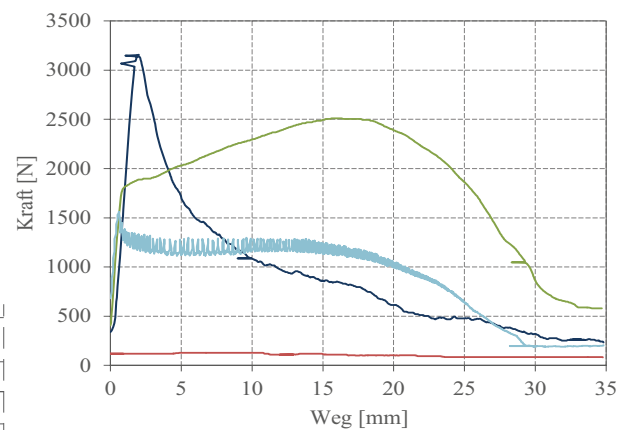
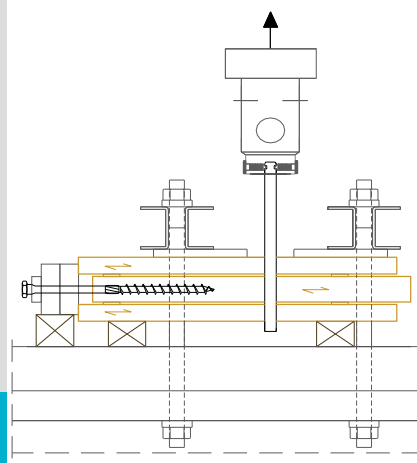


# Einflussfaktoren auf das Tragverhalten einer Stabdübelverbindung

Bestimmung des Reibungsbeiwertes  
zwischen Stabdübel und umgebendem Holz

M-4-4/2016



**Zlata Holic**  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz





Zlata Holic, BSc

# **Einflussfaktoren auf das Tragverhalten einer Stabdübelverbindung – Bestimmung des Reibungsbeiwertes zwischen Stabdübel und umgebendem Holz**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieurin  
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 Georg Flatscher  
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, Februar 2016



# EIDESSTÄTTLICHE 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

Die nächsten Zeilen möchte ich all denen widmen, die mir während der Entstehung dieser Arbeit geholfen und mich unterstützt haben.

Für die Möglichkeit, dass ich diese Masterarbeit am Institut für Holzbau und Holztechnologie verfassen durfte als auch für die, durch seinen Vorlesungen geweckte Begeisterung für den Baustoff Holz, möchte ich mich herzlich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Schickhofer bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Dipl.-Ing. Georg Flatscher für die unzähligen Diskussionen und Motivationsgespräche, wegweisende Vorschläge, seine Hilfsbereitschaft und konstruktive Kritik.

Bei Dipl.-Ing. Manfred Augustin und Dipl.-Ing. Florian Wolfthaler sowie bei Ing. Bernd Heissenberger möchte ich mich für die Hilfe während der Prüfdurchführung bedanken.

Der größte Dank gebührt meinen Eltern und Geschwistern, die mir immer einen starken Rückhalt gegeben haben und an mich geglaubt haben. Ihre Liebe und Unterstützung hat mich immer wieder neu motiviert. Ein besonderer Dank gilt meiner Schwester Mine und Schwager Nedzad, die mir ein Zuhause gegeben haben und mir mein Studium ermöglicht haben.

Bei meinem Freund Emir möchte ich mich für seine Geduld und emotionale Unterstützung während der gesamten Studienzeit bedanken.

Weiteres bedanke ich mich bei meinen Freunden und Studienkollegen für die schöne und lustige Studienzeit.

Zuletzt möchte ich mich bei meinen Studienkollegen aus dem Diplomandenzimmer für „DER, DIE oder DAS“ Diskussionen und Motivationsgespräche bedanken.





# Kurzfassung

Nach dem heutigen Stand der Normung berechnet sich die Tragfähigkeit einer auf Abscheren beanspruchten Stabdübelverbindung mit dem 1949 von K. W. Johansen veröffentlichten Tragmodell. Prüftechnische Untersuchungen zeigen jedoch wesentliche Unterschiede zwischen nach dem Modell von Johansen berechneten und empirisch ermittelten Tragfähigkeiten. Da das Trag- und Verformungsverhalten einer Stabdübelverbindung von mehreren Parametern beeinflusst wird, war ein Ziel dieser Arbeit die für diese Abweichungen verantwortlichen Parameter herauszufiltern.

Aus der durchgeführten Literaturrecherche ergab sich der Seileffekt als ein wesentlicher Einflussparameter, welcher bei Stabdübelverbindungen jedoch nur infolge der Reibung zwischen Stabdübel und dem umgebenden Holz möglich ist. Um dieses Potential prüftechnisch zu untersuchen, wurden im Rahmen dieser Arbeit insgesamt 110 Prüfungen an einer zweiseitigen Holz-Holz Stabdübelverbindung durchgeführt. In mehreren Prüfserien wurden der Stabdübeldurchmesser, die Oberflächenbeschaffenheit des Stabdübels, das Stabdübelmaterial sowie die Scherbeanspruchung des Stabdübels variiert.

Obwohl im Tragmodell derzeit nicht berücksichtigt, lassen die Prüfergebnisse den Schluss zu, dass die Tragfähigkeit einer Stabdübelverbindung durch den Einfluss der Reibung zwischen Stabdübel und dem umgebenden Holz durchaus erhöht werden kann. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass eine raue Oberfläche den Reibungsbeiwert nahezu verdoppeln kann.

Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse können als Grundlage für zukünftige Untersuchungen an Stabdübelverbindungen und auch für die Weiterentwicklung des aktuell eingesetzten Tragmodells dienen.

## Abstract

According to current standards, the load-carrying capacity of shear loaded dowel-type connections is calculated by applying Johansen's yield theory, published in 1949. However, experimental campaigns show discrepancies between the results predicted by Johansen's model and the actual obtained load-carrying capacities. Since the load-deformation behavior of dowel-type connections depends on various parameters, the present thesis firstly aimed to single out the ones responsible for aforementioned discrepancies.

The conducted literature survey showed that the so-called rope effect can be singled out as a distinct influencing parameter. However, in joints where steel-dowels are used as fasteners, the rope-effect can only occur as a result of friction between the dowels and the surrounding wood. In order to experimentally investigate this effect, 110 tests on timber-to-timber double shear joints equipped with a single steel dowel were carried out within this thesis. Thereby, different test series were arranged varying the parameters (i) diameter, (ii) surface treatment and (iii) material of dowels as well as (iv) the applied shear load.

Even if not considered in the current standards, the resulting coefficients of friction lead to the conclusion that the load-carrying capacity of a dowel joint can be increased by the influence of the rope effect. Furthermore, it was shown that a rougher dowel surface is able to nearly double the appearing coefficient of friction.

Findings obtained within this thesis can serve as a basis for further investigations on dowel joints on the one and further development of the current yield model on the other hand.



# Inhaltsverzeichnis

<b>KAPITEL 1: EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1-1 MOTIVATION UND ZIEL DER ARBEIT .....	1
<b>KAPITEL 2: STAND DER TECHNIK.....</b>	<b>3</b>
2-1 VERBINDUNGEN IM HOLZBAU .....	3
2-1.2 Einteilung von Verbindungen und Verbindungsmitteln .....	5
2-1.3 Zimmermannsmäßige Verbindungen .....	6
2-1.4 Ingenieurmäßige Verbindungen .....	6
2-1.4.1 Auf Abscheren beanspruchte stiftförmige Verbindungsmittel .....	7
2-2 DAS FLIEßMODELL IN DER EUROPÄISCHEN NORMUNG .....	8
2-2.1 Allgemeines zu dem Tragmodell nach Johansen.....	8
2-3 EINFLUSSPARAMETER .....	10
2-3.1 Geometrie der Verbindung .....	10
2-3.2 Lochleibungsfestigkeit .....	13
2-3.2.1 Rohdichte des Holzes .....	14
2-3.2.2 Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung.....	15
2-3.2.3 Verbindungsmitteldurchmesser .....	18
2-3.2.4 Oberflächenbeschaffenheit des Verbindungsmittels .....	20
2-3.2.5 Holzfeuchte.....	23
2-3.2.6 Neigung der Jahrringe und Jahrringbreite .....	23
2-3.2.7 Eintreibverfahren des Verbindungsmittels/Lochausführung.....	25
2-3.3 Fließmoment.....	27
2-3.3.1 Einfluss der Stahlgüte auf die Tragfähigkeit einer Verbindung .....	28
2-3.4 Gruppenwirkung.....	29
2-3.5 Seileffekt .....	29
2-4 VERSAGENSMECHANISMEN.....	32
<b>KAPITEL 3: SEILEFFEKT .....</b>	<b>37</b>
3-1 STAND DES WISSENS .....	37
3-2 REIBUNG .....	43
<b>KAPITEL 4: PRÜFVORBEREITUNG UND DURCHFÜHRUNG.....</b>	<b>47</b>
4-1 ALLGEMEIN.....	47
4-2 PRÜFKONFIGURATION .....	47
4-3 PRÜFPLAN.....	49
4-4 MATERIAL .....	51
4-4.1 Holz .....	51
4-4.2 Stabdübel .....	53

4-4.3	Messschraube.....	54
4-5	BESTIMMUNG DER TRAGFÄHIGKEITEN .....	55
4-5.1	Tragfähigkeit der Stabdübelverbindung.....	55
4-5.2	Tragfähigkeit der Messschraube .....	57
4-6	PRÜFDURCHFÜHRUNG .....	58
<b>KAPITEL 5: AUSWERTUNG UND DISKUSSION DER PRÜFERGEBNISSE .....</b>		<b>61</b>
5-1	ALLGEMEIN .....	61
5-2	AUSZIEHWIDERSTAND DER STABDÜBEL.....	61
5-2.1	Vergleich der Auszieh widerstände .....	63
5-3	REIBUNGSBEIWERTE .....	65
5-3.1	Vergleich der Reibungsbeiwerte.....	67
<b>KAPITEL 6: SCHLUSSBETRACHTUNG UND AUSBLICK.....</b>		<b>69</b>
<b>ANHANG A VERZEICHNISSE.....</b>		<b>I</b>
A-1	Abbildungsverzeichnis.....	IV
A-2	Tabellenverzeichnis .....	VII
<b>ANHANG B ERGEBNISSE ALLER PRÜFSERIEN.....</b>		<b>IX</b>
B-1	Prüfserie 8_G_0 .....	IX
B-2	Prüfserie 8_G_1 .....	X
B-3	Prüfserie 8_G_2 .....	XII
B-4	Prüfserie 8_G_3 .....	XIV
B-5	Prüfserie 8_R_2 .....	XVI
B-6	Prüfserie 12_G_0 .....	XVIII
B-7	Prüfserie 12_G_1 .....	XIX
B-8	Prüfserie 12_G_2 .....	XXI
B-9	Prüfserie 12_G_3 .....	XXIII
B-10	Prüfserie 12_R_2 .....	XXV
B-11	Prüfserie 12_E_2.....	XXVII

# KAPITEL 1: EINLEITUNG

## 1-1 MOTIVATION UND ZIEL DER ARBEIT

Die in der aktuellen Europäischen Norm für die Bemessung und Konstruktion von Holzbauten [1] (im Folgenden Eurocode 5) festgeschriebene Berechnung von auf Abscheren beanspruchten stiftförmigen Verbindungsmitteln basiert auf dem Tragmodell von Johansen [2]. Dieses theoretische Tragmodell wurde vom Dänen K. W. Johansen im Jahr 1949 vorgestellt und ist auch unter der Bezeichnung „European Yield Model“ (EYM) bekannt. Als Basis für dieses Modell wird ein ideal-plastisches Materialverhalten der eingesetzten Verbindungsmittel unter Biegebeanspruchung sowie des umgebenden Holzes unter Lochleibungsdruck angenommen.

Dem EYM folgend, ist die Tragfähigkeit einer Verbindung hauptsächlich von der Geometrie der Verbindung, der Biegetragfähigkeit des Verbindungsmittels sowie der Lochleibungsfestigkeit des Holzes abhängig. Des Weiteren bezieht sich das Tragmodell von Johansen ausschließlich auf ein Verbindungsmittel wodurch bei Verbindungen mit mehreren Verbindungsmitteln die Berücksichtigung eines Gruppeneffektes notwendig wird.

Umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich der Tragfähigkeiten von Stabdübelverbindungen zeigten jedoch, dass es eine wesentliche Diskrepanz zwischen prüftechnisch ermittelten und nach dem EYM berechneten Tragfähigkeiten gibt [3], [4], [5], [6], [7]. Da eine Verbindung neben den technischen auch wirtschaftliche Anforderungen erfüllen muss, sollte die Tragfähigkeit eines Verbindungsmittels bzw. einer Verbindung möglichst wirklichkeitsnah dargestellt und eingesetzt werden können. Es ist daher notwendig, die für die Abweichungen zwischen den empirischen und theoretischen Tragfähigkeiten verantwortlichen Parameter zu detektieren.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit liegt demzufolge auf der Identifizierung sowie Analyse jener Parameter, welche das Tragverhalten einer Stabdübelverbindung beeinflussen können. Im Rahmen dieser Recherche wurde das Hauptaugenmerk auf Holz-Holz-Verbindungen gelegt.

Obwohl im Eurocode 5 [1] für Stabdübelverbindungen nicht berücksichtigt, wird während dieser Parameterstudie insbesondere der Seileffekt detaillierter betrachtet. Der Grund dafür liegt in den Ausführungen von Hübner [3], welcher in seiner Dissertation nachweisen konnte, dass die Tragfähigkeit einer Stabdübelverbindung durch diesen Effekt um bis zu rund 20% (bei einreihigen Verbindungen) erhöht werden kann.

Da die hierfür notwendige Zugbeanspruchung des Stabdübels jedoch ausschließlich über Reibung in das betrachtete Verbindungsmittel eingebracht werden kann, werden in weiterer Folge prüftechnische Untersuchungen zu dieser Thematik vorgenommen. Insbesondere die Einflussparameter Stabdübeldurchmesser, Oberfläche des Stabdübels sowie Beanspruchung des Stabdübels sollen dabei variiert werden.

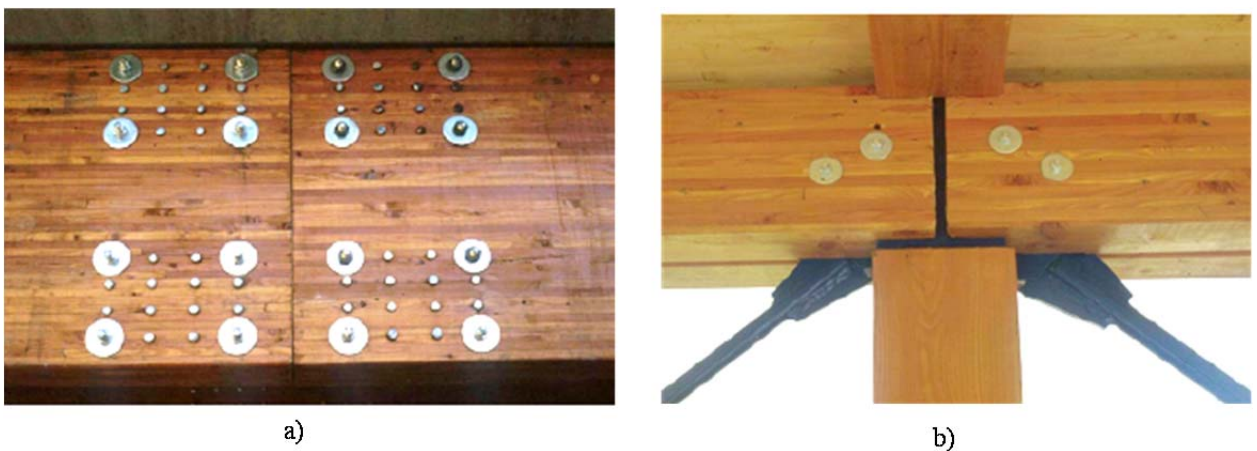
Mit Hilfe der resultierenden Ergebnisse sollen zum einen die jeweils anzusetzenden Reibungsbeiwerte ermittelt und zum anderen neue Erkenntnisse bezüglich deren Einfluss auf das Tragverhalten einer Stabdübelverbindung gewonnen werden.



## KAPITEL 2: STAND DER TECHNIK

### 2-1 VERBINDUNGEN IM HOLZBAU

Im konstruktiven Ingenieurholzbau werden meistens stabförmige Holzprodukte mit beschränkten Querschnittsabmessungen verwendet. Dadurch ist es notwendig, einzelne Bauteile einer Holzkonstruktion auf solche Art und Weise zu verbinden, dass sie statisch als eine Tragstruktur wirken. Die Verbindungen werden hauptsächlich als Stöße (Verlängerungen) oder Anschlüsse ausgebildet [4] (siehe Abbildung 2.1).



*Abbildung 2.1: Beispiele für einen: a) Stoß und b) Anschluss [4]*

Eine Verbindung muss Anforderungen nach wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten erfüllen. Bezüglich wirtschaftlicher Anforderungen ist besonders die rationelle Fertigung (Wirtschaftlichkeit, vertretbare Fertigungstoleranzen, zuverlässige Überprüfung) sowie ein einfacher Entwurf und eine übersichtliche Bemessung zu erwähnen [4].

Aus technischer Sicht ist beim Entwurf und der konstruktiven Gestaltung einer Verbindung besonders auf die Tragfähigkeit, Steifigkeit und Duktilität derselben zu achten [4].

Im nachfolgenden Kraft-Verschiebungs-Diagramm („Arbeitslinie“) sind die Zusammenhänge zwischen den oben erwähnten technischen Anforderungen (Tragfähigkeit = maximale Kraft, Steifigkeit =  $K_{ser}$  bzw.  $K_u$  und Duktilität =  $D_s$ ) an eine Verbindung bzw. ein Verbindungsmittel grafisch dargestellt.

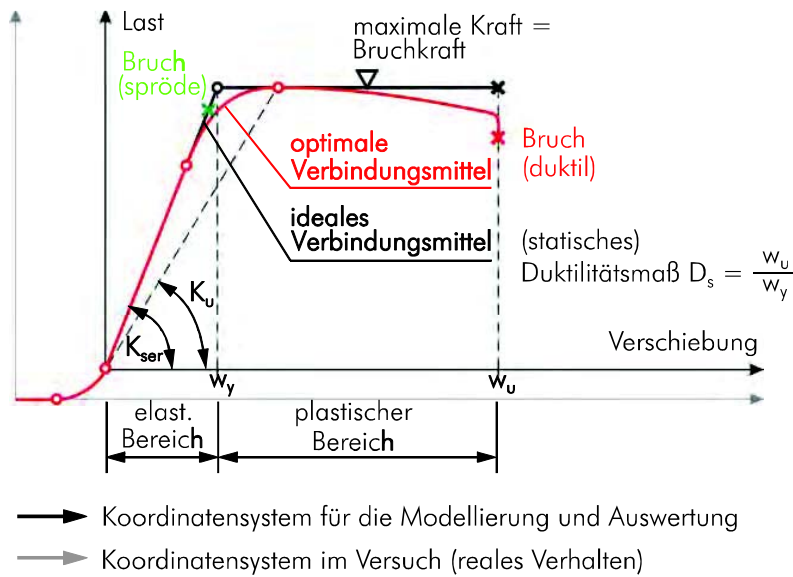


Abbildung 2.2: Arbeitslinie mit wesentlichen Grundbegriffen für das mechanische Verhalten von Verbindungsmitteln bzw. Verbindungen [4]

## Tragfähigkeit

Die Tragfähigkeit einer Verbindung stellt den Widerstand der Verbindung gegenüber einwirkenden Kräften dar und ist durch die Festigkeit der zu verbindenden Holzbauteile begrenzt. Verbindungen bilden Störstellen im Kraftfluss. Durch diese Störstellen kommt es zu Kraftumlenkungen, die zusätzliche Beanspruchungen in den zu verbindenden Bauteilen bewirken. Demzufolge weisen Verbindungen mit größeren Störungen eine geringere Leistungsfähigkeit auf. Dies wird auch über einen geringeren Wirkungsgrad  $\eta$  der Verbindung ausgedrückt. Der Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis zwischen der Tragfähigkeit eines Bauteiles mit bzw. ohne die betrachtete Verbindung [4].

## Steifigkeit

Unter Steifigkeit wird die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel bei mechanischer Belastung verstanden. Dabei ist zwischen lastunabhängigen bzw. lastabhängigen Wegen zu unterscheiden [4].

Die lastunabhängigen Wege werden als Schlupf bezeichnet. Der Schlupf tritt unter mechanischer Belastung bei der Überwindung des Lochspiels bis zum Anpressen des Verbindungsmittels an die Lochwandung auf. Alle weiteren elastischen und plastischen Verschiebungen der Verbindung bzw. der einzelnen Verbindungsmittel, welche unter mechanischer Beanspruchung entstehen, sind lastabhängige Wege [4].

Die Gesamtverformung von Bauwerken wird durch die Steifigkeit von Verbindungen mitunter maßgebend beeinflusst. Bei statisch bestimmten Systemen führen die Nachgiebigkeiten ausschließlich zu zusätzlichen Verformungen. Bei statisch unbestimmten Systemen hingegen führen sie, neben zusätzlichen Verformungen, auch zu Umlagerungen bei den Schnittgrößen. [4].

## Duktilität

Die Duktilität eines Bauteils, einer Verbindung oder eines Verbindungsmittels beschreibt deren Verformungspotential im plastischen Bereich. Holz besitzt jedoch vorwiegend ein sprödartiges Bruchverhalten (ausgenommen sind Druckbeanspruchungen). Dies bedeutet, dass vor der Entstehung des Bruches im Holz keine größeren Verformungen erkennbar sind. Da ein solch sprödes Versagen im



Bauwesen jedoch unerwünscht ist, sind für das duktile Verhalten von Holzkonstruktionen die eingesetzten Verbindungen von zentraler Bedeutung.

Die Duktilität von einzelnen Verbindungsmitteln spielt wiederum innerhalb von Verbindungen eine wesentliche Rolle, da sie eine gleichmäßige Lastverteilung, welche vielen Berechnungsmodellen zugrunde liegt, ermöglicht. Im Falle, dass die erforderliche Duktilität nicht erreicht wird, kann es zum Versagen durch Aufspalten und in weiterer Folge zum sog. „Reißverschlusseffekt“ kommen. [4].



Abbildung 2.3: „Reißverschlusseffekt“ in einem: a) einreihigen und b) zweireihigen Zuglaschenstoß [4]

Neben schon besprochenen Punkten, ist auch das Verhalten bei dynamischer Beanspruchung sowie der Brandschutz den technischen Anforderungen hinzuzufügen [4].

## 2-1.2 EINTEILUNG VON VERBINDUNGEN UND VERBINDUNGSMITTELN

Für Verbindungen bzw. Verbindungsmittel gibt es nach [4] verschiedene Unterteilungsmöglichkeiten:

- nach der Art der Kraftübertragung (stiftförmige Verbindungsmittel, flächenförmige Verbindungsmittel)
- nach der Art der mechanischen Wirkungsweise (auf Druck und Abscheren beruhende Verbindungen, auf Lochleibung beruhende Verbindungen, auf Scherfestigkeit beruhende Verbindungen)
- nach der Art der Herstellung bzw. Berechnung (zimmermannsmäßige Verbindungen, ingenieurmäßige Verbindungen).

Im Folgenden wird auf die beiden Hauptgruppen (zimmermannsmäßige bzw. ingenieurmäßige Verbindungen) ein wenig genauer eingegangen.

