06	80,18	03.12.2014	167,06	153,70	09.12.2014	8,69	394,69	325,00	5540,92	5539,95
7	B3-07	80,34	04.12.2014	165,39	152,51	09.12.2014	8,45	390,52	334,00	5391,02	5390,00
8	B3-08	80,29	03.12.2014	152,48	140,46	09.12.2014	8,56	392,09	310,00	5808,06	5807,01
9	B3-09	80,20	04.12.2014	176,53	162,52	09.12.2014	8,62	412,18	314,00	5734,08	5733,05
10	B3-10	80,20	03.12.2014	165,22	151,48	09.12.2014	9,07	415,29	344,00	5234,01	5233,20
11	B5-04	80,12	05.12.2014	161,41	149,03	09.12.2014	8,31	377,18	333,00	5406,01	5404,95
12	B5-07	79,99	05.12.2014	155,54	143,72	09.12.2014	8,22	418,34	308,00	5845,78	5844,61

lfd. Nr.	Probekörper- bezeichnung	dyn. E-Modul $E_{dyn}$	dyn. E-Modul $E_{dyn,12}$	$d_{Schraube}$	$l_{Schraube}$	m	r	N	Vorböhrern	Eindrehmoment	Querzugsicherung
[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]	[Stk]	[Stk]	[Stk]	Ja/Nein	[Nm]	[Stk]
1	B3-01	12086,96	12274,14	8	180	2	8	16	N	16	0
2	B3-02	16105,69	16353,19	8	180	2	8	16	N	16	0
3	B3-03	12345,91	12552,25	8	180	2	8	16	N	16	0
4	B3-04	12732,61	12939,98	8	180	2	8	16	N	16	0
5	B3-05	12029,40	12235,06	8	180	2	8	16	N	16	0
6	B3-06	11920,42	12113,32	8	180	2	8	16	N	16	0
7	B3-07	11151,51	11345,43	8	180	2	8	16	N	16	0
8	B3-08	13002,67	13221,65	8	180	2	8	16	N	16	0
9	B3-09	13327,17	13547,52	8	180	2	8	16	N	16	0
10	B3-10	11212,65	11373,35	8	180	2	8	16	N	16	0
11	B5-04	10823,10	11018,64	8	180	2	8	16	N	16	0
12	B5-07	14031,17	14290,34	8	180	2	8	16	N	16	0

lfd. Nr.	Probekörper- bezeichnung	Kraft $F_{\max}$	Kraft pro VM $F_{\max} / (N \cdot 2)$	$\sigma_{\text{Bruch}}$	Versagensart	Lamellenbezeichnung
[-]	[-]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
1	B3-01	342,21	10,694	21,301	NQ	1_180 + 2_180
2	B3-02	429,84	13,433	26,739	NQ	3_180 + 4_180
3	B3-03	338,85	10,589	21,077	NQ	5_180 + 6_180
4	B3-04	316,17	9,880	19,661	NQ	7_180 + 8_180
5	B3-05	236,94	7,404	14,753	BR	9_180 + 10_180
6	B3-06	357,39	11,168	22,271	NQ	11_180 + 12_180
7	B3-07	227,61	7,113	14,149	BR	13_180 + 14_180
8	B3-08	417,15	13,036	25,955	NQ	15_180 + 16_180
9	B3-09	339,00	10,594	21,120	BR	17_180 + 18_180
10	B3-10	371,61	11,613	23,153	BR	19_180 + 20_180
11	B5-04	275,37	8,605	17,183	BR	47_180 + 48_180
12	B5-07	385,59	12,050	24,100	NQ	53_180 + 54_180

## B-9 Ergebnisse; Prüfreihe „B4“

lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	Länge l	Breite b <sub>1</sub>	Breite b <sub>2</sub>	Breite b <sub>3</sub>	Höhe/Dicke h <sub>1</sub>	Höhe/Dicke h <sub>2</sub>	Höhe/Dicke h <sub>3</sub>	Masse m	Rohdichte ρ	MW Breite b	MW Höhe h
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm]	[mm]
1	B4-01	1800,5	200,00	200,13	200,24	80,39	80,18	79,94	11652	403	200,12	80,17
2	B4-02	1800,5	200,08	200,01	200,13	80,10	80,08	80,29	13106	454	200,07	80,16
3	B4-03	1800,5	199,98	200,38	200,38	80,29	80,23	80,07	13642	472	200,25	80,20
4	B4-04	1800,8	200,08	200,27	200,16	80,38	80,30	80,07	12996	449	200,17	80,25
5	B4-05	1800,5	199,85	200,28	200,29	80,33	80,27	80,21	12166	421	200,14	80,27
6	B4-06	1800,4	199,84	200,15	200,15	80,04	80,30	80,69	13294	459	200,05	80,34
7	B4-07	1800,4	200,11	200,71	200,41	80,16	80,15	80,02	12526	433	200,41	80,11
8	B4-08	1800,3	199,78	199,95	200,01	79,95	80,25	80,35	13122	455	199,91	80,18
9	B4-09	1800,5	199,93	200,29	200,12	79,86	80,18	80,18	11570	401	200,11	80,07
10	B4-10	1800,2	199,96	200,44	200,16	80,13	79,71	80,02	13564	471	200,19	79,95

lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	Datum Eingang	Masse Eingang	Masse Ausgang	Datum Ausgang	Holzfeuchte u	Rohdichte ρ <sub>12</sub>	Ultraschalllaufzeit t	Ultraschallgeschw. v	Ultraschallgeschw. v <sub>12</sub>
[-]	[-]	[-]	[g]	[g]	[-]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[sec <sup>-6</sup> ]	[m/s]	[m/s]
1	B4-01	04.12.2014	165,19	151,80	09.12.2014	8,82%	409,78	336,00	5358,63	5357,73
2	B4-02	04.12.2014	178,24	164,00	09.12.2014	8,68%	461,42	322,00	5591,61	5590,63
3	B4-03	04.12.2014	195,01	179,58	09.12.2014	8,59%	479,84	310,00	5808,06	5807,02
4	B4-04	04.12.2014	171,79	157,96	09.12.2014	8,76%	456,55	312,00	5771,79	5770,80
5	B4-05	04.12.2014	180,94	166,70	09.12.2014	8,54%	427,87	308,00	5845,78	5844,71
6	B4-06	04.12.2014	203,38	187,35	09.12.2014	8,56%	467,33	303,00	5941,91	5940,83
7	B4-07	04.12.2014	162,91	150,13	09.12.2014	8,51%	440,90	316,00	5697,47	5696,42
8	B4-08	04.12.2014	216,16	198,88	09.12.2014	8,69%	462,23	302,00	5961,26	5960,21
9	B4-09	04.12.2014	163,05	150,12	09.12.2014	8,61%	407,82	328,00	5489,33	5488,34
10	B4-10	04.12.2014	214,14	196,61	09.12.2014	8,92%	478,01	296,00	6081,76	6080,76



lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	dyn. E-Modul $E_{dyn}$	dyn. E-Modul $E_{dyn,12}$	$d_{Schraube}$	$l_{Schraube}$	m	r	N	Vorbohren	Eindrehmoment	Querzugsicherung
[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]	[Stk]	[Stk]	[Stk]	Ja/Nein	[Nm]	[Stk]
1	B4-01	11582,58	11762,73	8	180	3	5	15	N	16	0
2	B4-02	14191,32	14421,61	8	180	3	5	15	N	16	0
3	B4-03	15915,72	16181,05	8	180	3	5	15	N	16	0
4	B4-04	14966,56	15204,13	8	180	3	5	15	N	16	0
5	B4-05	14373,16	14616,30	8	180	3	5	15	N	16	0
6	B4-06	16220,28	16493,55	8	180	3	5	15	N	16	0
7	B4-07	14066,99	14306,98	8	180	3	5	15	N	16	0
8	B4-08	16158,65	16420,42	8	180	3	5	15	N	16	0
9	B4-09	12084,12	12284,34	8	180	3	5	15	N	16	0
10	B4-10	17412,19	17674,90	8	180	3	5	15	N	16	0

lfd. Nr.	Probekörperbezeichnung	Kraft $F_{max}$	Kraft pro VM $F_{max} / (N*2)$	$\sigma_{Bruch}$	Versagensart	Lamellenbezeichnung
[-]	[-]	[kN]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
1	B4-01	350,31	11,677	21,83448	NQ	21_180 + 22_180
2	B4-02	365,22	12,174	22,77329	MB	23_180 + 24_180
3	B4-03	428,82	14,294	26,70259	NQ	25_180 + 26_180
4	B4-04	310,41	10,347	19,32376	BR	27_180 + 28_180
5	B4-05	382,02	12,734	23,77929	NQ	29_180 + 30_180
6	B4-06	514,77	17,159	32,02817	NQ	31_180 + 32_180
7	B4-07	334,38	11,146	20,82736	NQ	33_180 + 34_180
8	B4-08	488,13	16,271	30,45157	NQ	35_180 + 36_180
9	B4-09	244,56	8,152	15,26235	BR	37_180 + 38_180
10	B4-10	481,26	16,042	30,06824	SB	39_180 + 40_180





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