## 2-1.3 ZIMMERMANNSMÄßIGE VERBINDUNGEN

Zimmermannsmäßige Verbindungen sind handwerklich hergestellte Verbindungen nach definierten festgelegten Regeln, bei denen, abgesehen von Lagesicherungsmaßnahmen, keine holzfremden Materialien erforderlich sind. Der Einsatz dieser Verbindungen erfolgt meistens nach aus Erfahrung gewonnenen Kenntnissen. Bei dieser Art von Verbindungen erfolgt die Kraftübertragung im Allgemeinen auf Druck und Schub. Ein kombiniertes Auftreten von Schub und Querdruck führt zu einer leichten Erhöhung der Tragfähigkeit, während bei Schub und Querkraft erhebliche Abminderungen der Tragfähigkeit zu berücksichtigen sind. Einige Merkmale der zimmermannsmäßigen Verbindungen, welche aus dem häufig beträchtlich geschwächten Holzquerschnitten resultieren, sind geringe Nutzungsgrade, eine geringe Steifigkeit aber – bedingt durch die primäre Druckbeanspruchung – relativ hohe Duktilitätskenngrößen. Beim Einsatz von zimmermannsmäßigen Verbindungen ist besonderer Wert auf die Einhaltung einer hohen Herstellungsgenauigkeit und auf die Beachtung der festgelegten Holzfeuchten zu legen [4].

## 2-1.4 INGENIEURMÄßIGE VERBINDUNGEN

Die Übertragung der einwirkenden Kräfte erfolgt bei ingenieurmäßigen Verbindungen vorwiegend über Verbindungsmittel. Diese bestehen meistens aus Stahl oder Gusseisen; selten aus Hartholz, Kunststoff oder anderen geeigneten Materialien [4].

Bei ingenieurmäßigen Verbindungen unterscheidet man des Weiteren zwischen stiftförmigen und flächenförmigen sowie primär auf Abscheren bzw. Herausziehen beanspruchten Verbindungen und Verbindungsmittel. In der nachfolgenden Abbildung 2.4 ist die Einteilung der ingenieurmäßigen Verbindungen nach [4] ersichtlich.

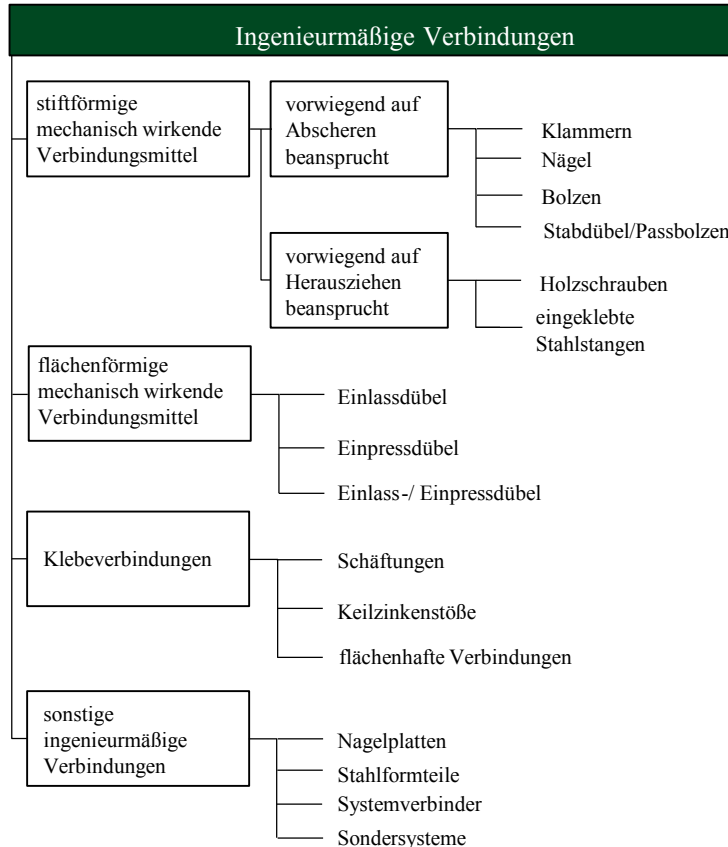
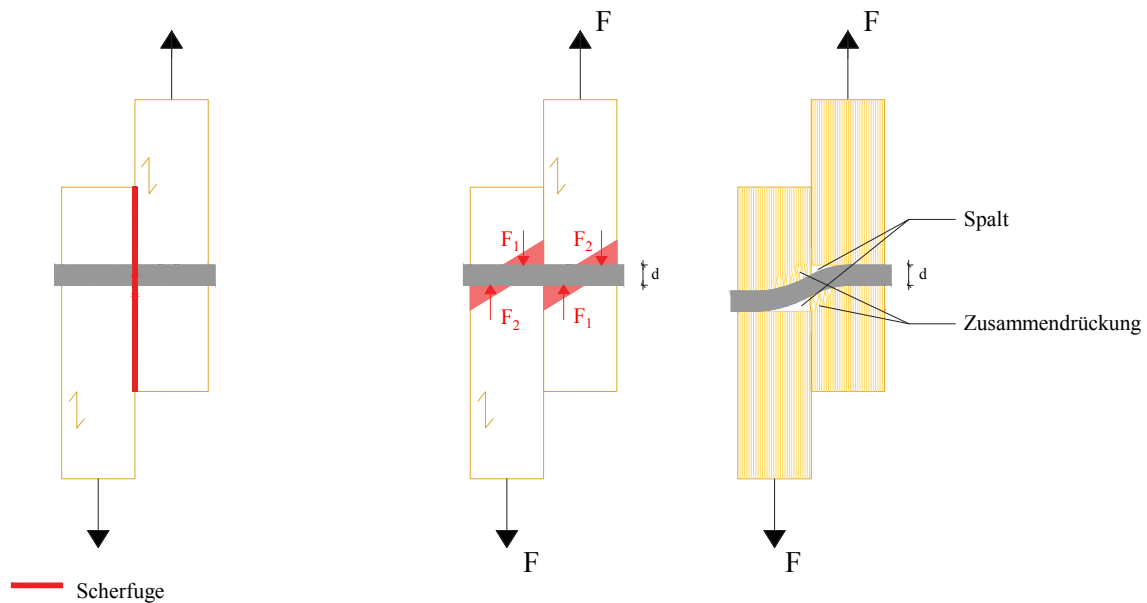


Abbildung 2.4: Einteilung von ingenieurmäßigen Verbindungen bzw. Verbindungsmittel [4]

Im Rahmen dieser Arbeit werden vor allem Stabdübelverbindungen untersucht, welche zu den auf Abscheren beanspruchten stiftförmigen Verbindungen zählen.

### 2-1.4.1 Auf Abscheren beanspruchte stiftförmige Verbindungsmittel

In der nachfolgenden Abbildung 2.5 ist eine einschnittige auf Abscheren beanspruchte Verbindung mit stiftförmigen Verbindungsmitteln sowie die Kraftübertragung und das Verformungsverhalten dargestellt.



**Abbildung 2.5: Kraftübertragung und Verformung einer auf Abscheren beanspruchte einschnittigen Verbindung mit stiftförmigem Verbindungsmittel [4], (überarbeitet)**

Bei solchen Verbindungen, wird die Kraft  $F$  über Kontakt (Pressung, Lochleibung) im Bereich der Scherfuge vom Holz auf das Verbindungsmittel übertragen. Die entstandenen Reaktionskräfte ( $F_1$ ) besitzen eine Exzentrizität und bilden somit ein Kräftepaar. Das resultierende Moment wird wiederum vom betragsmäßig kleineren Kräftepaar ( $F_2$ ) aufgenommen. Diese beiden Kräftepaare verursachen eine Biegebeanspruchung im Verbindungsmittel und damit auch die Biegeverformung des Verbindungsmittels (siehe Abbildung 2.5). Es lässt sich somit feststellen, dass die Tragfähigkeit von Verbindungen mit auf Abscheren beanspruchten stiftförmigen Verbindungsmitteln hauptsächlich von der Lochleibungsfestigkeit der miteinander verbundenen Hölzer und dem Fließmoment des Verbindungsmittels abhängig ist [4].

Im Weiteren wird das Tragmodell zur Berechnungen der Tragfähigkeit näher erklärt.

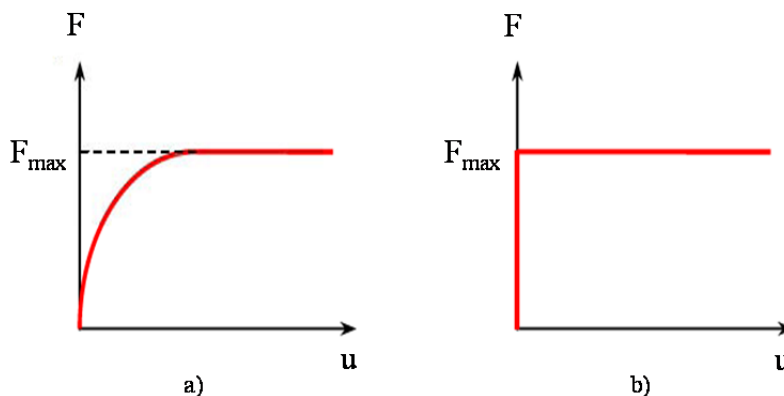
## 2-2 DAS FLIEßMODELL IN DER EUROPÄISCHEN NORMUNG

In der Vergangenheit wurden die zulässigen Beanspruchungen für Verbindungen auf Grundlage von Mittelwerten der Tragfähigkeit aus Kurzzeitversuchen mit mehreren gleichartigen Prüfkörpern bestimmt. Um die Einflüsse aus der Streuung, Lasteinwirkungsdauer und unterschiedlicher Sorgfalt bei der Herstellung von Verbindungen zu berücksichtigen, wurden die mittleren Tragfähigkeiten durch einen Sicherheitsbeiwert geteilt. Um zuverlässige charakteristische Werte der Tragfähigkeit zu bestimmen sind die Ergebnisse aus oben genannten Versuchen nicht ausreichend. Demzufolge wurden theoretische Modelle entwickelt. Als Grundlage für die Berechnung der Tragfähigkeiten von auf Abscheren beanspruchten Verbindungen in der aktuellen Europäischen Normung dient ein Tragmodell, welches vom Dänen K. W. Johansen im Jahr 1949 [2] vorgestellt wurde [4].

Dieses Tragmodell ist auch im amerikanischen Raum bekannt und wird dort als European Yield Model (EYM) bezeichnet.

### 2-2.1 ALLGEMEINES ZU DEM TRAGMODELL NACH JOHANSEN

Das Tragmodell von Johansen basiert auf der Annahme eines ideal-plastischen Materialverhaltens der eingesetzten Verbindungsmittel unter Biegebeanspruchung sowie von dem umliegenden Holz unter Lochleibungsdruck. Das bedeutet, dass alle elastischen Verformungen des Holzes und des Verbindungsmittels vernachlässigt werden. Durch diese Annahme wird die Berechnung erheblich vereinfacht [8].



*Abbildung 2.6: a) tatsächliche und b) vereinfachte Last-Verformungs-Beziehung von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Holz bzw. Holzwerkstoffen [9]*

Die Tragfähigkeit einer Verbindung ist nach dem Modell von Johansen von der Geometrie der Verbindung, der Biegetragfähigkeit des Verbindungsmittels und der Lochleibungsfestigkeit des Holzes abhängig [10]. Diese erwähnten Parameter werden später näher beschrieben.

Ein überraschendes Faktum betreffend dem Modell von Johansen ist, dass er in seinem plastischen Modell eine elastische Spannungsverteilung zur Bestimmung des Biege widerstandes des Verbindungsmittels angenommen hat. Meyer hat in seiner Arbeit „Tragfähigkeit von Nagelverbindungen“ [11] in die Theorie von Johansen die plastische Spannungsverteilung des Verbindungsmittels eingeführt und damit höhere Werte für die Tragfähigkeit ermöglicht. Diese plastische Spannungsverteilung ist auch in den Bemessungsgleichungen der Europäischen Normung zu finden. Demnach sind auch die plastischen Querschnittsreserven des Verbindungsmittels berücksichtigt [10], [12].

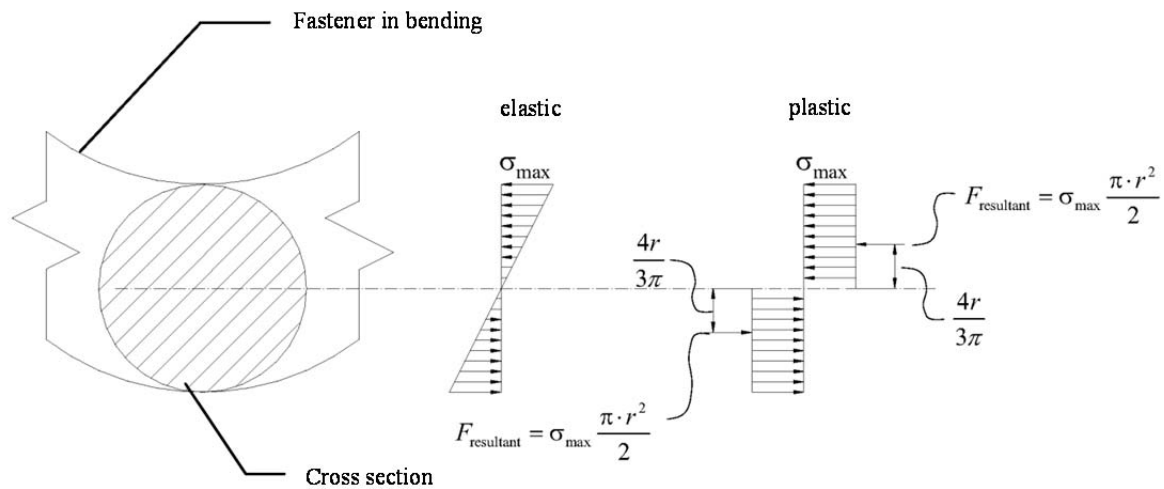


Abbildung 2.7: Elastische und plastische Spannungsverteilung bei einem Verbindungsmittel unter Biebeanspruchung [13]

$$M_{el} = \sigma_{\max} \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad (2.1)$$

$$M_{pl} = \sigma_{\max} \frac{2 \cdot \pi \cdot r^2}{2} \cdot \frac{4 \cdot r}{3 \cdot \pi} = \sigma_{\max} \frac{d^3}{6} \quad (2.2)$$

dabei ist

- $M_{el}$  elastisches Biegemoment in [Nmm]
- $M_{pl}$  plastisches Biegemoment in [Nmm]
- $r$  Verbindungsmittelpadius in [mm]
- $\sigma_{\max}$  maximale Spannung (Randspannung) in [N/mm<sup>2</sup>]
- $d$  Verbindungsmitteldurchmesser in [mm]

Die Gleichungen (2.1) und (2.2) beschreiben die elastische bzw. plastische Momententragfähigkeiten wie in [13] beschrieben. Die Herleitung der Formeln erfolgte gemäß Abbildung 2.7.

Ebenfalls aus oben erwähnten Gleichungen lässt sich ein Verhältnis zwischen elastischem und plastischem Biegemoment ausrechnen:

$$\frac{M_{el}}{M_{pl}} = 0,589 \approx 60\% \quad (2.3)$$

Mit dem Ansatz der plastischen Spannungsverteilung kommt man somit zu einem um fast 60% größeren Biegemoment als es mit dem elastischen Ansatz erreicht werden würde.

Bei der Entwicklung seines Berechnungsmodells hat Johansen jedoch nur Versuche an Verbindungen mit einem einzelnen Verbindungsmittel durchgeführt. Für die Berechnung von Verbindungen mit mehreren Verbindungsmitteln, wird im Eurocode 5 [1] eine effektiv wirksame Anzahl ( $m \cdot n_{ef}$ ) eingesetzt (siehe Abschnitt 2-3.4). Um das Zusammenwirken mehrerer Verbindungsmittel in einer Verbindung sicherzustellen, sollten diese auch die hierfür notwendige Duktilität bereitstellen.

## 2-3 EINFLUSSPARAMETER

Die Tragfähigkeit sowie das Verformungsverhalten von Scherverbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln werden von vielen verschiedenen Parametern beeinflusst. Im Folgenden wird auf einige dieser Einflussparameter näher eingegangen.

### 2-3.1 GEOMETRIE DER VERBINDUNG

Die Geometrie einer Verbindung hat einen maßgebenden Einfluss auf deren Tragfähigkeit. Auch das Verformungsverhalten sowie das Verformungsbild nach dem Versagen einer Verbindung sind von der Wahl des Verbindungsmitteldurchmessers und der Holzdicke abhängig. Dieser Umstand findet sich auch in der entsprechenden Berücksichtigung dieser Parameter im EYM wieder. Das Verhältnis zwischen Holzdicke  $t_1$  und dem Verbindungsmitteldurchmesser  $d$  wird als Schlankheit  $\lambda$  bezeichnet und ermöglicht eine gewisse Bewertung der geometrischen Zusammenhänge.

$$\lambda = \frac{t_1}{d} \quad (2.4)$$

$\lambda$	Schlankheit in [-]
$t_1$	Holzdicke in [mm]
$d$	Verbindungsmitteldurchmesser in [mm]

Grundsätzlich gilt: je größer die Schlankheit, desto ungleichmäßiger ist die Kräfteinleitung. In Abbildung 2.8 a) ist ein starrer Stabdübel (geringe Schlankheit) dargestellt. Der Stabdübel biegt sich nicht und es besteht über die gesamte Länge des Verbindungsmittels Kontakt mit dem Holz [14]. Wenn eine mittlere Schlankheit (siehe Abbildung 2.8 b)) vorhanden ist, beginnt sich der Stabdübel elastisch und später plastisch zu verformen. Dabei entsteht bei einer zweiseitigen Holz-Stahlblech Verbindung ein Fließgelenk in der Symmetrieachse, was wiederum zu Spannungsspitzen in der Mitte des Stabdübels und zur Trennung vom unbelasteten Stabdübelrand vom umgebenden Holz führt; es entsteht ein Spalt. In Verbindungen mit großer Schlankheit (siehe Abbildung 2.8 c)) übersteigt die Tragfähigkeit des Holzes das Momenten-Tragvermögen des Verbindungsmittels womit sich sekundäre Fließgelenke an beiden Seiten der Symmetrieachse bilden. Auf diese Weise wird der größtmögliche Kontaktbereich aktiviert und somit die maximale Tragfähigkeit eines Verbindungsmittels erreicht [15].

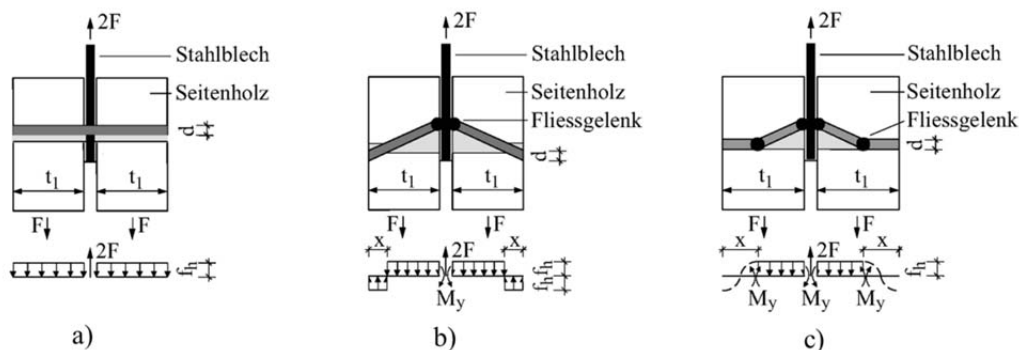
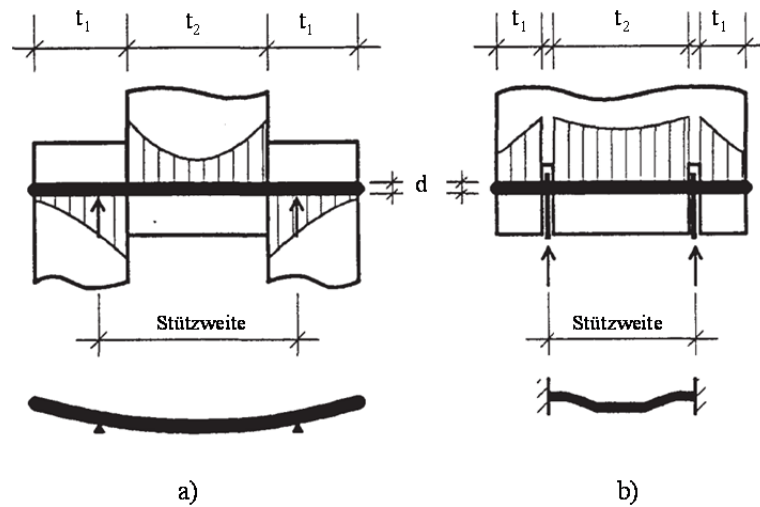


Abbildung 2.8: Versagen bei verschiedenen Schlankheiten: a) kleine Schlankheit, b) mittlere Schlankheit, c) große Schlankheit [16]

Nach Gehri [17] haben bei der Bestimmung der Grenzschlankheiten von Stabdübeln (Grenzwert ab welchem keine wesentliche Steigerung der Tragfähigkeit der Verbindung erzielt werden kann)

unterschiedliche „Lagerungsbedingungen“ einen Einfluss. Besonders ausgeprägt ist dies bei mehrschnittigen Holz-Stahlblech-Verbindungen, da bei diesen eine Durchlaufwirkung des Stabdübels vorliegt [17].

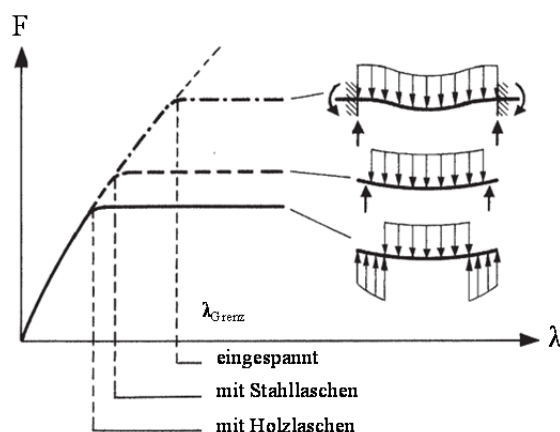


**Abbildung 2.9: Einfluss der Lagerungsbedingungen; unterschiedliche Stützweiten und Beanspruchungen der Stabdübel bei gleicher Schlankheit bei einer: a) Holz-Holz-Verbindung und b) Holz-Stahlblech-Verbindung [14]**

In Abbildung 2.9 sind zwei verschiedene Verbindungen mit gleicher Schlankheit dargestellt. Durch die günstigere Lagerung weist die Holz-Stahlblech-Verbindung geringere Biegeverformungen als die Holz-Holz-Verbindung auf. Da sich daraus gleichmäßigere Lochleibungsdrücke ergeben, ist eine bessere Auslastung des Holzes möglich. Durch die kleinere effektive Stützweite und die Einspannung des Stabdübels ist dieser auch in der Lage höhere Lasten abzutragen [17].

Versuche haben gezeigt, dass bei der Holz-Holz-Verbindung das Biegeversagen des Stabdübels maßgebend war. Bei der Stahl-Holz-Verbindung verformte sich der Stabdübel unter demselben Traglastniveau hingegen nur elastisch [17].

In Abbildung 2.10 ist der Einfluss der Lagerungsbedingungen auf die Grenzschlankheit von Stabdübeln schematisch dargestellt.



**Abbildung 2.10: Einfluss der Lagerungsbedingungen auf die Grenzschlankheit von Stabdübeln [17]**

## Rand- und Zwischenabstände

Sind die Abstände zwischen den Verbindungsmitteln zu klein gewählt, kommt es zu großen lokalen Belastungen im Holz. Besonders ausgeprägt ist dieses Verhalten bei Verbindungen, welche parallel zur Faserrichtung beansprucht werden. Bei solchen Verbindungen spaltet das Holz entlang einer Verbindungsmittelreihe auf (siehe Abbildung 2.11). Um dieses spröde Spaltversagen zu vermeiden, werden Mindestabstände festgelegt. Nach Mischler [11] müssen die End- und Zwischenabstände an den Verbindungsmitteldurchmesser, die Stahlfestigkeit des Verbindungsmittels, die Scher- und Spaltfestigkeit des Holzes sowie die Belastungsart und Belastungsrichtung bezüglich der Holzfaserrichtung angepasst werden.

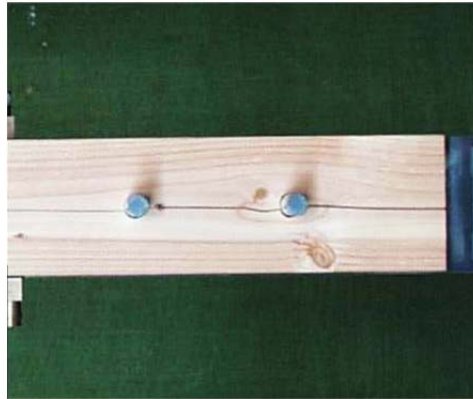
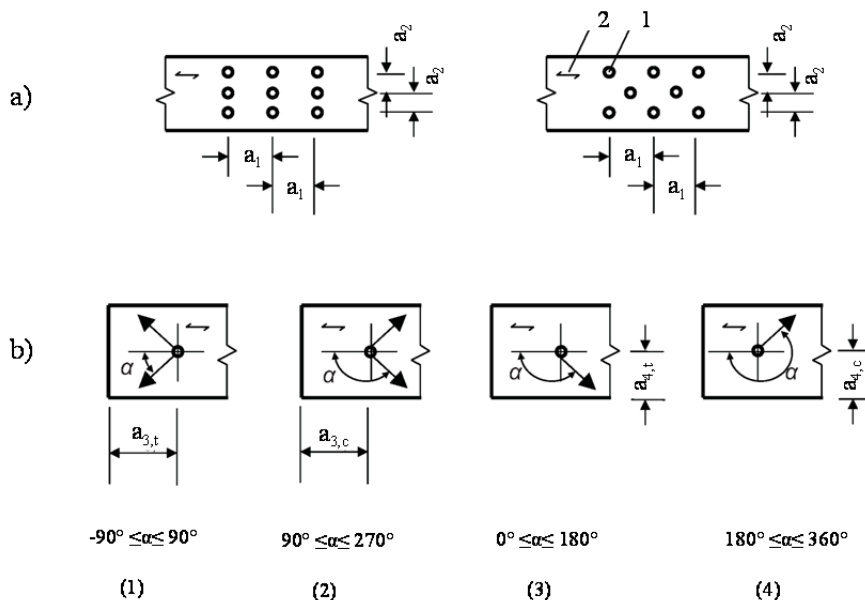


Abbildung 2.11: Spaltversagen eines Prüfkörpers [18]

In Abbildung 2.12 und Tabelle 2.1 sind die nach [1] vorgesehenen Verbindungsmittelabstände in Abhängigkeit vom Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung sowie des Verbindungsmitteldurchmessers dargestellt.



**Legende:**

- (1) beanspruchtes Hirnholzende
- (2) unbeanspruchtes Hirnholzende
- (3) beanspruchter Rand
- (4) unbeanspruchter Rand

- (a) Abstände in Faserrichtung innerhalb einer Reihe und rechtwinklig zur Faserrichtung zwischen den Reihen
- (b) Abstände vom Hirnholzende und vom Rand

- 1 Verbindungsmittel
- 2 Faserrichtung des Holzes

Abbildung 2.12: Definition der Verbindungsmittelabstände nach [1]

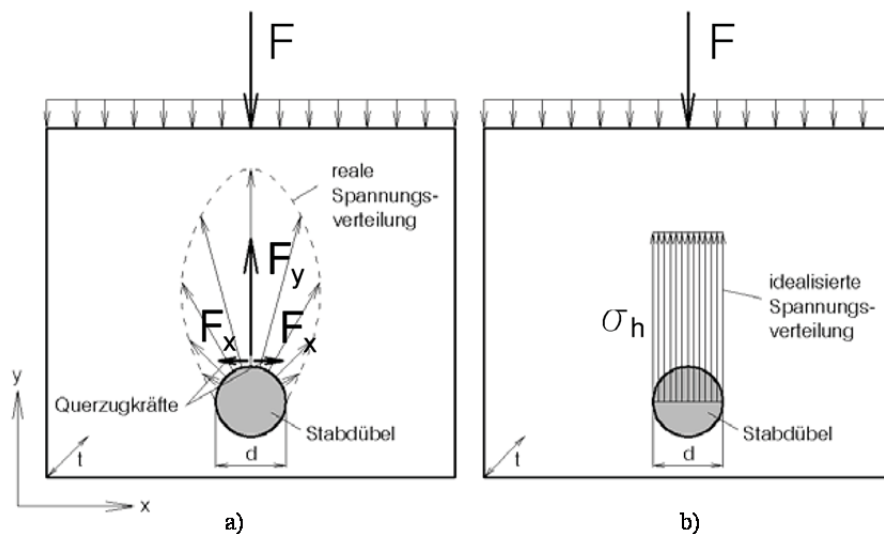


**Tabelle 2.1: Mindestabstände von Stabdübeln nach [1]**

Abstände untereinander sowie von den Hirnholzenden und Rändern	Winkel zur Faserrichtung	Mindestabstände untereinander sowie von den Hirnholzenden und Rändern
$a_1$ (in Faserrichtung)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3 + 2 \cos\alpha ) \cdot d$
$a_2$ (rechtwinklig zur Faserrichtung)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$
$a_{3,t}$ (beanspruchtes Hirnholzende)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max(7d; 80\text{mm})$
$a_{3,c}$ (unbeanspruchtes Hirnholzende)	$90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$	$a_{3,t} \sin\alpha $
	$150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$	$\max(3,5d; 40\text{mm})$
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$a_{3,t} \sin\alpha $
$a_{4,t}$ (beanspruchter Rand)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max((2 + 2 \sin \alpha)d; 3d)$
$a_{4,c}$ (unbeanspruchter Rand)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

## 2-3.2 LOCHLEIBUNGSFESTIGKEIT

Unter der Lochleibungsfestigkeit  $f_h$  [N/mm<sup>2</sup>] versteht man jenen Widerstand, welchen das Holz einer durch ein stiftförmiges Verbindungsmittel aufgebrachtene Kraft entgegensetzt. Bei der Überschreitung der Lochleibungsfestigkeit tritt entweder der Bruch ein oder es wird eine definierte Verformungsgrenze überschritten. Das gegen die Lochwandung gedrückte Verbindungsmittel erzeugt einen dreidimensionalen Spannungszustand. Bei der Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit wird jedoch entlang der Lochtiefe eine konstante Spannungsverteilung angenommen. In Abbildung 2.13 ist die reale und idealisierte Spannungsverteilung im Holz dargestellt [4], [19].



**Abbildung 2.13: a) reale und b) idealisierte Verteilung der Lochleibungsspannung im Holz [19]**

Wie aus Abbildung 2.13 ersichtlich, lassen sich aus der auftretenden Spannung resultierende Kräfte in x- und y-Richtung ableiten. Die resultierenden Kräfte in x-Richtung (Querzugkräfte) verursachen ein Aufspalten des Holzes sobald die Querzugfestigkeit überschritten wird. Um ein frühzeitiges Aufspalten zu verhindern, müssen die entsprechenden Mindestabstände eingehalten werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, verschiedene Querzugsicherungen (z. B. Vollgewindeschrauben) zur Vermeidung des Aufspaltens einzusetzen. [19].

Die reale Spannungsverteilung kann, wie in der Abbildung 2.13 dargestellt, durch eine idealisierte bzw. „verschmierte“ Spannungsverteilung über die projizierte Fläche des Stabdübels angenähert werden [19].

$$\sigma = \frac{F_y}{d \cdot t} \quad (2.5)$$

$\sigma$	idealisierte Lochleibungsspannung in [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_y$	vertikal einwirkende Kraft in [N]
$d$	Durchmesser des Verbindungsmittels in [mm]
$t$	Lochtiefe in [mm]

Die Lochleibungsfestigkeit wird von mehreren Parametern beeinflusst. Nach [8] können zwei wesentliche Gruppen unterschieden werden:

- Parameter mit „direktem Einfluss“; z. B: Rohdichte, Verbindungsmitteldurchmesser, Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung, Oberflächenbeschaffenheit des Verbindungsmittels, etc.
- Parameter mit „indirektem Einfluss“, z. B: Prüfmethode, Prüfkonfiguration, Ermittlung der Rohdichte bei der Auswertung, etc.

Im Weiteren wird auf die Faktoren mit „direktem Einfluss“ näher eingegangen.

### 2-3.2.1 Rohdichte des Holzes

Nach [19] hat die Rohdichte den größten Einfluss bei der Berechnung der Lochleibungsfestigkeit. Wie aus Abbildung 2.14 ersichtlich, steigt die Lochleibungsfestigkeit bei Nadelholz und Laubholz unabhängig von der Holzart etwa linear mit der Rohdichte [19].

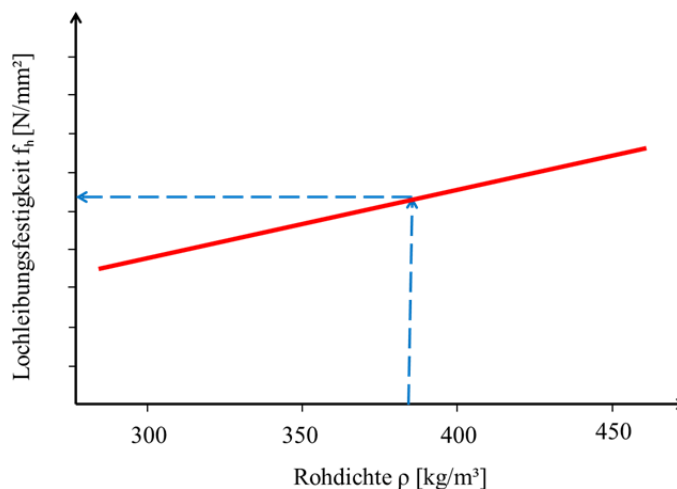
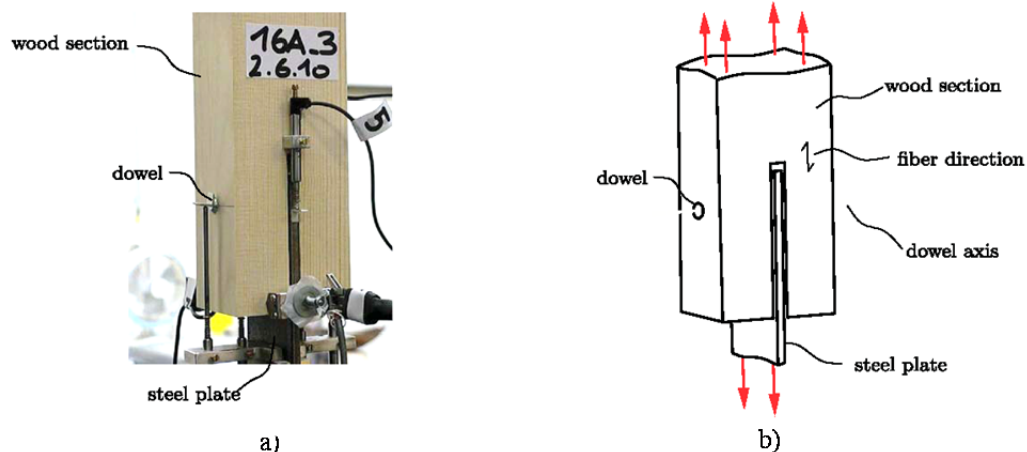


Abbildung 2.14: Lochleibungsfestigkeit  $f_h$  abhängig von der Rohdichte  $\rho$ , qualitativ [19]

Es muss ebenfalls darauf hingewiesen werden, dass die Rohdichte auch einen Einfluss auf das Verformungsverhalten und den Versagensmechanismus hat. Diesbezüglich finden sich in [15]

interessante Fakten, welche wiederum auf Ergebnissen aus 64 Prüfungen basieren. Im Rahmen dieser Prüfungen wurden die Holzdicken variiert. Das Ziel der Prüfungen waren die Einflüsse der Holzdicke, die Schlankheit der Verbindung, die Oberflächenbeschaffenheit des Verbindungsmittels sowie die End- und Zwischenabstände auf das Verhalten der Verbindung näher zu untersuchen. Die untenstehende Abbildung 2.15 zeigt einen der verwendeten Probekörper. Es handelt sich um eine zweischnittige Holz-Stahlblech-Verbindung (8 mm Stahlblech S 355; Fichte) mit einem einzelnen Stabdübel (Durchmesser 12 mm). Die Probekörper hatten im Durchschnitt eine Rohdichte von  $430 \text{ kg/m}^3$ , bzw. eine minimale Rohdichte von  $360 \text{ kg/m}^3$  und eine maximale Rohdichte von  $513 \text{ kg/m}^3$ .



**Abbildung 2.15: typische Holz-Stahlblech-Verbindung mit einem Stabdübel; a) Foto des Prüfkörpers und b) Skizze [15]**

Die Probekörper mit kleineren Holzdichten neigten zu höheren Verschiebungen beim Versagen und zeigten einen längeren Fließbereich; als Versagensmechanismus wurde langsames Aufspalten dokumentiert. Bei größeren Rohdichten war der Fließbereich merklich kleiner. Ihr Versagen erfolgte durch einen plötzlichen Sprödbbruch in der Symmetrieachse. Die verschiedenen Versagenseigenschaften von Holz mit kleinerer und größerer Rohdichte ergeben sich aus dem Einfluss der Rohdichte auf das Verhalten von Holz unter hohen Druckbeanspruchungen. Die Stauchung ist bei Holz mit einer kleineren Dichte größer. Holz mit größerer Dichte kann hingegen nicht auf die gleiche Weise gestaucht werden [15].

### 2-3.2.2 Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung

Mit steigendem Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung kommt es zum Abfallen der Lochleibungsfestigkeit (siehe Abbildung 2.16). Dieser Einfluss ist bei größeren Durchmessern stärker ausgeprägt als bei kleineren. Nach enBR [20] kann dieser Einfluss bei Durchmessern von  $d \leq 8 \text{ mm}$  jedoch vernachlässigt werden. Das Verhältnis zwischen den Festigkeiten in Faserrichtung  $f_{h,o}$  und rechtwinklig zur Faserrichtung  $f_{h,90}$  wird durch den Faktor  $k_{90}$  beschrieben. Die Ermittlung dieses Faktors erfolgt basierend auf den unten stehenden Gleichungen. In Kombination mit der Hankinson'schen Gleichung wird dieser Parameter zur Berechnung der Lochleibungsfestigkeit für beliebige Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung eingesetzt (siehe Gleichung (2.6)) [4], [1]:

$$f_{h,a,k} = \frac{f_{h,o,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (2.6)$$

mit

$$k_{90} = \frac{f_{h,o,k}}{f_{h,90,k}}$$

und

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \rho_k$$

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015 \cdot d & \text{für Nadelhölzer} \\ 1,30 + 0,015 \cdot d & \text{für Furnierschichtholz} \\ 0,90 + 0,015 \cdot d & \text{für Laubhölzer} \end{cases}$$

- $f_{h, \alpha, k}$  charakteristische Lochleibungsfestigkeit unter einem Winkel  $\alpha$  in  $[\text{N}/\text{mm}^2]$
- $f_{h, 0, k}$  charakteristische Lochleibungsfestigkeit parallel zur Faser in  $[\text{N}/\text{mm}^2]$
- $f_{h, 90, k}$  charakteristische Lochleibungsfestigkeit senkrecht zur Faser in  $[\text{N}/\text{mm}^2]$
- $\alpha$  Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung in  $[\text{°}]$
- $d$  Verbindungsmitteldurchmesser in  $[\text{mm}]$
- $k_{90}$  Verhältnis zwischen der Lochleibungsfestigkeit parallel zur Faser  $f_{h,0}$  und der Lochleibungsfestigkeit senkrecht zur Faser  $f_{h,90}$

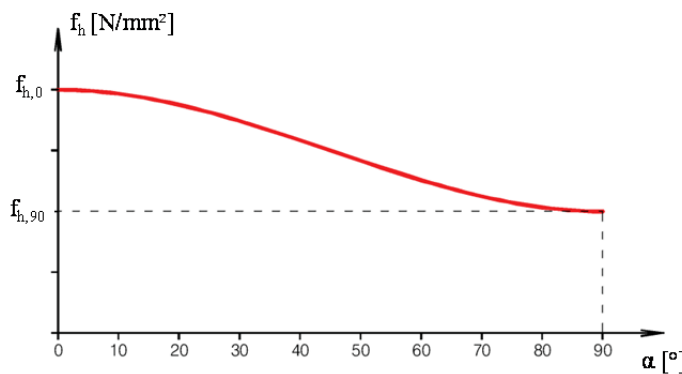


Abbildung 2.16: Verlauf der Hankinson-Funktion, qualitativ [19]

Spörk hat in seiner Diplomarbeit [19] 140 Prüfungen mit der Holzart Fichte durchgeführt, um die Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit vom Winkel  $\alpha$  zwischen Kraft- und Faserrichtung zu untersuchen. Dabei hat er Kraft-Faser-Winkel zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  in  $10^\circ$ -Schritten variiert. In Abbildung 2.17 sind die Prüfergebnisse dargestellt. Daraus lässt sich eindeutig der Abfall der Lochleibungsfestigkeit mit zunehmendem Winkel erkennen. Es ist auch erkennbar, dass der Kurvenverlauf der Hankinson-Funktion mit den Mittelwerten der Prüfergebnisse nicht übereinstimmt. In Tabelle 2.2 sind die Abweichungen für jeden geprüften Winkel dargestellt [19].

Tabelle 2.2: Abweichung des Mittelwertes der Lochleibungsfestigkeiten jeder Serie zum Verlauf der Hankinson-Funktion [19]

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Abweichung des Mittelwertes zum Hankinsonverlauf in %	0,20	1,30	-6,23	-11,61	-9,37	-6,66	-7,96	-6,05	3,26	-0,29

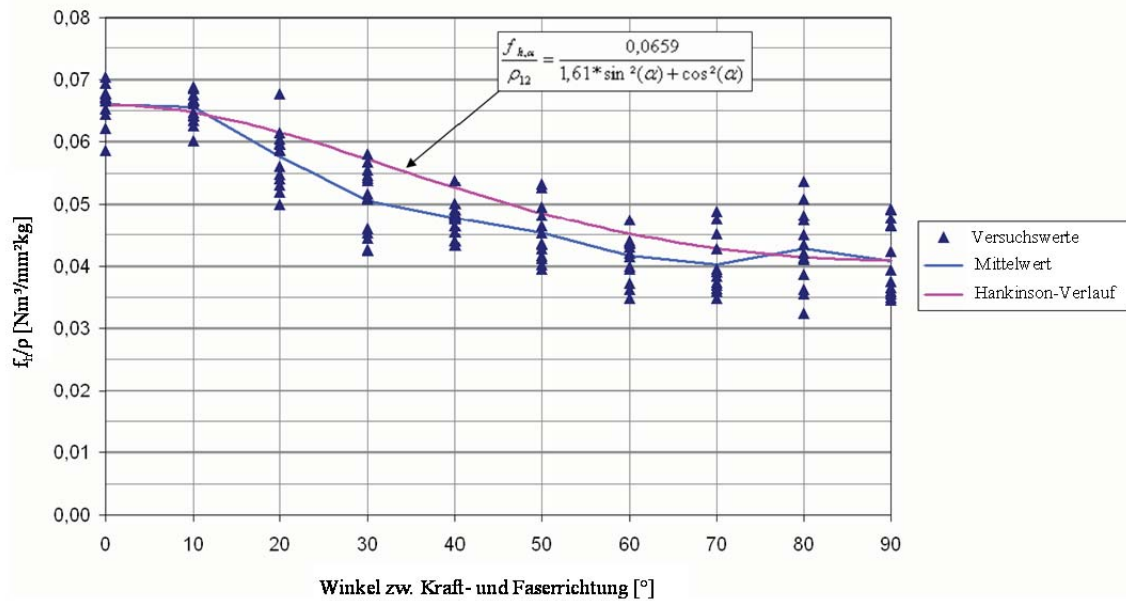


Abbildung 2.17: Abhängigkeit der mittleren bezogenen Lochleibungsfestigkeit vom Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung, Verlauf der Hankinson-Funktion [19]

Um die mittleren auf die Rohdichte bezogenen Lochleibungsfestigkeiten seiner Prüfungen besser beschreiben zu können, hat Spörk die in Gleichung (2.7) wiedergegebene empirische Formel entwickelt.

$$\frac{f_{h,\alpha}}{\rho_{12}} = \frac{X_0}{(1 - k_{90}) \cdot [\cos(\alpha)]^{X_h} + k_{90}} \quad (2.7)$$

dabei ist

- $f_{h,\alpha}$  Lochleibungsfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>]
- $\rho_{12}$  Rohdichte bei 12% Holzfeuchte in [kg/m<sup>3</sup>]
- $\alpha$  Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung in [°]
- $k_{90}$  Verhältnis  $f_{h,0}$  zu  $f_{h,90}$
- $X_0$  Steigung der Regressionsgeraden für Krafrichtung parallel zur Faserrichtung
- $X_h$  Hochzahl abhängig von der Art der Rohdichtermittlung

Bezogen auf die Prüfergebnisse von Spörk [19], sieht der Ansatz (für Mittelwerte) wie folgt aus:

$$\frac{f_{h,\alpha,m}}{\rho_{12,m}} = \frac{0,0659}{(1 - 1,61) \cdot [\cos(\alpha)]^{3,64} + 1,61} \quad (2.8)$$

Die Abweichungen zwischen dieser Funktion und den Mittelwerten aus den Prüfungen betragen weniger als 5 % (siehe Tabelle 2.3 und Abbildung 2.18).

Tabelle 2.3: Abweichung des Mittelwertes der Lochleibungsfestigkeit jeder Serie zur Ausgleichskurve [19]

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Abweichung des Mittelwertes zur Ausgleichskurve in %	0,20	2,72	-1,77	-4,39	-0,37	2,12	-1,50	-2,47	4,38	-0,29

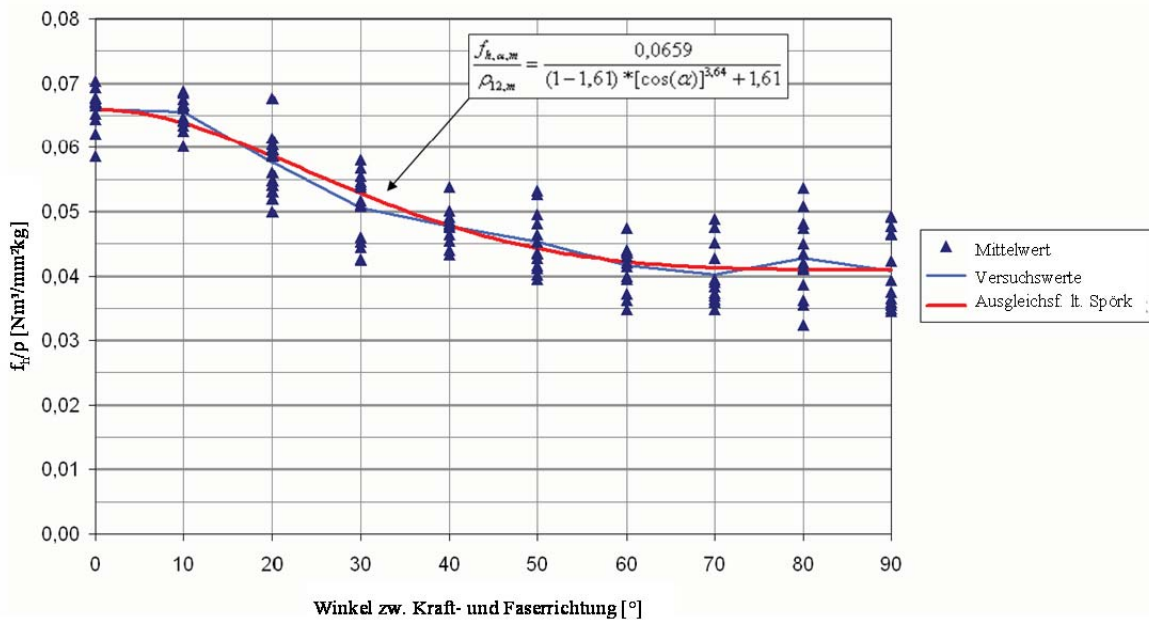


Abbildung 2.18: Abhängigkeit der mittleren bezogenen Lochleibungsfestigkeit vom Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung [19]

In [8] findet man einen anderen Zusammenhang zwischen der Lochleibungsfestigkeit und dem Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung. Dieser Zusammenhang ist das Ergebnis aus 306 Lochleibungsprüfungen mit der Holzart Fichte und galvanisch verzinkten Stabdübeln mit einem Durchmesser von  $d=12$  mm. Gleichung (2.9) zeigt den vorgeschlagenen, empirisch ermittelten, Zusammenhang zwischen der Lochleibungsfestigkeit und dem Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung:

$$\frac{f_{h,\alpha}}{\rho_{12}} = \frac{0,1 \cdot d^{-0,15}}{(1 - k_{90}) \cdot \cos(\alpha)^4 + k_{90}} \quad (2.9)$$

mit  $k_{90} = d^{0,17}$

### 2-3.2.3 Verbindungsmitteldurchmesser

Aus Lochleibungsprüfungen mit verschiedenen Verbindungsmitteldurchmessern ist ersichtlich, dass mit zunehmendem Verbindungsmitteldurchmesser die Lochleibungsfestigkeit sinkt (siehe Abbildung 2.19). Dies kann mit dem „Volumeneffekt“ bzw. „Größeneffekt“ begründet werden. Um das Verhältnis zwischen der Lochleibungsfestigkeit und dem Verbindungsmitteldurchmesser besser darstellen zu können, wird die Lochleibungsfestigkeit  $f_h$  und die Rohdichte  $\rho$  häufig ins Verhältnis gesetzt. Dieses Verhältnis wird als bezogene Lochleibungsfestigkeit bezeichnet [19].

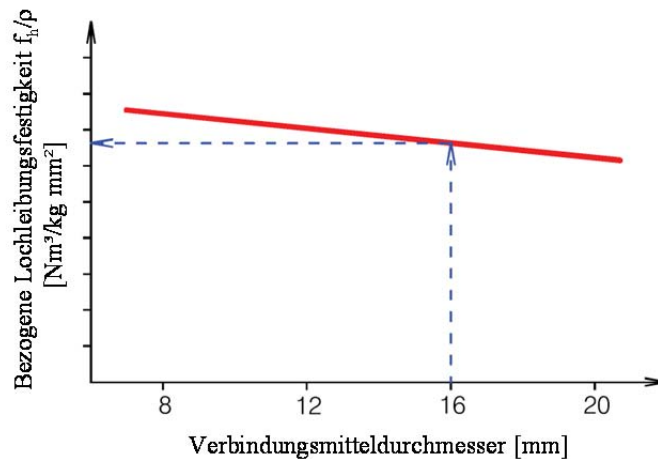


Abbildung 2.19: Bezogene Lochleibungsfestigkeit abhängig vom Verbindungsmitteldurchmesser, qualitativ [19]

Auch Hübner hat in seiner Dissertation [3] die schon erwähnte Abnahme der Lochleibungsfestigkeit mit größer werdendem Verbindungsmitteldurchmesser festgestellt. In Abbildung 2.20 sind bezüglich der Rohdichte und Holzfeuchte korrigierte Mittelwerte der Lochleibungsfestigkeit von Eschen-, Robinien- und Buchenholz in Abhängigkeit vom Durchmesser des eingesetzten Verbindungsmittels dargestellt; dabei lässt sich ein nichtlinearer Zusammenhang erkennen.

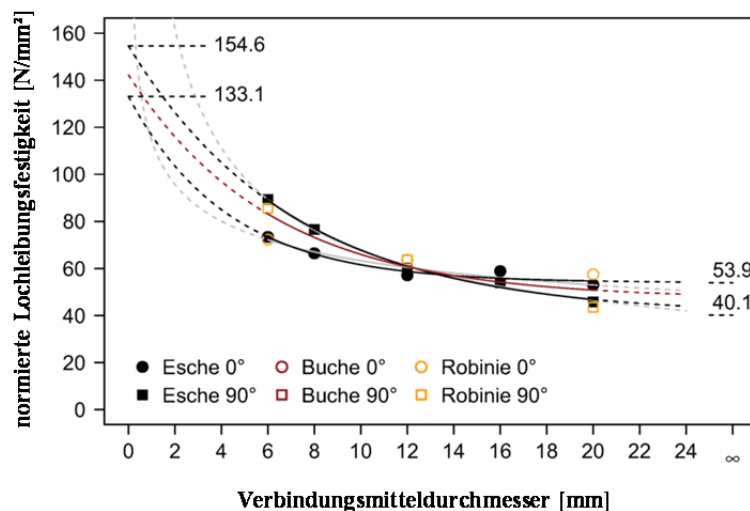


Abbildung 2.20: Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit vom Durchmesser [3]

Bezüglich derselben Thematik werden in [8] Prüfungen mit Stabdübeldurchmessern von  $d = 8, 12$  und  $20$  mm in Fichtenholz diskutiert. Wie erwartet, zeigen die Ergebnisse eine Abnahme der bezogenen Lochleibungsfestigkeit mit zunehmendem Stabdübeldurchmesser. Da sich jedoch auch hier kein linearer Zusammenhang feststellen lässt, wurden die folgenden Potenzfunktionen zur Beschreibung der Abhängigkeit zwischen der bezogenen Lochleibungsfestigkeit und dem Stabdübeldurchmesser vorgeschlagen [8].

Kraft parallel zur Faserrichtung:

$$\frac{f_{h,0}}{\rho_{12}} = 0,1 \cdot d^{-0,15} \quad (2.10)$$

bzw.

$$f_{h,0} = 0,1 \cdot d^{-0,15} \cdot \rho_{12} \quad (2.11)$$

Kraft senkrecht zur Faserrichtung:

$$\frac{f_{h,90}}{\rho_{12}} = 0,1 \cdot d^{-0,32} \quad (2.12)$$

bzw.

$$f_{h,90} = 0,1 \cdot d^{-0,32} \cdot \rho_{12} \quad (2.13)$$

$f_{h,0}$  Lochleibungsfestigkeit parallel zur Faserrichtung in [N/mm<sup>2</sup>]

$f_{h,90}$  Lochleibungsfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung in [N/mm<sup>2</sup>]

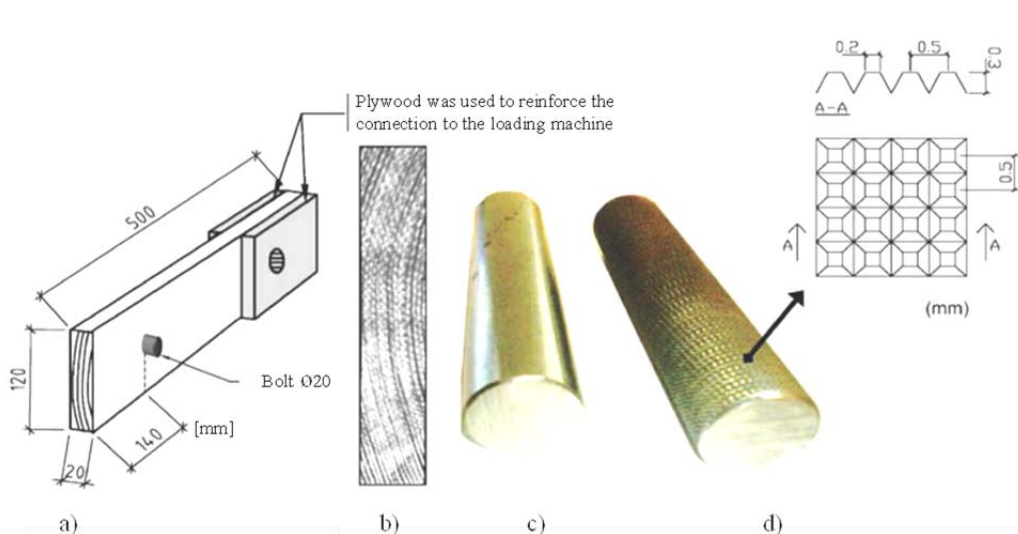
$\rho_{12}$  auf 12% Holzfeuchte bezogene Rohdichte in [kg/m<sup>3</sup>]

$d$  Durchmesser des Stabdübels in [mm]

### 2-3.2.4 Oberflächenbeschaffenheit des Verbindungsmittels

Die Oberflächenbeschaffenheit eines Verbindungsmittels beeinflusst die Art der Holzstauchung sowie die seitliche Verdrängung des Holzes bei einer Beanspruchung in Faserrichtung. Das Holz unter einem Verbindungsmittel wird nämlich nicht über seine gesamte projizierte Breite eingedrückt, sondern in Abhängigkeit vom Reibungskoeffizienten zwischen Verbindungsmittel und Bohrlochwandung. Dementsprechend gilt: je größer die Reibung, desto größer ist die eingedrückte Breite in Faserrichtung. Folglich ergeben sich für Verbindungsmittel mit einer rauen Oberfläche auch höhere Lochleibungsfestigkeiten [19].

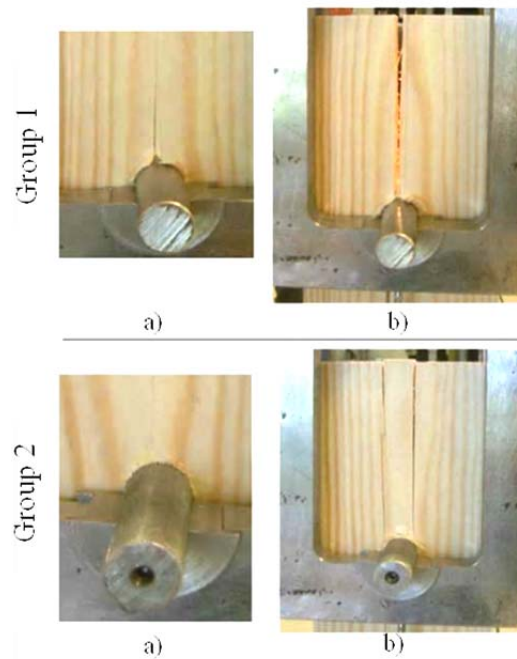
Serrano, Sjödin und Enquist [20] haben den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit des Verbindungsmittels auf Lochleibungsfestigkeit genauer untersucht. Im Rahmen einer prüftechnischen Untersuchung wurden vier Proben mit einem glatten und vier mit einem rauen Stabdübel (siehe Abbildung 2.21) betrachtet.



**Abbildung 2.21: a) Geometrie der Verbindung, b) Ansicht des Hirnholzes des Prüfkörpers mit Jahrringverlauf, c) Stabdübel der Gruppe 1 mit einer glatten Oberfläche, d) Stabdübel der Gruppe 2 mit einer rauen Oberfläche und deren Struktur [21]**



Neben höheren Lochleibungsfestigkeiten für Stabdübel mit einer rauen Oberfläche zeigten die Ergebnisse auch wesentliche Unterschiede bei den Bruchbildern der beiden untersuchten Gruppen [21]. Während sich bei Stabdübeln mit einer glatten Oberfläche jeweils nur ein Riss in Faserrichtung ausbildete, wurden bei den Prüfungen der Gruppe 2 zwei parallel verlaufende Risse dokumentiert. Im Folgenden werden die wesentlichen Zusammenhänge etwas näher beschrieben.



**Abbildung 2.22: typische Bruchbilder beider Gruppen 1 und 2, a) Aufnahme vor dem Bruch, b) Bruchbild [21]**

In Bereichen mit einem großen Reibungseinfluss, wird das Holz eingedrückt und in Bereichen mit geringeren Reibungskräften kommt es zur Verdrängung des Holzes; genau im Übergangsbereich bilden sich Risse. Der Abstand zwischen den sich bildenden Rissen ist somit direkt von der Reibung zwischen Stabdübel und Holz abhängig. Bei Stabdübeln mit glatter Oberfläche ist nur eine geringe Reibung vorhanden, weswegen es zur Rissbildung in der Mittelachse und einem Aufspalten der Prüfkörper kommt (siehe Abbildung 2.22, Group 1). Da bei den Stabdübeln der Gruppe 2 die Oberfläche rau ist, kommt es hier an zwei Stellen zur Rissbildung und der Prüfkörper versagt durch Blockscheren (siehe Abbildung 2.22, Group 2) [21], [13].

In Abbildung 2.23 sind die Kraftverläufe für das beschriebene Bruchverhalten bei Stabdübeln mit glatten und rauen Oberflächen, ersichtlich.

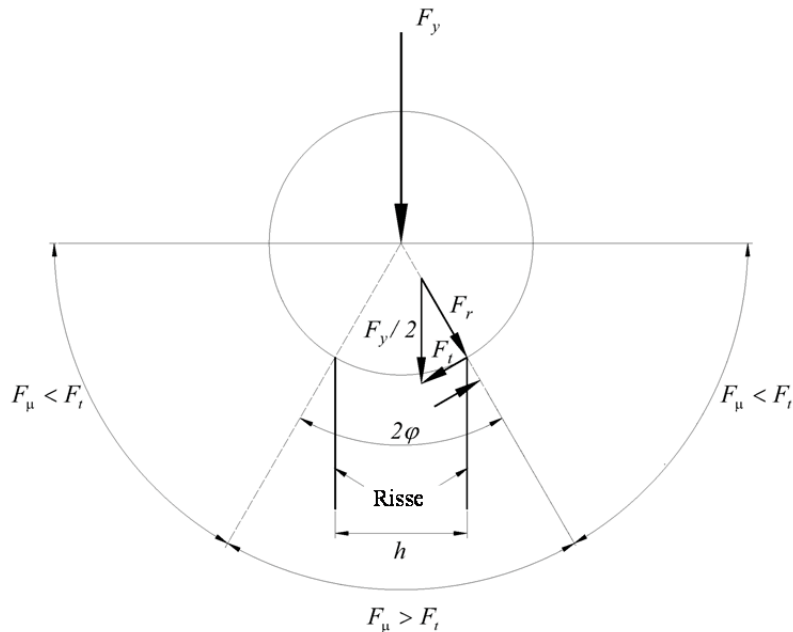


Abbildung 2.23: Rissstellen nach Jorissen (1998), Rissbildung wenn  $F_\mu = F_t$  [13]

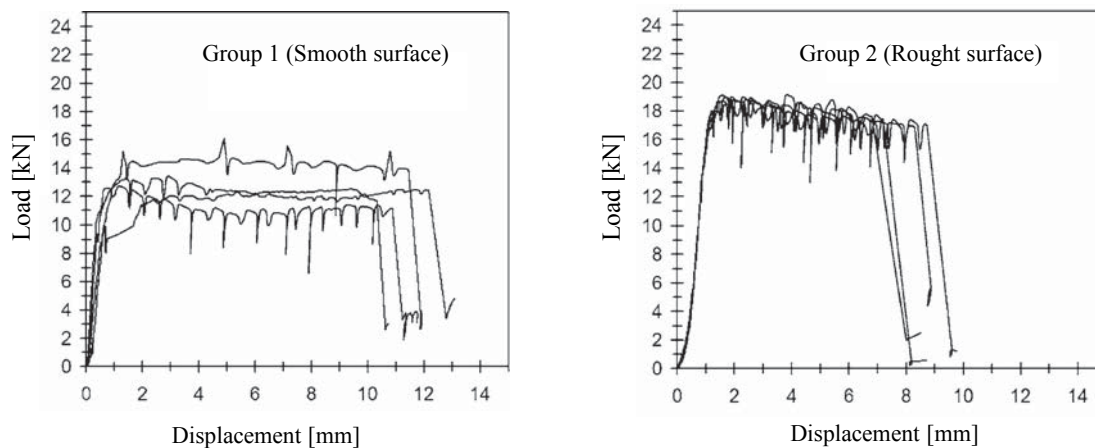


Abbildung 2.24: Kraft- Weg- Diagramme der [21] untersuchten Verbindungen

Aus Abbildung 2.24 ist ersichtlich, dass sich alle Stabdübel duktil verhalten. Ein Unterschied ergibt sich bei den Tragfähigkeiten, welche bei Stabdübeln mit rauher Oberfläche höher sind. Darüber hinaus lässt sich eine größere Bruchverformung bei glatter Stabdübeloberfläche erkennen.

Schmid hat in seiner Dissertation [22] ebenfalls den Einfluss der Reibung zwischen der Bohrlochwandung des Probekörpers und dem stiftförmigen Verbindungsmittel auf die Spannungsverteilung untersucht. Bei seinen Finite-Elemente-Simulationen hat er den Reibungsbeiwert variiert.

Abbildung 2.25 zeigt den Querspannungsverlauf im Nahbereich eines Stabdübels bei einem Reibungsbeiwert von  $\mu = 0$  und  $\mu = 0,339$ . Es lässt sich eine gleichmäßigere Spannungsverteilung bei dem Probekörper mit größerem Reibungsbeiwert erkennen [22]. Mit den Simulationen von Schmid lässt sich auch die oben erwähnte Rissbildung übersichtlich darstellen und erklären.

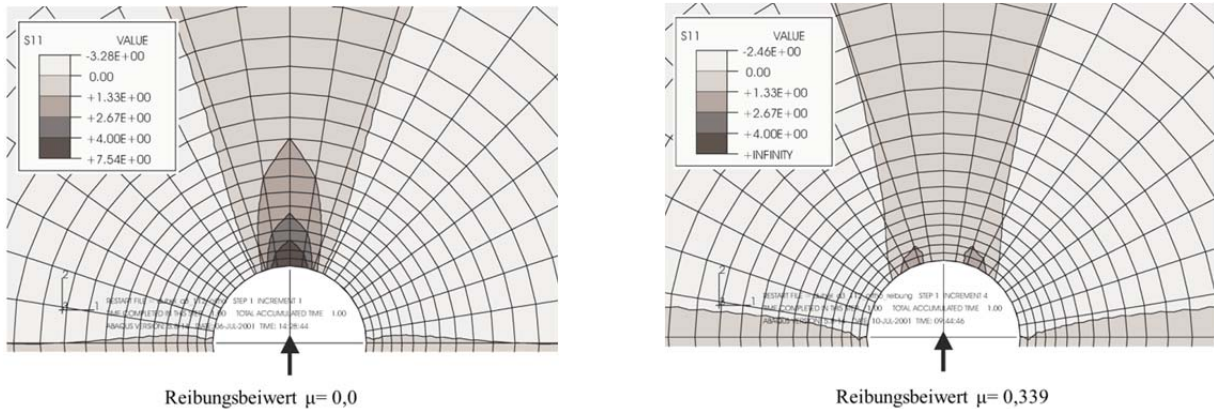


Abbildung 2.25: Querzugspannungen im Nahbereich eines Stabdübels [22]

### 2-3.2.5 Holzfeuchte

Die Holzfeuchte ist ein weiterer wichtiger Einflussparameter für die Lochleibungsfestigkeit. Mit zunehmender Holzfeuchte kommt es zum Absinken der Lochleibungsfestigkeit [23]. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 2.26, basierend auf in [3] veröffentlichten Daten zu Prüfungen an Probekörpern aus Esche, dargestellt. Wie aus den Ergebnissen ebenfalls zu sehen ist, ergibt sich neben dem Abfall der Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit von der Holzfeuchte auch ein Unterschied, ob es sich um eine Belastung parallel oder quer zur Faserrichtung handelt. Demzufolge verringert sich die Lochleibungsfestigkeit bei einer Holzfeuchte von 12 % je Prozent Holzfeuchtezunahme parallel zur Faserrichtung um 4,02 % bzw. um 2,98 % quer zur Faserrichtung.

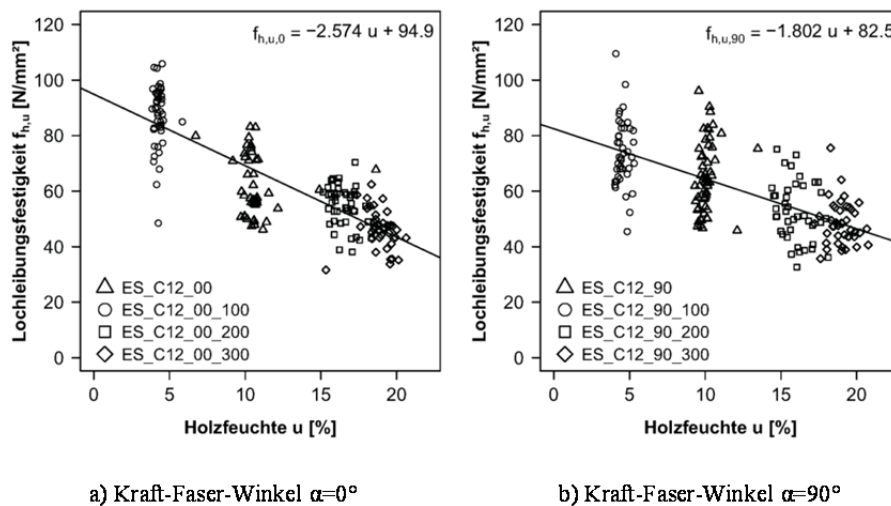
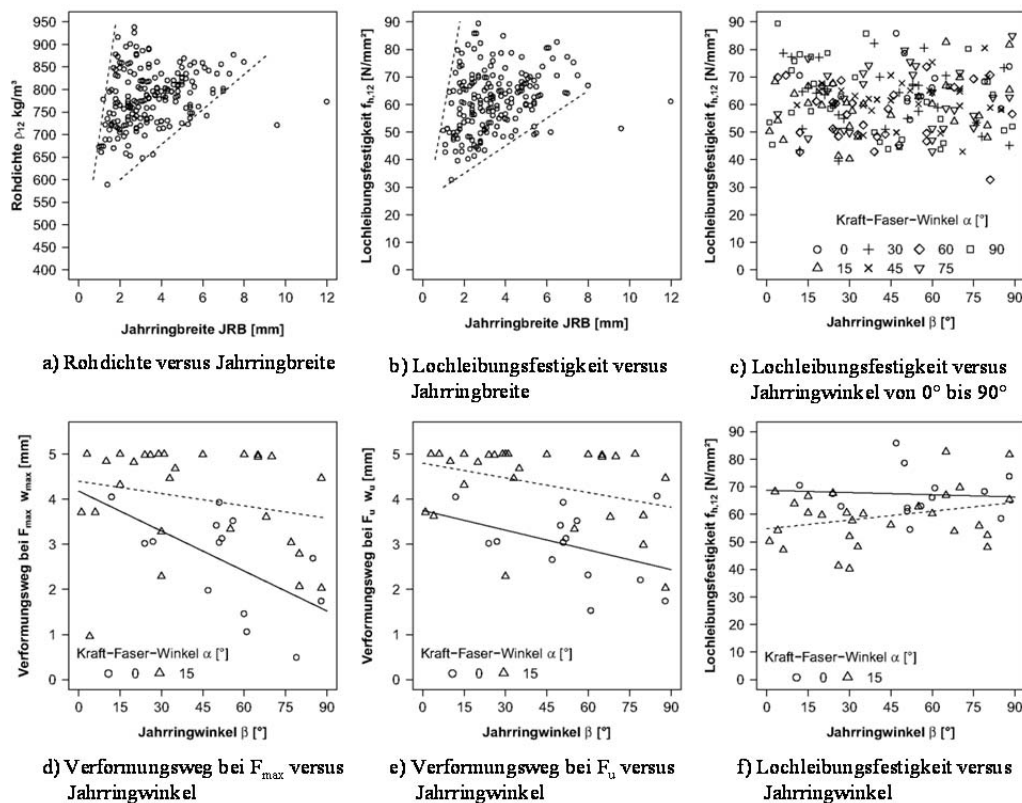


Abbildung 2.26: Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit von der Holzfeuchte bei Eschenholz (Stabdübeldurchmesser 12 mm) [3]

### 2-3.2.6 Neigung der Jahrringe und Jahrringbreite

Mit dem Ziel herauszufinden, welchen Einfluss die Neigung der Jahrringe auf die Lochleibungsfestigkeit hat, bestimmte Hübner in seiner Dissertation [3] an 194 Darrproben aus Eschenholz die Neigung der Jahrringe und die Jahrringbreite. Als Ergebnis erhielt er mehrere Streudiagramme (siehe Abbildung 2.27) [3].



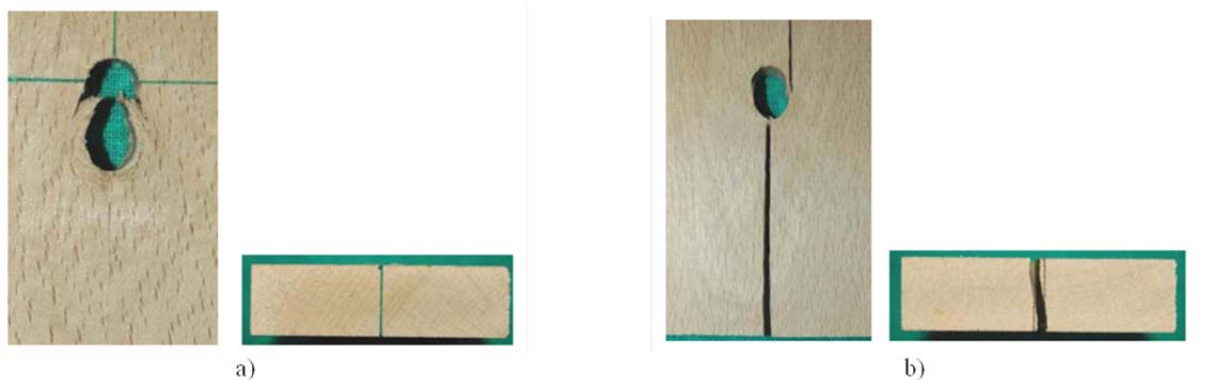
**Abbildung 2.27: Streudiagramme zum Einfluss der Jahrringe auf die Lochleibungsfestigkeit und die Verformungswege von Eschenholz bei Stabdübeln mit 12 mm Durchmesser [3]**

In Abbildung 2.27 (a) ist erkennbar, dass die Jahrringbreite mit zunehmender Rohdichte des Eschenholzes steigt. Gleichzeitig kommt es zur Zunahme der Streubreite. Ein ähnliches Verhalten ist zwischen Lochleibungsfestigkeit und Jahrringbreite ersichtlich (siehe Abbildung 2.27 (b)). Bezüglich der Abhängigkeit zwischen der Neigung der Jahrringtangente und der Lochleibungsfestigkeit sind die Ergebnisse, unabhängig vom Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung, relativ gleichmäßig verteilt (siehe Abbildung 2.27 (c)). In Abbildung 2.27 (d) ist zu erkennen, dass der Verformungsweg bei  $F_{\max}$  bei parallel zur Faserrichtung beanspruchtem Eschenholz mit zunehmendem Jahrringwinkel sinkt. Ein ähnliches Verhalten ist auch beim Verformungsweg von  $F_u$  zu erkennen (siehe Abbildung 2.27 (e)). Es kann auch davon ausgegangen werden, dass bei steigendem Jahrringwinkel die Lochleibungsfestigkeit nicht signifikant sinkt (siehe Abbildung 2.27 (f)). Grundsätzlich lässt sich der Einfluss der Jahrringbreite und der Jahrringtangente auf die Lochleibungsfestigkeit für Eschenholz jedoch vernachlässigen [3].

Die in [24] beschriebenen Lochleibungsprüfungen zeigen, dass verschiedenen Holzarten unterschiedliche Duktilitätskenngrößen zur Folge haben. Diese Unterschiede können durch die variierende Holzstruktur erklärt werden. Von allen verwendeten Holzarten (siehe Tabelle 2.4) zeigten die Prüfungen an Probekörpern aus Buche die höchste Duktilität. Einige erreichten sogar Verschiebungen von 15 mm ohne aufzuspalten. In Abbildung 2.28 sind zwei Probekörper mit verschiedenen Jahrringneigungen zu finden. Wie zu sehen ist, kam es beim Probekörper mit einer Jahrringneigung von 45° zu keinem Spaltversagen. Der Probekörper mit einer Jahrringneigung von 0° spaltete hingegen durchgehend auf. Als Erklärung für dieses Verhalten, können die bei einer Jahrringneigung von 45° als natürliche Verstärkung wirken Markstrahlen herangezogen werden. Bei einer Jahrringneigung von 0° verlaufen die Jahrringe jedoch rechtwinklig zur Dübelachse womit die Markstrahlen demnach nicht als Verstärkung dienen können [24].

**Tabelle 2.4: Duktilitätskenngrößen in Abhängigkeit der eingesetzten Prüfkörper [24]**

Wood species	Dowel diameter	Steel grade	n	mean ductility	COV [%]	overall mean ductility
Spruce	12	mild	7	8,7	56,6	10,7
		hss	6	16,2	52,6	
	24	mild	5	7,4	25,9	
		hss	5	10,4	36,8	
Beech	12	mild	5	17,7	68,1	25,5
		hss	5	18,0	30,6	
	24	mild	5	31,5	45,6	
		hss	5	34,9	45,6	
Purpleheart	12	mild	5	6,1	48,2	9,9
		hss	7	5,3	51,5	
	24	mild	5	11,2	28,0	
		hss	5	17,1	60,4	
Cumaru Peru	12	mild	7	11,5	15,4	15,2
		hss	7	11,9	26,0	
	24	mild	5	20,4	46,6	
		hss	5	17,1	37,2	
Cumaru Brasil	12	mild	2	3,1	5,7	3,9
		hss	8	4,7	14,4	
Ekki	12	mild	7	9,7	57,3	15,6
		hss	10	11,6	33,3	
	24	mild	5	21,1	24,6	
		hss	5	20,1	34,0	
Ekki wet	12	hss	6	7,8	32,2	11,6
	24		5	15,3	25,1	



**Abbildung 2.28: a) Buche mit 45° Jahrringneigung, b) Buche mit 0° Jahrringneigung [24]**

### 2-3.2.7 Eintreibverfahren des Verbindungsmittels/Lochdurchführung

Der Stabdübel als Verbindungsmittel verlangt einen Formschluss. Falls ein Lochspiel vorliegt, muss eine Sicherung vorgesehen werden. Das Vorhandensein eines Lochspiels wirkt sich ungünstig auf die Verteilung des Lochleibungsdruckes aus und führt zu einer Verminderung der Tragfähigkeit. Nach [17] vermindert ein Lochspiel von 1 mm die Tragfähigkeit um rund 5 % bis 10 %.

Dementgegen beschreibt Werner in [25], dass die Untersuchungen von Koponen [26], mit um bis zu 2 mm größer vorgebohrten Löchern als der Verbindungsmitteldurchmesser, keinen signifikanten Einfluss

auf die Lochleibungsfestigkeit gezeigt haben. Bezüglich Vorbohrungen welche kleiner sind als der Verbindungsmitteldurchmesser sind jedoch nur wenige Untersuchungen durchgeführt worden [25].

Auch die Herstellungsqualität von Bohrlöchern beeinflusst die Lochleibungsfestigkeit. Spörk hat in seiner Diplomarbeit [19] 112 Lochleibungsversuche an der Holzart Kiefer mit einem Stabdübeldurchmesser von 12 mm durchgeführt. Bei 76 Probekörpern waren die Bohrlöcher ausgerissen hergestellt; bei den restlichen Probekörpern waren die Bohrlöcher exakt vorgebohrt. Die Lochleibungsfestigkeit bei den schlecht gebohrten Löchern war um 7,2 % kleiner als bei den exakt gebohrten (siehe Abbildung 2.29) [19].

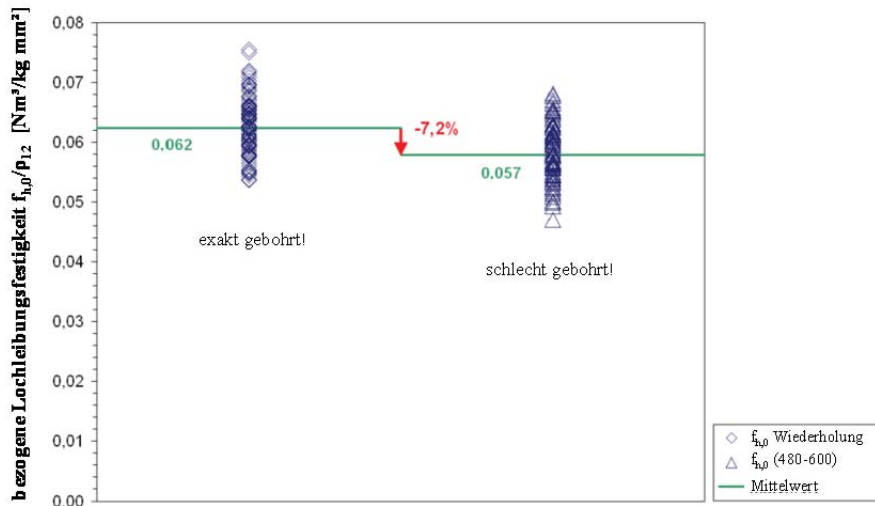


Abbildung 2.29: Vergleich der bezogenen Lochleibungsfestigkeit bei fehlerhaft und exakt gebohrten Stabdübellöchern [19]

Die Prüfergebnisse haben auch gezeigt, dass die schlecht vorgebohrten Löcher nicht nur die Lochleibungsfestigkeit beeinflussen, sondern auch die Verformung beim Erreichen von  $F_{max}$ . Wie in Abbildung 2.30 ersichtlich, waren die Eindrückungen bei schlecht gebohrten Löchern und einer Rohdichte von 480-500 kg/m<sup>3</sup> um 2,82 mm größer als bei der Wiederholungsserie mit exakt gebohrten Löchern [19].

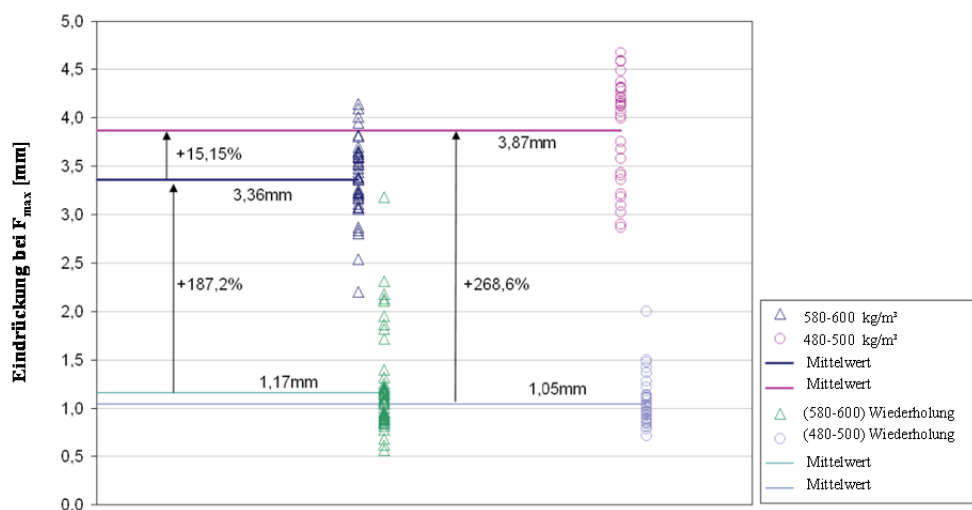


Abbildung 2.30: Vergleich der Eindrückung des Stabdüfels mit fehlerhaften und exakt gebohrten Bohrlöchern bei Erreichen von  $F_{max}$  [19]

### 2-3.3 FLIEßMOMENT

Bei der Bestimmung der Tragfähigkeiten von Verbindungen mit auf Abscheren beanspruchten stiftförmigen Verbindungsmitteln, muss auch der Biege­widerstand des eingesetzten Verbindungsmittels berücksichtigt werden. Dieser Biege­widerstand wird durch das Fließmoment ausgedrückt [25]. Nach [27] kann das Fließmoment eines Verbindungsmittels mit einer 4-Punkt Biegeprüfung ermittelt werden. Das zu prüfende Verbindungsmittel wird dabei wie in Abbildung 2.31 dargestellt belastet. Die Belastungspunkte entlang des Verbindungsmittels dürfen im Verlauf der Prüfung nicht verändert werden und die aufgebrachten Lasten sollen während der Prüfung rechtwinklig zur Verbindungsmittelachse angreifen.

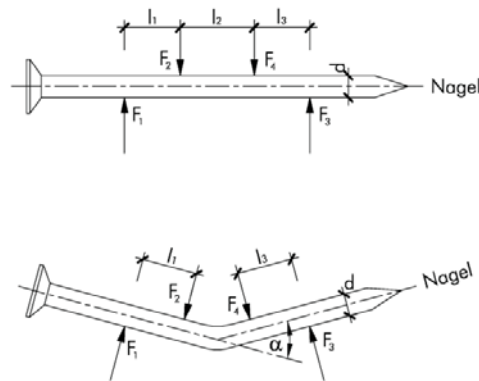


Abbildung 2.31: 4-Punkt Biegeprüfung nach [27]

Nach [10] kommt es bei geringeren Biege­winkeln nur in den äußeren Bereichen des Verbindungsmittels zu plastischen Verformungen, d.h. beim Versagen der Verbindung sind die Fließ­gelenke nicht vollständig ausgebildet womit auch das plastische Potential nicht ausgenutzt wird [10].

Durch die Verwendung der von Blaß in [10] vorgeschlagenen Gleichung (2.14) werden vom Durchmesser abhängige, geringere Biege­winkel implizit berücksichtigt.

$$M_{y,k} = 0,27 f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (2.14)$$

In Gleichung (2.15) ist der Zusammenhang zwischen der charakteristischen Zugfestigkeit des Verbindungsmittels und dem charakteristischen Fließmoment nach ON EN 1995-1-1 [1] gegeben.

$$M_{y,k} = 0,3 f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (2.15)$$

Im Vergleich zur Regelung in der ON EN 1995-1-1 lieferte Gleichung (2.16) (aus der zurückgezogenen Schweizer Norm SIA 265:2003) höhere Werte für das charakteristische Fließmoment.

$$M_{y,k} = 0,26 f_{u,k} \cdot d^{2,7} \quad (2.16)$$

Gleichung (2.15) diente wiederum als Grundlage für die von Blaß, Bienhaus und Krämer in [10] publizierte Gleichung (2.17) für theoretische Biege­winkeln und die daraus hergeleitete Gleichung (2.18) für einen Biege­winkel von 45°.

$$M_{y,k} = 0,27 f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (2.17)$$

$$M_{y,k,45^\circ} = 0,8 f_{u,k} \cdot \frac{d^3}{6} \quad (2.18)$$

$f_{u,k}$  charakteristischer Wert der Zugfestigkeit des Verbindungsmittelwerkstoffs in [N/mm<sup>2</sup>]

$d$  Verbindungsmitteldurchmesser in [mm]

Das in Abbildung 2.32 dargestellte und aus der Dissertation von Hübner [3] stammende Vergleichsdiagramm verdeutlicht noch einmal die hier diskutierten Unterschiede der verschiedenen Modelle zur Ermittlung des Fließmomentes für stiftförmige Verbindungsmittel.

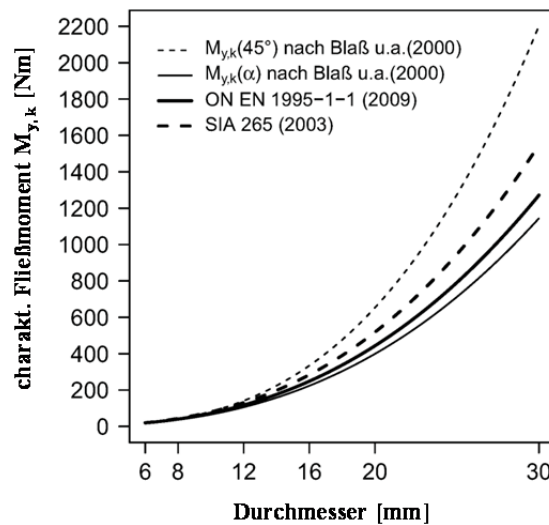


Abbildung 2.32: Vergleich der Fließmomente  $M_{y,k}$  nach ON EN 1995-1-1 (2009), SIA 265 (2003) und Blaß u.a. (2000) bei theoretischen Biege­winkeln, Blaß u.a. (2000) bei einem Winkel von  $45^\circ$  für Stabdübel mit einer charakteristischen Zugfestigkeit von  $f_{u,k} = 600 \text{ N/mm}^2$  [3]

### 2-3.3.1 Einfluss der Stahlgüte auf die Tragfähigkeit einer Verbindung

Je nach Versagensart der Verbindung, hat die Zugfestigkeit des Verbindungsmittels eine unterschiedliche Bedeutung. Diese mechanische Eigenschaft ist erst bei Schlankheiten entscheidend, bei denen das Versagen der Verbindung durch Fließgelenkbildung erfolgt [17]. In Abbildung 2.33 sind Versuchsergebnisse aus [17] dargestellt. Wie ersichtlich ist, hat die Stahlfestigkeit erst bei einer Schlankheit  $\lambda > 3$  einen relevanten Einfluss auf die Tragfähigkeit der Stabdübelverbindung. Liegt jedoch eine geringere Schlankheit vor, ist die Tragfähigkeit unabhängig von der Stahlfestigkeit. In diesen Fällen bringt die Verwendung hochfester Stähle demzufolge keine Vorteile [17].

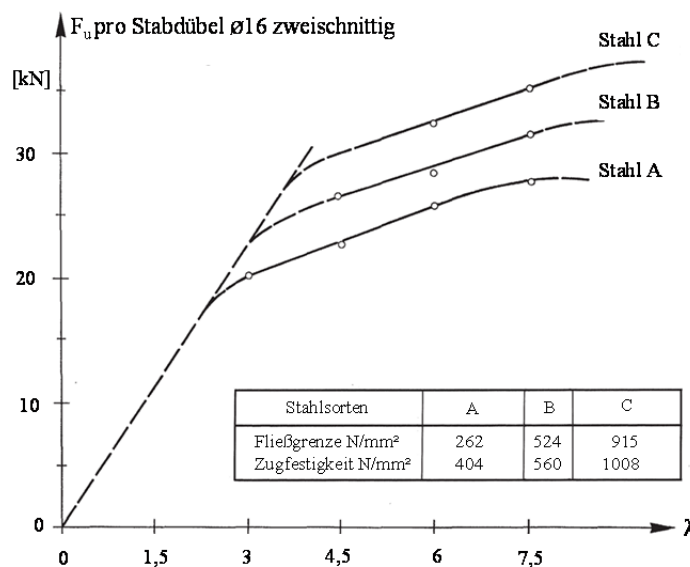


Abbildung 2.33: Einfluss der Stahlfestigkeit von Stabdübeln  $d=16 \text{ mm}$  auf den Tragwiderstand einer zweischnittigen Holz- Holz-Verbindung (Brettschicht aus Fichte), Mittelwerte aus jeweils 3 Versuchen [17]



## 2-3.4 GRUPPENWIRKUNG

Zur Berechnung der Tragfähigkeit einer Verbindung mit mehreren Verbindungsmitteln ist es notwendig, die Tragwiderstände der einzelnen Verbindungsmittel unter Berücksichtigung eines Abminderungsfaktors zu summieren. Die Reduzierung der Tragfähigkeit berücksichtigt, dass es durch verschiedene Ungenauigkeiten (z.B. Fertigungstoleranzen) zu einer ungleichmäßigen Beanspruchung der einzelnen Verbindungsmittel kommen kann. Als Folge davon ist der Widerstand der Verbindung nicht gleich der Summe der Widerstände der einzelnen Verbindungsmittel („Gruppeneffekt“). Diesem Effekt wird in der Bemessung durch die Berücksichtigung einer effektiven Anzahl der hintereinander in Faserrichtung liegenden Verbindungsmittel ( $n_{ef}$ ) Rechnung getragen [4].

Nach enBR [20] sollte  $n_{ef}$  wie in Gleichung (2.19) angegeben berechnet werden.

$$n_{ef} = \left[ n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{10d}} \right] \cdot \frac{90 - \alpha}{90} + n \frac{\alpha}{90} \quad (2.19)$$

- $n$  Anzahl der Verbindungsmittel hintereinander in Faserrichtung  
 $a_1$  Abstand der Verbindungsmittel in Faserrichtung in [mm]  
 $d$  Verbindungsmitteldurchmesser in [mm]  
 $\alpha$  Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung in [°]

Nach [1] ist bei einer einreihigen Verbindung mit  $n$  Verbindungsmittel in Faserrichtung, die wirksame Verbindungsmittellanzahl  $n_{ef}$  nach folgendem Zusammenhang zu berechnen:

$$n_{ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} n \\ n^{0,9} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \end{array} \right\} \quad (2.20)$$

mit

- $a_1$  Abstand in Faserrichtung in [mm]  
 $d$  Verbindungsmitteldurchmesser in [mm]  
 $n$  Anzahl der Verbindungsmittel in einer Reihe

Bei durch Biegemomente beanspruchten Stabdübelverbindungen sind die einzelnen Verbindungsmittel zwangsläufig unterschiedlich stark beansprucht und es ergeben sich individuelle Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung. In solchen Fällen ist der Nachweis für das höchstbeanspruchte (maßgebende) Verbindungsmittel und nicht für die gesamte Verbindung zu führen. Demzufolge ist hier auch keine Gruppenwirkung zu berücksichtigen [4], [20].

## 2-3.5 SEILEFFEKT

Versagensmechanismen, bei welchen das Fließmoment der eingesetzten Verbindungsmittel zu Tragen kommt, führen zu entsprechenden Verformungen derselben.

In Abbildung 2.34 ist der nach [10] im Fließgelenk auftretende Biegewinkel  $\alpha$  in Abhängigkeit des Verbindungsmitteldurchmessers für zwei unterschiedliche Versagensmechanismen einer Holz-Holz-Verbindung dargestellt. Dabei ist unter Versagensmechanismus 2 ein Versagen der Verbindung durch Bildung von einem Fließgelenk je Scherfuge und unter Versagensmechanismus 3 durch Bildung von zwei Fließgelenken je Scherfuge zu verstehen. Es lässt sich erkennen, dass bei baupraktischen

Verbindungsmitteldurchmessern (8 – 16 mm) und Versagensmechanismus 3 ein Biegewinkel zwischen 8° und 17° auftritt [10].

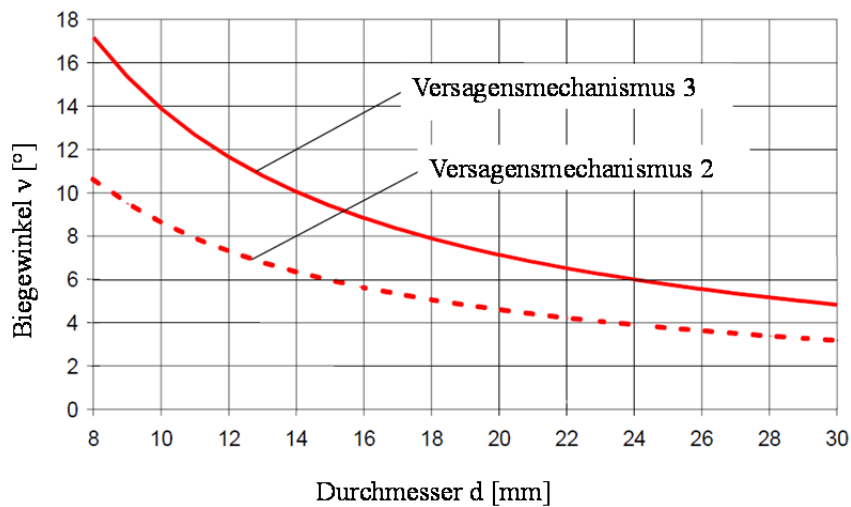


Abbildung 2.34: Verlauf des Biegewinkels  $\alpha$  in Abhängigkeit des Verbindungsmitteldurchmessers für die Versagensmechanismen 2 und 3 [10] (überarbeitet)

Wie in Abbildung 2.35 dargestellt, entstehen durch diese Verformungen in den schräg gestellten Verbindungsmittelteilen Zugkräfte. Diese werden wiederum über Verzahnung (z.B. bei Schrauben) oder durch Mantelreibung und Ankerwirkung (Nagelschaft bzw. Nagelkopf oder Beilagscheibe bei Bolzen) in das Holz eingeleitet [4]. Die Vertikalkomponenten dieser Zugkräfte wirken der äußeren Belastung direkt entgegen. Sofern die Horizontalkomponenten in der Lage sind, Druckspannungen in der Scherfuge aufzubauen, haben diese durch die auftretenden Reibungseffekte ebenfalls eine Erhöhung der Tragfähigkeit zur Folge. Andernfalls kommt es zur Öffnung der Scherfuge (siehe Abbildung 2.35) und somit kann die Reibung zur Erhöhung der Tragfähigkeit nicht beitragen.

Die Kombination dieser beiden Einflüsse (im idealen Fall) wird im Allgemeinen als „Seileffekt“ bezeichnet und Gleichung (2.21) sowie Gleichung (2.24) beschreiben die dadurch mögliche Steigerung der Tragfähigkeit.

$$\Delta F_{v,R} = F_{t,V} + F_{t,H} \cdot \mu_{H-H} \quad (2.21)$$

mit:

$$F_{t,V} = F_t \cdot \sin v \quad (2.22)$$

$$F_{t,H} = F_t \cdot \cos v \quad (2.23)$$

$$\Delta F_{v,R} = F_t \cdot (\sin v + \cos v \cdot \mu_{H-H}) \quad (2.24)$$

Demzufolge sind die Hauptkenngrößen, welche den Seileffekt beeinflussen der Auszieh Widerstand der eingesetzten Verbindungsmittel sowie die Reibung zwischen den zu verbindenden Bauteilen.

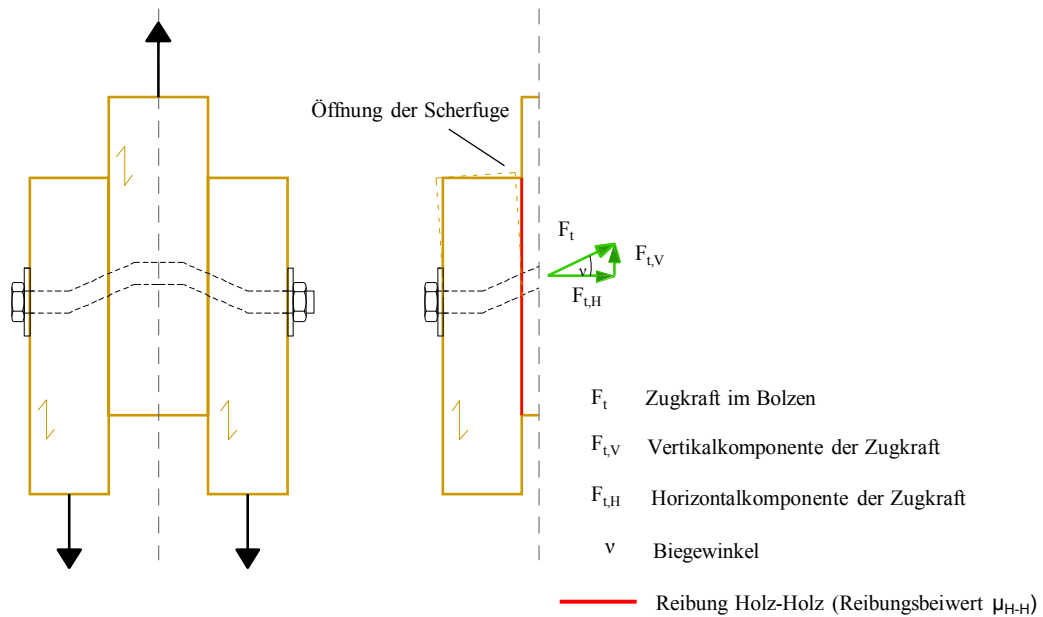


Abbildung 2.35: „Seileffekt“ bei einer zweischnittigen Holz-Holz-Verbindung mit einem Bolzen

Der Eurocode 5 [1] berücksichtigt diesen Effekt durch die Addition von 25 % des Auszieh Widerstandes der eingesetzten Verbindungsmittel zu der nach Johansen berechneten Tragfähigkeit der Verbindung (vergleiche Abschnitt 2-4). In Abhängigkeit der eingesetzten Verbindungsmittel ist diese Erhöhung jedoch auf einen definierten Prozentsatz der Tragfähigkeit ohne Seileffekt zu beschränken (siehe Gleichung (2.25) und Tabelle 2.5).

$$\Delta F_{v,R} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,25 \cdot F_{ax,Rk} \\ \alpha \cdot F_{v,Rk} \end{array} \right\} \quad (2.25)$$

dabei ist

- $\Delta F_{v,R}$  Anteil aus dem Seileffekt in [N]
- $F_{ax,Rk}$  charakteristischer Auszieh Widerstand des Verbindungsmittels in [N]
- $F_{v,Rk}$  Tragfähigkeit einer Verbindung in [N]

Tabelle 2.5: Anteile des Seileffektes [1]

Verbindungsmittel	$\alpha$
runde Nägel	15%
Nägel mit annähernd quadratischem Querschnitt	25%
andere Nägel	50%
Schrauben	100%
Bolzen	25%
Stabdübel	0%

## 2-4 VERSAGENSMECHANISMEN

Mit dem Tragmodell nach Johansen lässt sich die Tragfähigkeit eines Verbindungsmittels je Scherfuge unter Berücksichtigung verschiedener Versagensmechanismen ermitteln. Jeder Versagensmechanismus hat eine zugehörige Tragfähigkeitsgleichung, welche sich aus dem Gleichgewicht der vertikalen Kräfte und dem Bilden der Momentensumme in der Scherfuge herleiten lässt [9]. Welcher Versagensmechanismus schlussendlich maßgebend wird, hängt im Wesentlichen von den in Abschnitt 2-3 erklärten Einflussparametern ab.

Die Tragfähigkeitsgleichungen lassen sich natürlich auch für ein- und mehrschnittige Holz-Holz- und Holz-Stahlblech-Verbindungen herleiten.

### Holz- Holz-Verbindung

Im Folgenden werden die Versagensmechanismen sowie deren zugehörige Tragfähigkeitsgleichungen für ein- und zweischnittigen Holz-Holz-Verbindung dargestellt.

- **einschnittige Holz-Holz-Verbindung**

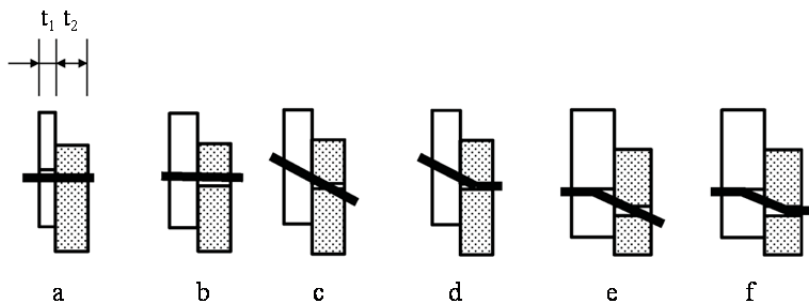


Abbildung 2.36: Versagensmechanismen einer einschnittigen Holz-Holz-Verbindung [1]

$$F_{v, Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (a) \\ f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad (b) \\ \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \left[ \sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax, Rk}}{4} \quad (c) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y, Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax, Rk}}{4} \quad (d) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y, Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax, Rk}}{4} \quad (e) \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \left[ \sqrt{2 \cdot M_{y, Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \right] + \frac{F_{ax, Rk}}{4} \quad (f) \end{array} \right.$$

Abbildung 2.37: Tragfähigkeitsgleichungen für eine einschnittige Holz-Holz-Verbindung [1]

- **zweischnittige Holz-Holz-Verbindung**

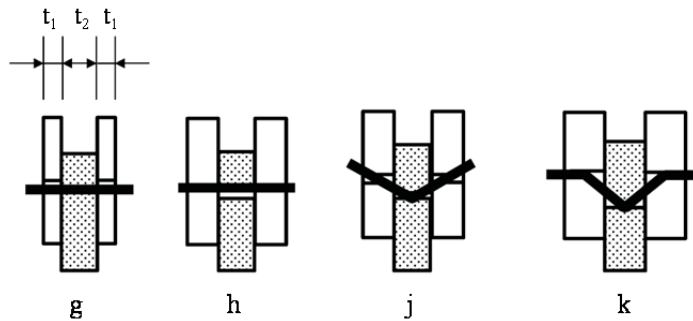


Abbildung 2.38: Versagensmechanismen einer zweischnittigen Holz-Holz-Verbindung [1]

$$F_{v, Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d & (g) \\ 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d & (h) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y, Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax, Rk}}{4} & (j) \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \left[ \sqrt{2 \cdot M_{y, Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \right] + \frac{F_{ax, Rk}}{4} & (k) \end{cases}$$

Abbildung 2.39: Tragfähigkeitsgleichungen für eine zweischnittige Holz-Holz-Verbindung [1]

### Holz-Stahlblech-Verbindung

Nachfolgend zu finden sind die möglichen Versagensmechanismen, durch welche eine Holz-Stahlblech-Verbindung versagen kann.

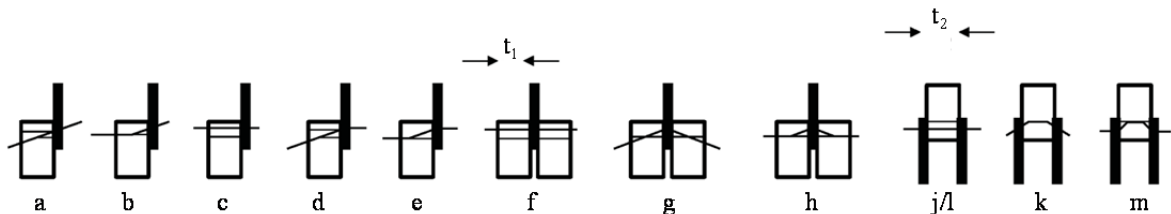


Abbildung 2.40: Versagensmechanismen einer Holz-Stahlblech-Verbindung [1]

Bei Holz-Stahlblech-Verbindungen wird unterschieden, ob es sich um ein innen- oder ein außenliegendes Stahlblech handelt. Zusätzlich muss bei außenliegenden Stahlblechen noch zwischen dünnen und dicken Blechen unterschieden werden, da ein dickes Stahlblech eine Einspannung des Verbindungsmittels und dadurch die Bildung von zwei Fließgelenken ermöglicht. Nach enBR [20] und EC5 [1] wird ein Stahlblech mit einer Dicke  $t \leq 0,5d$  als dünnes Stahlblech definiert ( $d$  bezeichnet den Durchmesser des eingesetzten Verbindungsmittels). Ab einer Stärke von  $t \geq d$  wird laut dieser Definition von einem dicken Stahlblech gesprochen. Im Fall, dass sich die Stahlblechdicke zwischen den oben erwähnten Grenzwerten befindet, ist die entsprechende Tragfähigkeit durch eine geradlinige Interpolation zwischen den Tragfähigkeiten für dünne und dicke Bleche zu bestimmen.

- Tragfähigkeitsgleichungen für ein dünnes Stahlblech, einschnittige Verbindung

$$F_{v, Rk} = \min \begin{cases} 0,4 \cdot f_{h, k} \cdot t_1 \cdot d & (a) \\ 1,15 \cdot \left[ \sqrt{2 \cdot M_{y, Rk} \cdot f_{h, k} \cdot d} \right] + \frac{F_{ax, Rk}}{4} & (b) \end{cases}$$

Abbildung 2.41: Tragfähigkeitsgleichungen für eine Holz-Stahlblech-Verbindung (dünnes Stahlblech, einschnittige Verbindung) [1]

- Tragfähigkeitsgleichungen für ein dickes Stahlblech, einschnittige Verbindung

$$F_{v, Rk} = \min \begin{cases} f_{h, k} \cdot t_1 \cdot d & (c) \\ f_{h, k} \cdot t_1 \cdot d \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y, Rk}}{f_{h, k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax, Rk}}{4} & (d) \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y, Rk} \cdot f_{h, k} \cdot d} + \frac{F_{ax, Rk}}{4} & (e) \end{cases}$$

Abbildung 2.42: Tragfähigkeitsgleichungen für eine Holz-Stahlblech-Verbindung (dickes Stahlblech, einschnittige Verbindung) [1]

- Tragfähigkeitsgleichungen für innenliegendes Stahlblech, zweischnittige Verbindung

$$F_{v, Rk} = \min \begin{cases} f_{h, 1, k} \cdot t_1 \cdot d & (f) \\ f_{h, 1, k} \cdot t_1 \cdot d \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y, Rk}}{f_{h, 1, k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax, Rk}}{4} & (g) \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y, Rk} \cdot f_{h, 1, k} \cdot d} + \frac{F_{ax, Rk}}{4} & (h) \end{cases}$$

Abbildung 2.43: Tragfähigkeitsgleichungen für eine Holz-Stahlblech-Verbindung (innenliegende Stahlblech, zweischnittige Verbindung) [1]

- Tragfähigkeitsgleichungen für dünne außenliegende Stahlbleche, zweischnittige Verbindung

$$F_{v, Rk} = \min \begin{cases} 0,5 \cdot f_{h, 2, k} \cdot t_2 \cdot d & (j) \\ 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y, Rk} \cdot f_{h, 2, k} \cdot d} + \frac{F_{ax, Rk}}{4} & (k) \end{cases}$$

Abbildung 2.44: Tragfähigkeitsgleichungen für eine Holz-Stahlblech-Verbindung (außenliegende Stahlbleche, zweischnittige Verbindung) [1]

- **Tragfähigkeitsgleichungen für dicke außenliegende Stahlbleche , zweischnittige Verbindung**

$$F_{v, Rk} = \min \begin{cases} 0,5 \cdot f_{h, 2, k} \cdot t_2 \cdot d & (l) \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y, Rk} \cdot f_{h, 2, k} \cdot d} + \frac{F_{ax, Rk}}{4} & (m) \end{cases}$$

*Abbildung 2.45: Tragfähigkeitsgleichungen für eine Holz-Stahlblech-Verbindung (außenliegende Stahlbleche, zweischnittige Verbindung) [1]*

Wie aus den dargestellten Versagensmechanismen ersichtlich ist, kann eine Verbindung durch Überschreitung der Lochleibungsfestigkeit und durch Fließgelenkbildung versagen. Der zweite Summand bei den Tragfähigkeitsgleichungen für den Fall, dass die Verbindung durch Fließgelenkbildung versagt, ist der Anteil des Seileffektes (siehe Abschnitt 2-3.5 und Kapitel 3).

Bei dem Versagen der Verbindung durch Überschreitung der Lochleibungsfestigkeit ist die Traglast der Verbindung durch die Lochleibungsfestigkeit des Holzes bestimmt. In diesem Fall wird das Verbindungsmittel nicht verformt. Mit einer Steigerung der Holzdicke kann ein reines Lochleibungsversagen vermeiden werden. Dementsprechend wird bei größeren Holzdicken das plastische Biegeversagen der Verbindungsmittel maßgebend. Bei solchen Verbindungen wird der Traglastzustand erst nach größeren plastischen Verformungen durch Fließgelenkbildung im Verbindungsmittel erreicht. Das Versagen der Verbindung durch Fließgelenkbildung ermöglicht die höchsten Tragfähigkeiten sowie ein duktileres Verhalten. Demzufolge sollten die Verbindungen so ausgebildet werden, dass dieser Versagensmechanismus maßgebend wird [14].



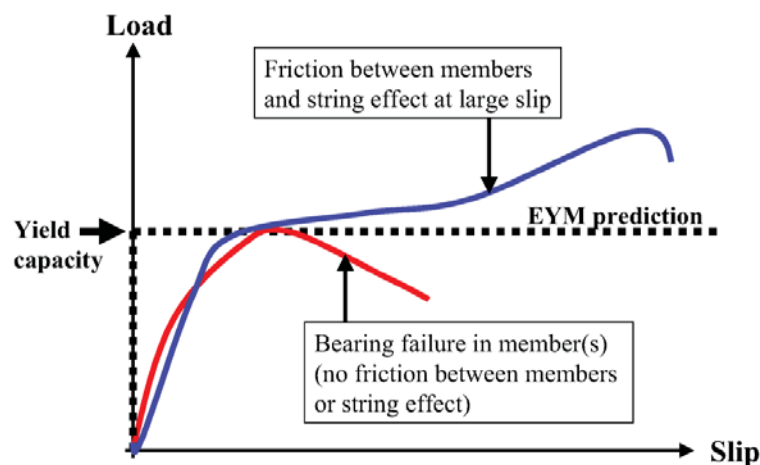


## KAPITEL 3: SEILEFFEKT

### 3-1 STAND DES WISSENS

Im vorherigen Kapitel sind die wichtigsten Parameter, welche Einfluss auf die Tragfähigkeit einer auf Abscheren beanspruchten Verbindung haben, beschrieben worden. Prüftechnische Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass die tatsächlichen Tragfähigkeiten solcher Verbindungen von den nach dem EYM berechneten mitunter stark abweichen [5], [4], [6], [7], [28]. Nun stellt sich die Frage, welche von den bereits erwähnten Parametern dafür verantwortlich sind. Eine Literaturrecherche hat gezeigt, dass der Großteil der Parameter im Vergleich zum Seileffekt relativ gut erforscht sind. Zusätzlich zeigten die Untersuchungen von [3] und [28], dass der Seileffekt auch für Stabdübelverbindungen mitunter wesentliche Traglaststeigerungen zulässt. Daher wird im Rahmen dieser Masterarbeit der Seileffekt von Holz-Holz-Verbindungen mit Stabdübeln näher betrachtet.

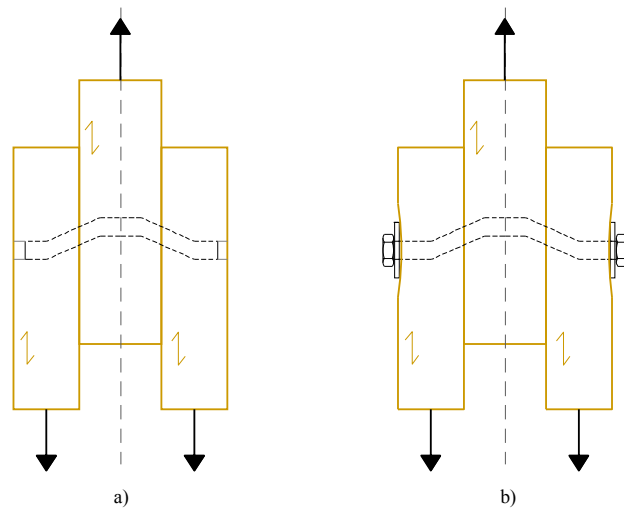
Der Seileffekt und die daraus resultierende Laststeigerung erfolgt in der Regel erst bei größeren Verformungen. In Abbildung 3.1 sind zwei mögliche Kraft-Weg-Prüfkurven einer auf Abscheren beanspruchten Stabdübelverbindung dargestellt. Die rote Kurve zeigt das Verhalten einer Verbindung, welche bei kleinen Verformungen versagt. Dementsprechend kommt der Seileffekt bzw. die Reibung zwischen den zu verbindenden Elementen nicht zum Tragen; das Versagen tritt dabei meist in den Holzelementen auf (Lochleibung). Die zweite Prüfkurve (blau) zeigt das Verhalten bei größeren Verformungen und die hierbei mögliche Laststeigerung durch die erwähnten Effekte. Die strichlierte Linie in dem Diagramm kennzeichnet die nach dem EYM ermittelte Tragleistung der Verbindung [29].



**Abbildung 3.1:** Vergleich von unterschiedlichen Kraft-Weg-Verläufen einer Verbindung und ihre Relation zum EYM [29]

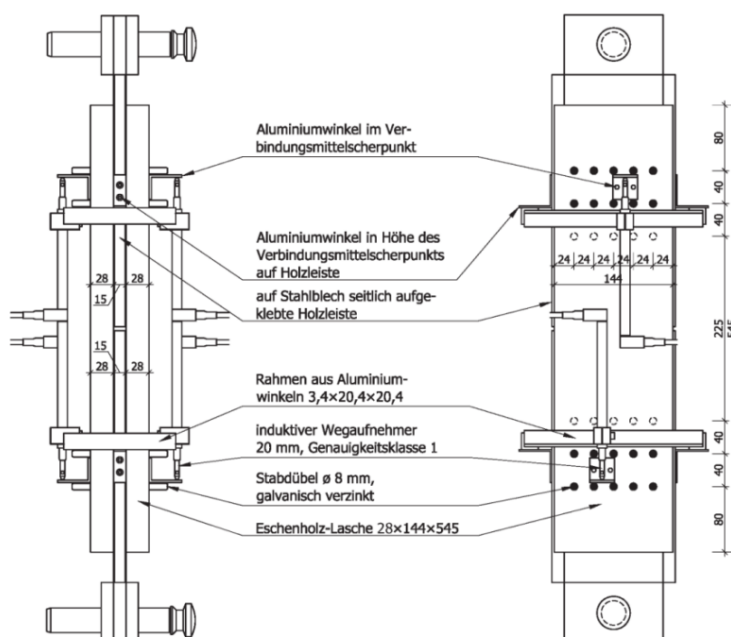
Wie schon im Abschnitt 2-3.5 erwähnt, ist im EC5 [1] der Seileffekt in Abhängigkeit vom Verbindungsmittel unterschiedlich berücksichtigt. Demzufolge werden entweder 25% des Auszieh Widerstandes der eingesetzten Verbindungsmittel oder ein definierter Prozentsatz der zuvor ermittelten Tragfähigkeit (ohne Seileffekt) in Rechnung gestellt. Zudem ist nach EC5 [1] der Seileffekt für Stabdübelverbindungen nicht zu berücksichtigen (siehe Tabelle 2.5). Dies ist dadurch begründet, dass es bei größeren Verschiebungen zum Einziehen des Stabdübels kommt. Die dabei im Stabdübel entstehenden Zugkräfte beruhen, im Gegensatz zu Bolzenverbindungen, vorwiegend auf

Reibungseffekten welche bis dato nicht berücksichtigt werden. Abbildung 3.2 zeigt den Vergleich zwischen einem Stabdübel und einem Bolzen im verformten Zustand. Hier lässt sich erkennen, wie die bei Bolzen eingesetzten Unterlagscheiben das Einziehen des Verbindungsmittels wirksam verhindern.



**Abbildung 3.2: verformter Zustand eines: a) Stabdübels und b) Bolzens [30] (überarbeitet)**

Wie bereits angesprochen, haben Untersuchungen an Stabdübelverbindungen jedoch gezeigt, dass auch hier eine gewisse Erhöhung der Tragfähigkeit durch den Seileffekt möglich ist. Als Beispiel wird im Folgenden auf die Untersuchungen von Hübner [3] näher eingegangen. Bei den hier vorgestellten Prüfungen handelte es sich um zweischnittige Holz-Stahlblech-Verbindungen mit Stabdübeln, welche parallel zur Faserrichtung beansprucht waren. Die dabei verwendeten Eschenbretter hatten Abmessungen von  $28 \text{ mm} \times 144 \text{ mm} \times 545 \text{ mm}$  und wurden mehrere Wochen im Normalklima gelagert. Das eingesetzte Stahlblech hatte eine Dicke von  $15 \text{ mm}$  und der Stabdübeldurchmesser betrug  $8 \text{ mm}$ . Die Prüfungen erfolgten in drei Serien mit jeweils fünf Prüfkörpern. In der ersten Prüfserie waren fünf Stabdübeln in einer Reihe angeordnet. Die zweite Prüfserie wies zwei und die dritte Prüfserie drei Reihen mit jeweils fünf Stabdübeln auf [3]. In Abbildung 3.3 ist die verwendete Prüfkonfiguration dargestellt. Hier sind auch die für diese Prüfungen verwendeten Rand- und Zwischenabstände ersichtlich.



**Abbildung 3.3: Konfiguration der Zugprüfungen der Stabdübelverbindung mit mittigem Stahlblech [3]**

Im Anschluss an die Prüfungen wurden deren Ergebnisse mit den nach Abbildung 3.4 berechneten Tragfähigkeiten verglichen. Die hierfür notwendigen Eingangsgrößen (mittlere Lochleibungsfestigkeit sowie das mittlere Fließmoment) wurden für jede Prüfung der drei Serien nach Gleichung (3.1) bzw. Gleichung (3.3) einzeln berechnet. Beide Funktionen wurden, basierend auf weiteren Prüfungen, in Hübner [3] entwickelt bzw. hergeleitet.

$$R_i = \min \begin{cases} f_{h, mean} \cdot t_1 \cdot d & (f) \\ f_{h, mean} \cdot t_1 \cdot d \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y, mean}}{f_{h, mean} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] & (g) \\ \sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y, mean} \cdot f_{h, mean} \cdot d} & (h) \end{cases}$$

(a) Versagensmechanismus f      (b) Versagensmechanismus g      (c) Versagensmechanismus h

**Abbildung 3.4:** Tragfähigkeitsgleichungen mit zugehörigen Versagensmechanismen für eine Holz-Stahlblech-Verbindung (innenliegendes Stahlblech, zweischnittige Verbindung) [1], [3]

$$f_{h, \alpha, mean} = \frac{2,70 \cdot 10^{-3} d^{-0,24} \rho_{12}^{1,6}}{(1 - 0,47 d^{0,33}) \cos^2 \alpha + 0,47 d^{0,33}} \quad (3.1)$$

$$v_{cal} = \arctan\left(\frac{w_{mean}}{t_1}\right) \quad (3.2)$$

$$M_{y, mean}(v_{cal}) = 4,0923 \ln(v_{cal}) + 38,269 \quad (3.3)$$

dabei ist

$v_{cal}$	Biegewinkel in [°]
$w_{mean}$	mittlere Verschiebung in [mm]
$t_1$	Laschendicke in [mm]
$M_{y, mean}$	mittleres Fließmoment in [Nmm]

Für die zweite und dritte Prüfserie berechnete Hübner in [3] die wirksame Anzahl der hintereinander angeordneten Stabdübel nach [31] bzw. Gleichung (3.4).

$$n_{ef} = \left[ \min \left\{ n; n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{10d}} \right\} \right] \cdot \frac{90 - \alpha}{90} + n \frac{\alpha}{90} \quad (3.4)$$

Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 geben einer Übersicht zu den Traglasten aus den Prüfungen sowie den berechneten Tragwiderständen.

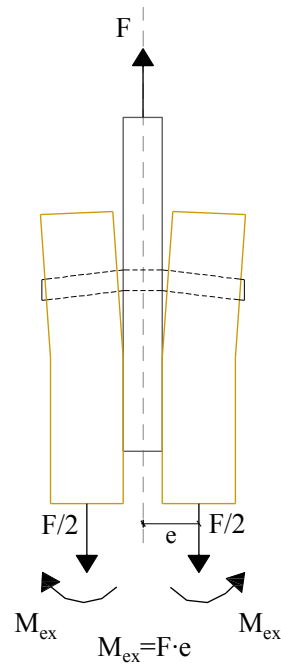
**Tabelle 3.1: Gegenüberstellung der Traglasten aus Prüfung und Berechnung [3]**

Nr.	mittlere Rohdichte	Lochleibungs festigkeit $f_{h,o,cal}$ (u=10,85%)	berechnete Traglast $F_{cal}$	Maximallast $F_{max}$	Verhältnis Prüfung/Berechnung		Verhältnis Prüfung/EN 1995-1-1	mittlere Verschiebung $w_{mean}$	Biegewinkel bei $F_{max}$ $V_{cal}$
					$F_{max}/F_{cal}$	$F_{max}/F_{cal}^*$			
	$\rho$ [kg/mm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[°]
5.1	713	60,1	80,4	114,3	142,0	110	190,0	14,20	26,9
5.2	582	43,5	64,4	87,2	135,0	98	145,0	17,65	32,2
5.3	707	59,4	79,6	111,5	140,0	111	185,0	13,50	25,7
5.4	799	72,2	91,8	126,6	138,0	107	210,0	14,34	27,1
5.5	777	69,1	88,9	120,8	136,0	108	201,0	13,47	25,7
10.1	731	62,7	128,2	208,8	163,0	137	221,0	10,05	19,7
10.2	742	64,1	130,3	188,4	145,0	138	200,0	4,98	10,1
10.3	643	51,0	110,7	159,3	144,0	139	169,0	4,49	9,1
10.4	747	64,9	131,4	196,9	150,0	139	209,0	6,45	13,0
10.5	772	68,3	136,6	252,9	185,0	145	268,0	11,64	22,6
15.1	779	69,4	198,6	275,2	139,0	136	202,0	3,41	6,9
15.2	711	59,9	178,4	263,1	148,0	133	194,0	8,02	16,0
15.3	753	65,6	190,7	274,6	144,0	138	202,0	4,8	9,7
15.4	690	57,2	172,5	250,3	145,0	137	184,0	5,77	11,7
15.5	678	55,5	168,9	250,8	148,0	136	184,0	7,06	14,2

**Tabelle 3.2: gemittelte maximale Maximallasten und Verhältnisse zu berechneten Werten [3]**

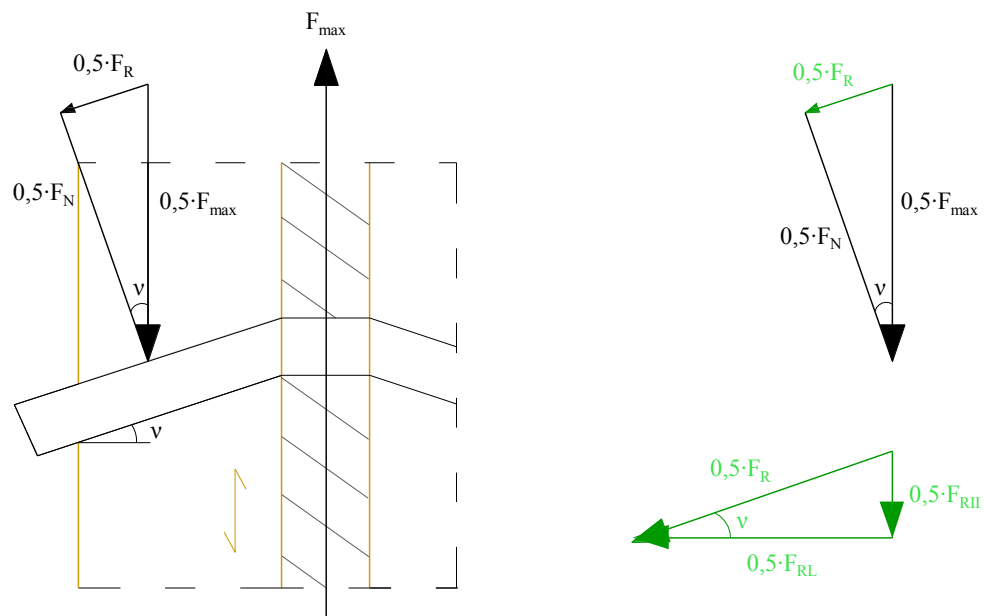
Serie	mittlere Bruchlast	Variationskoeffizient	Verhältnis Prüfung/Berechnung		geschätztes 5%-Quantil	char. Traglast	Verhältnis 5%-Quantil der Maximallast/(charak.)Traglast	
	$F_{max}$	$CoV$	$F_{max}/F_{cal}$	$F_{max}/F_{cal}^*$	$F_{est,05}$	$R_k$	$F_{est,05}/R_k$	$F_{est,05} \gamma_M/R_k k_{mod}$
	[kN]	[%]	[%]	[%]	[kN]	[kN]	[%]	[%]
ES_T8_00_05	112,0	13,5	138	107	82	60,1	136	189
ES_T8_00_10	201,2	17,0	157	140	147	94,4	156	217
ES_T8_00_15	262,8	4,6	145	136	192	135,9	141	197

Wie aus Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 klar ersichtlich ist, gibt es gravierende Abweichungen zwischen den berechneten Traglasten ( $F_{cal}$ ) und den experimentell ermittelten Traglasten ( $F_{max}$ ). Wird jedoch der Einfluss der Reibung zwischen der Stabdübeloberfläche und dem umgebenden Holz bzw. die Zugkraft im Stabdübel bei der Berechnung der Tragfähigkeit mitberücksichtigt ( $F_{cal}^*$ ) ergeben sich deutlich kleinere Abweichungen. An dieser Stelle muss jedoch angemerkt werden, dass für diese Betrachtungen die Reibung in den Verbindungsfugen nicht berücksichtigt werden konnte. Der Grund hierfür liegt in der Prüfgeometrie; durch die außenliegenden Holzlaschen bildeten sich Exzentrizitätsmomente ( $M_{ex}$ ), welche wiederum eine Öffnung der Verbindungsfugen (siehe Abbildung 3.5) zur Folge hatten. Die horizontalen Komponenten der Zugkräfte in den einzelnen Stabdübel reichten hier nicht aus die Fugen zu schließen, womit auch keine Reibungseffekte zwischen den zu verbindenden Elementen aktiviert werden konnten.



**Abbildung 3.5: Öffnung der Verbindungsfuge**

In Abbildung 3.6 sind die hier für den Seileffekt berücksichtigten Kräfte bildlich dargestellt.



**Abbildung 3.6: Reibkraft bei Stabdübelverbindungen [3] (überarbeitet)**

Die maximale Reibkraft, welche parallel zur Faserrichtung aktiviert werden kann ( $F_{RII}$ ), berechnete Hübner mit Gleichung (3.5). Dabei ist  $\mu$  der Reibungsbeiwert zwischen Stabdübeloberfläche und umgebenden Holz. Die Ermittlung der jeweiligen Reibungsbeiwerte erfolgte dabei über den berechneten Biegewinkel des Stabdübels (siehe Gleichung (3.2)), welcher in diesem Fall als Reibungswinkel betrachtet wurde, nach Gleichung (3.6).

$$F_{RII} = \sin(v_{cal}) \cdot \mu \cdot F_N \quad (3.5)$$

$$\mu = \tan(v_{cal}) \quad (3.6)$$

$$F_N = \cos(v_{cal}) \cdot F_{max} \quad (3.7)$$

$$F_{cal}^* = F_{cal} + F_{RII} \quad (3.8)$$

mit

$F_{RII}$  Reibungskraft parallel zur Faserrichtung in [kN]

$\mu$  Reibungsbeiwert in [-]

$v_{cal}$  berechneter Biegewinkel der Stabdübel in [°]

$F_N$  Normalkraft senkrecht zur Stabdübelachse in [kN]

$F_{max}$  mittlere Maximallast in [kN]

Basierend auf diesen Überlegungen, ergeben sich für die einzelnen Serien die Folgenden, aus der Reibung zwischen Stabdübel und dem umgebenden Holz resultierenden, Traglastanteile (mit jeweiligen Mittelwert der Reibungsbeiwerte):

- 21% bei Prüfserie ES\_T8\_00\_05 ( $\mu=0,52$ )
- 7% bei Prüfserie ES\_T8\_00\_10 ( $\mu=0,27$ )
- und 6% bei Prüfserie ES\_T8\_00\_15 ( $\mu=0,21$ )

In Abbildung 3.7 ist ein grafischer Vergleich der Prüfergebnissen aus Tabelle 3.1 ersichtlich. Dabei ist der Verlauf der maximalen Bruchlast  $F_{max}$  mit einer dunkelblauen Linie dargestellt. Die graue Linie zeigt den berechneten Tragwiderstand ( $F_{cal}$ ) und die hellblaue Linie den Tragwiderstand der Verbindung unter Berücksichtigung der Zugkraft im Stabdübel ( $F_{cal}^*$ , siehe Gleichung (3.8)). Es lässt sich erkennen, dass der Verlauf von  $F_{cal}^*$  eine bessere Anpassung an den Verlauf von  $F_{max}$  liefert als  $F_{cal}$ . Die besonders gute Übereinstimmung mit der ersten Prüfserie ist hier ebenfalls klar zu sehen. Die größeren Abweichungen bei den Prüfserie 2 und 3 könnten wiederum mit der Berücksichtigung der Gruppenwirkung ( $n_{ef}$ ) zusammenhängen. Die für die Berechnung von  $n_{ef}$  verwendete Gleichung (3.4) wurde für Nadelholz ermittelt, wodurch für Verbindungen in Laubholz größere Modellabweichungen auftreten können [3].

Vergleich der Tragfähigkeiten mit und ohne Berücksichtigung der Reibungskraft

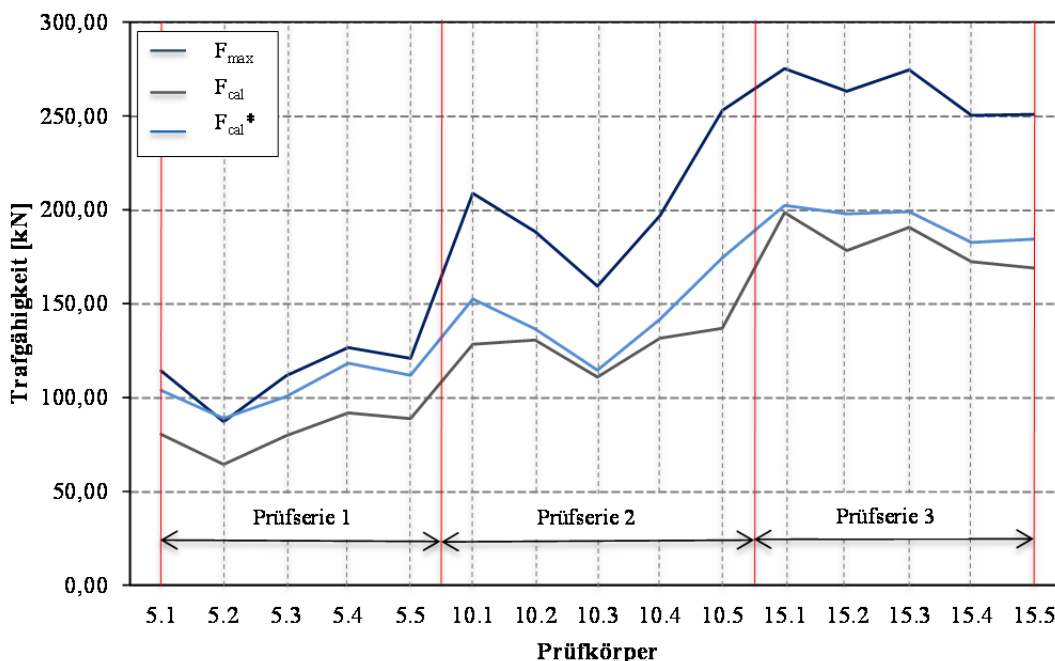


Abbildung 3.7: Vergleich der Tragfähigkeiten aus [3] mit und ohne Berücksichtigung der Reibungskraft

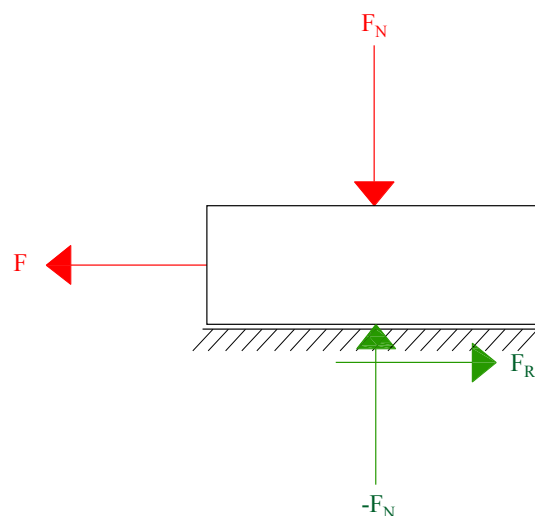
## 3-2 REIBUNG

Da die Reibung, wie oben beschrieben, einen mitunter erheblichen Einfluss auf die Tragfähigkeit einer Stabdübelverbindung besitzt, ist es durchaus von Interesse, die grundlegenden Eigenschaften der Reibung als eine physikalische Größe etwas näher zu betrachten.

Nach [32] lässt sich die Reibung wie folgt definieren:

*“Reibung ist der Widerstand in den Kontaktflächen von zwei Körpern, der eine gegenseitige Bewegung durch Gleiten, Rollen oder Abwälzen verhindert oder zumindest beeinträchtigt. [32]”*

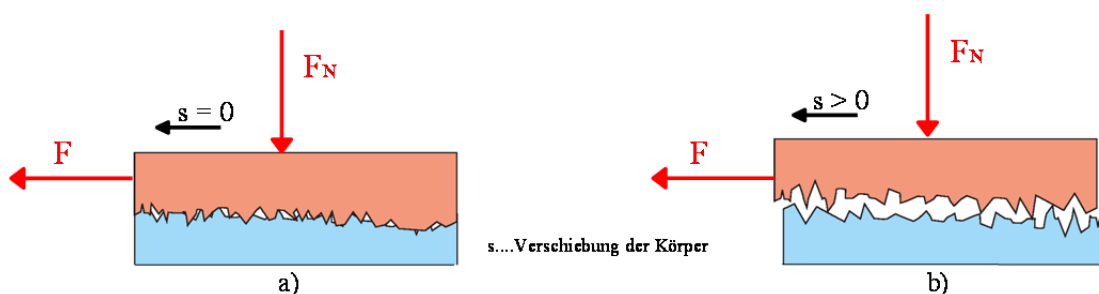
Der Reibwiderstand kann durch Reibungskräfte oder -momente dargestellt werden [32]. In Abbildung 3.8 ist ein durch Normal- und Tangentialkräfte beanspruchter Klotz auf einer Ebene dargestellt. Das Verhältnis zwischen wirkender Normalkraft  $F_N$  und der Reibungskraft  $F_R$  wird als Reibungsbeiwert oder Reibungszahl  $\mu$  bezeichnet.



**Abbildung 3.8:** ein durch Normal- und Tangentialkraft beanspruchter Klotz auf einer Ebene mit zugehörigen Reaktions- und Reibungskräften [33] (überarbeitet)

Die Tribologie (Lehre über Reibung) basiert auf zwei Reibungsgesetzen. Das Reibungsgesetz von Leonardo da Vinci besagt, dass die Reibungskraft von der Kontaktfläche unabhängig ist. Nach dem Gesetz von Euler und Amontons ist die Reibungskraft  $F_R$  proportional zur Normalkraft  $F_N$  [32], [33].

Charles Augustin de Coulomb hat durch seine umfangreichen experimentellen Untersuchungen festgestellt, dass sich der Reibungswiderstand bzw. Reibungszustand in Haftreibung und Gleitreibung unterteilen lässt. Im Hintergrund dieser Unterteilung steht die Kontaktfläche zwischen den betrachteten zwei Körpern. Grundsätzlich ist die Oberfläche von jedem Körper mehr oder weniger uneben; in vielen Fällen handelt es sich um mikroskopische Unebenheiten. Bei einem Kontakt zwischen den Körpern kommt es zu einer Verzahnung von diesen Unebenheiten [32], [33].



**Abbildung 3.9:** Reibungszustände: a) Haftreibung mit enger Verzahnung, b) Gleitreibung [32] (überarbeitet)

In Abbildung 3.9 sind zwei Reibungszustände dargestellt. Beim ersten Fall (Abbildung 3.9a)) ist die angesprochene Verzahnung so stark ausgeprägt, dass eine gegenseitige Verschiebung der Körper ( $s$ ) nicht möglich ist. Dieser Zustand wird als Haftreibung bezeichnet (im Weiteren  $F_{R,H}$ ). Damit es zu einer Bewegung  $s$  kommen kann, muss die Haftreibungskraft, welche auch als statische Reibungskraft bezeichnet wird, überwunden werden [32], [33].

$$F_{R,H} = \mu_H \cdot F_N \quad (3.9)$$

$F_{R,H}$  Haftreibungskraft in [N]

$F_N$  Normalkraft (Anpresskraft) in [N]

$\mu_H$  statischer Reibungsbeiwert (Haftreibungsbeiwert) in [-]

Nach [32] ist der Haftreibungsbeiwert von der Werkstoffpaarung, der geometrischen Oberflächenbeschaffenheit (z.B. glatt, rau, poliert, geschliffen), der physikalischen Oberflächenbeschaffenheit (z.B. trocken, feucht, geschmiert) und der Temperatur abhängig.

Kommt es nun zur Überwindung der Haftreibung, tritt die Gleitreibung ( $F_{R,G}$ ) auf (auch als kinetische Reibungskraft bezeichnet; siehe Abbildung 3.9 b)).

$$F_{R,G} = \mu_G \cdot F_N \quad (3.10)$$

$F_{R,G}$  Gleitreibungskraft in [N]

$F_N$  Normalkraft (Anpresskraft) in [N]

$\mu_G$  kinematischer Reibungsbeiwert (Gleitreibungsbeiwert) in [-]

Die schon erwähnte Proportionalität zwischen der Reibungskraft und der Normalkraft ist auch in den Gleichungen (3.9) und (3.10) ersichtlich. In Abbildung 3.10 sind Haft- und Gleitreibungszustand bei einem Kraft-Zeit-Diagramm dargestellt. Als Grenzzustand wird jener Punkt bezeichnet, an welchem die Haftreibung überwunden wird und die Gleitreibung einsetzt. In anderen Worten, es handelt sich um jenen Punkt, ab welchem sich der betrachtete Körper in Bewegung setzt.

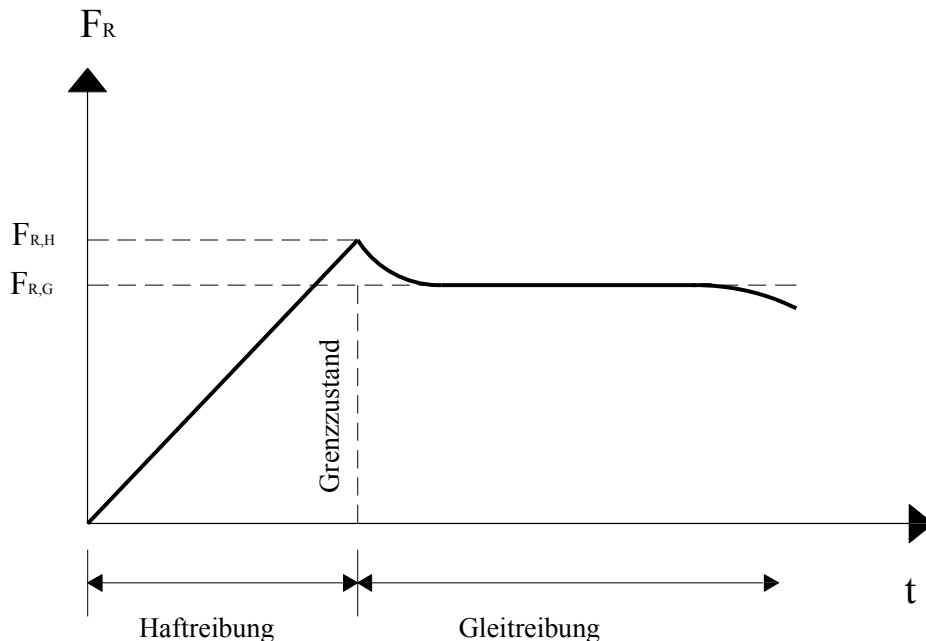


Abbildung 3.10: Kraft-Zeit-Diagramm mit Unterscheidung von zwei Reibungszuständen [34] (überarbeitet)

Wie aus Abbildung 3.10 ersichtlich, ist die Haftreibungskraft größer als der Gleitreibungskraft und somit ist auch der Haftreibungsbeiwert größer als der Gleitreibungsbeiwert.



Nach [33] können statische und kinetische Reibungskräfte in vielen mechanischen Aufgaben jedoch nicht exakt voneinander getrennt betrachtet werden, da z.B. ein partielles Gleiten auftreten kann obwohl sich der Körper an sich nicht in Bewegung befindet. Dieser Umstand wird in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht näher betrachtet.

In Tabelle 3.3 und Tabelle 3.4 sind Haft- und Gleitreibungsbeiwerte für die Kombinationen Holz-Metall und Holz-Holz aus verschiedenen Literaturquellen zusammengestellt.

**Tabelle 3.3: Haft- und Gleitreibungsbeiwerte für die Kombination Holz-Metall**

<b>Holz-Metall</b>		
	Haftreibungsbeiwert $\mu_H$ [-]	Gleitreibungsbeiwert $\mu_G$ [-]
<b>Sayir et al. [35]</b>	0,5-0,65	0,2-0,5
<b>Kessel [34]</b>	0,3-0,6	0,4-0,5
<b>Finke [36]</b>	0,5	0,4
<b>Bertram [37]</b>	0,6-0,7	0,4-0,5
<b>Krapfenbauer [38]</b>	0,6	0,4

**Tabelle 3.4: Haft- und Gleitreibungsbeiwerte für die Kombination Holz-Holz**

<b>Holz-Holz</b>		
	Haftreibungsbeiwert $\mu_H$ [-]	Gleitreibungsbeiwert $\mu_G$ [-]
<b>Mahnken [32]</b>	0,4-0,6	0,2-0,4
<b>Kessel [34]</b>	0,4-0,6	0,2-0,4
<b>Finke [36]</b>	0,55	0,35
<b>Bertram [37]</b>	0,4-0,6	0,2-0,4
<b>Krapfenbauer [38]</b>	0,53-0,62	0,34-0,48

Wie zu sehen ist, zeigen die angegebenen Werte eine große Bandbreite (Holz-Metall: 0,2-0,7; Holz-Holz: 0,2-0,62) und auch die Ergebnisse aus [3] bewegen sich innerhalb dieser Grenzen. Eine nähere Betrachtung des bei Stabdübelverbindungen tatsächlich auftretenden Reibungsbeiwertes ist derzeit jedoch noch ausständig.



## KAPITEL 4: PRÜFVORBEREITUNG UND DURCHFÜHRUNG

### 4-1 ALLGEMEIN

Wie schon im Abschnitt 3-1 erwähnt, basiert eine mögliche Erhöhung der Tragfähigkeit einer Stabdübelverbindung durch den Seileffekt auf den Zugkräften, welche sich aufgrund der vorhandenen Reibung zwischen Stabdübel und dem umgebenden Holz aufbauen können. Da die Angaben hinsichtlich der Reibung in der Literatur eine mitunter große Bandbreite aufweisen und sich auch die geometrischen Randbedingungen bei Stabdübelverbindungen als eher komplex darstellen, wurden im Rahmen dieser Arbeit experimentelle Untersuchungen zu diesem Thema an einer zweischnittigen Holz-Holz-Verbindung durchgeführt.

Die verwendete Prüfkongfiguration und die eingesetzten Materialien sowie der Prüfplan und die Prüfdurchführung werden im vorliegenden Kapitel näher beschrieben.

### 4-2 PRÜFKONFIGURATION

Da der Fokus dieses Prüfprogramms auf der reibungsbasierten Zugtragfähigkeit eines einzelnen Stabdübels bzw. der Ermittlung von entsprechenden Reibungsbeiwerten lag, wurde die Prüfkongfiguration als Zugprüfung eines in einer zweischnittigen Holz-Holz-Verbindung liegenden Stabdübels konzipiert. Um auch die in einer Stabdübelverbindung auftretenden Scherbeanspruchungen (im Weiteren auch als Vorlast bezeichnet) definiert aufbringen zu können, wurde zusätzlich eine neu entwickelte Messschraube zum Einsatz gebracht; die Funktionsweise dieser Messschraube wird etwas später erläutert. Abbildung 4.1 zeigt die verwendete Prüfkongfiguration.

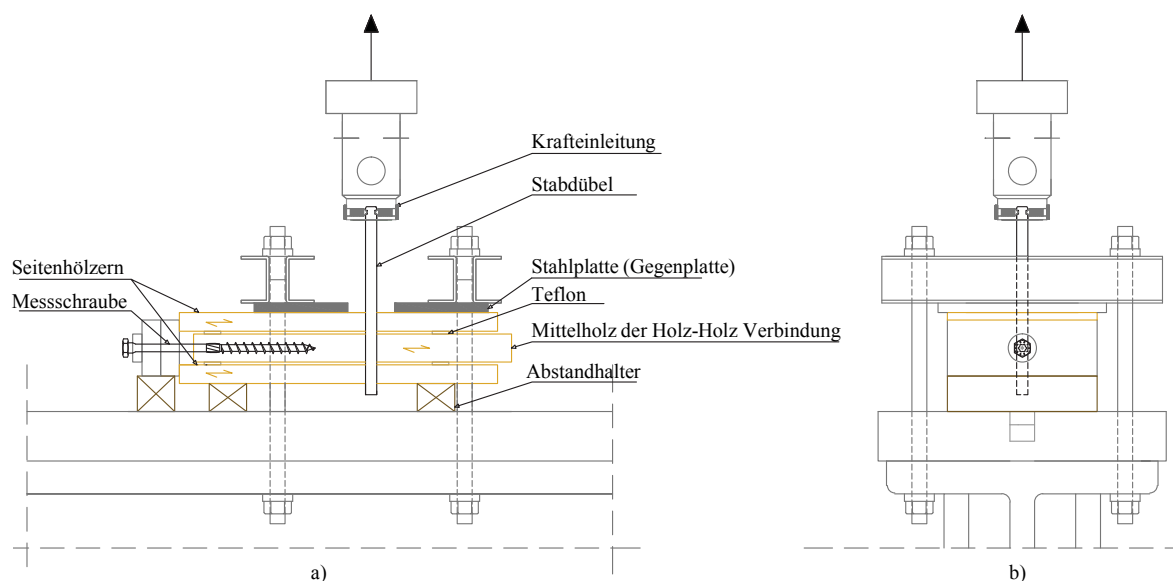


Abbildung 4.1: Prüfkongfiguration: a) Schnitt, b) Ansicht



**Abbildung 4.2: Bilder der Prüfkonfiguration**

Wie aus Abbildung 4.2 ersichtlich ist, wurden die Holzbretter auf zwei kleinen Holzklötzen (160 mm × 40 mm × 30 mm), die als Abstandhalter benutzt wurden, aufgelegt. Um den Kontakt zwischen den Holzbrettern zu vermeiden bzw. die Reibung zwischen diesen möglichst auszuschließen, wurden 3 mm dicke PTFE-Streifen (Polytetrafluorethylen; im Folgenden „Teflon“) eingesetzt.

Der Stabdübel wurde in das vorgebohrte Loch so eingetrieben, dass ein Überstand von 12 mm auf der unteren Seite der Verbindung vorhanden war. Damit sich während dem Herausziehen des Stabdüfels die Holzbretter nicht zusammen mit dem Stabdübel nach oben verschieben, wurde eine Gegenplatte aus Stahl (250mm × 180 mm × 10 mm) mit einem mittig angeordneten Loch (Durchmesser 50 mm) auf dem oben liegenden Seitenholz aufgelegt. Die Befestigung der Prüfkörper auf dem Basisträger der Prüfmaschine erfolgte durch zwei Doppel-U-Profile.

Die bereits erwähnte Messschraube wurde im Mittelholz eingebracht. Zwei auf den Seitenhölzern aufliegende Stahlplatten (160 mm × 60 mm × 20 mm) fungierten als Widerlager für den Schraubenkopf und ermöglichten so die gewünschte Scherbeanspruchung des Stabdüfels. Um eine Biegebeanspruchung der Messschraube durch die relativ schweren Stahlplatten auszuschließen, wurden diese durch einen Holzklötz (160 mm × 40 mm × 38 mm) unterstützt.

Abbildung 4.3 b) zeigt den durch die Kombination aus Messschraube und Stahlplatten erzeugten Spannungszustand zwischen dem Stabdübel und den drei primären Holzelementen.

Die Einleitung der durch die Prüfmaschine aufgebrauchten Zugkraft in den Stabdübel erfolgte über drei Fixierschrauben bzw. einer in den Stabdübel eingefrästen Nut (siehe Abbildung 4.3 a).

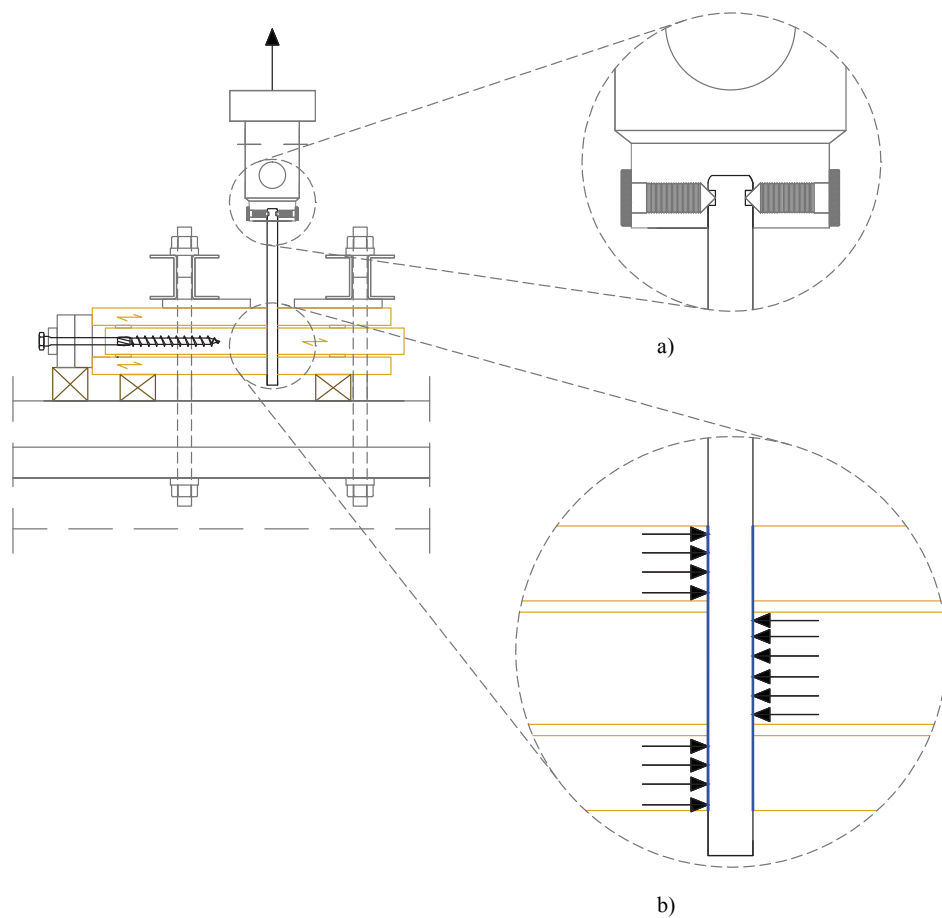


Abbildung 4.3: a) Detail Kräfteinleitung in den Stabdübel, b) Detail Kontaktbereich Stabdübel-Holz

### 4-3 PRÜFPLAN

Nach Werner [25] ist die Reibung zwischen einem Stabdübel und dem umgebenden Holz von der Holzart, dem Verbindungsmitteldurchmesser, der Zeit zwischen Einbringen und Herausziehen, der Oberflächenbeschaffenheit des Bohrloches und des Verbindungsmittels sowie von der Holzfeuchte abhängig. Die Variation aller angeführten Parameter hätte jedoch eine in der vorhandenen Zeit nicht bewältigbare Anzahl an durchzuführenden Prüfungen ergeben. Demzufolge wurde das Prüfprogramm auf die Variation der folgenden vier Parameter beschränkt:

- (i) Durchmesser
- (ii) Oberflächenbeschaffenheit des Stabdübels
- (iii) Material des Stabdübels
- (iv) Lastniveau der Scherbeanspruchung

Daraus ergaben sich 110 Prüfungen, welche aus 11 Prüfserien mit jeweils 10 Prüfungen zusammengesetzt wurden. Jede Prüfserie bzw. jeder Prüfkörper einer Prüfserie wurde in Abhängigkeit der variierten Parameter mit einer eigenen Bezeichnung versehen (siehe Abbildung 4.4).

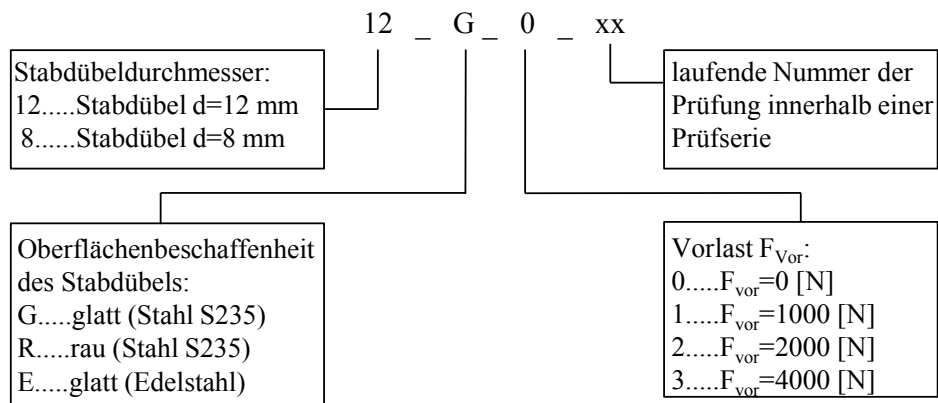


Abbildung 4.4: Beschriftung der Prüfkörper

Tabelle 4.1 enthält einer Übersicht der einzelnen Prüfserien und der jeweils zugehörigen Parameter.

Tabelle 4.1: Prüfserien

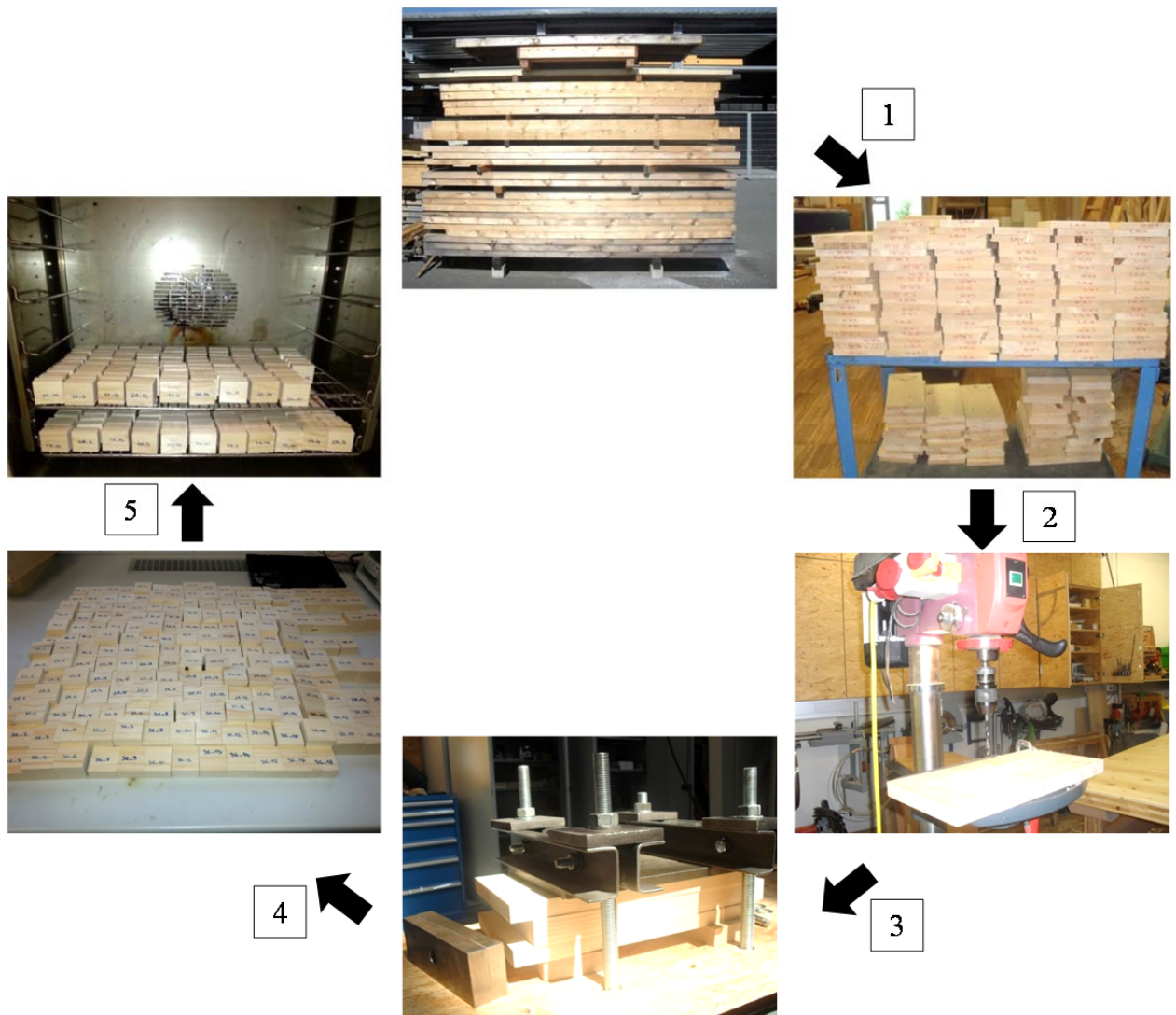
Bezeichnung der Prüfserie	Durchmesser $d$ [mm]	Vorlast [N]	Anzahl der Prüfungen [-]
12_G_0_xx	12	0	10
12_G_1_xx	12	1000	10
12_G_2_xx	12	2000	10
12_G_3_xx	12	4000	10
8_G_0_xx	8	0	10
8_G_1_xx	8	1000	10
8_G_2_xx	8	2000	10
8_G_3_xx	8	4000	10
12_R_2_xx	12	2000	10
8_R_2_xx	8	2000	10
12_E_2_xx	12	2000	10

## 4-4 MATERIAL

Im Folgenden werden sowohl das verwendete Holz und die eingesetzten Stabdübel, als auch die Funktionsweise der Messschraube näher beschrieben.

### 4-4.1 HOLZ

Für die durchgeführten Prüfungen wurde die Holzart Fichte (*Picea abies*) gewählt. Im Laufe der Vorbereitung, Prüfung und Nachbereitung durchliefen die einzelnen Holzelemente mehrere Schritte. Um den „Holzweg“ von der 4 m langen Bohle bis hin zum kleinen Probenwürfeln leichter erklären zu können, wurde ein entsprechendes Ablaufdiagramm erstellt (siehe Abbildung 4.5).



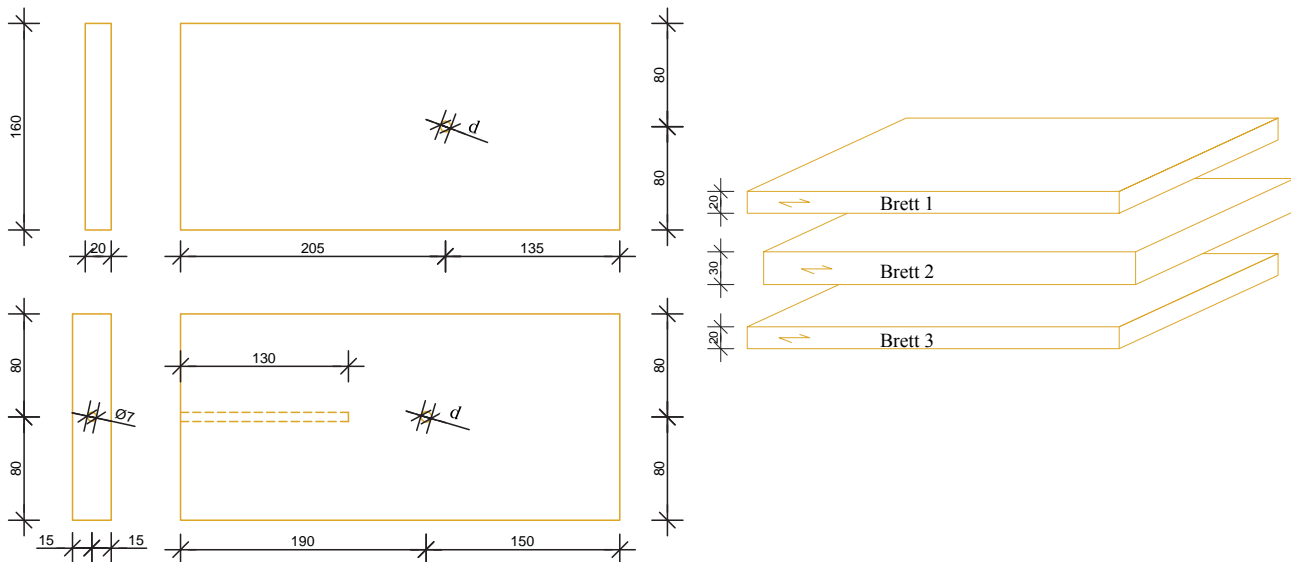
**Abbildung 4.5: Bearbeitungsprozess Holz**

Um den Einfluss der Rohdichte auf die Prüfergebnisse so gering als möglich zu halten, wurden zunächst 36 Bohlen (80 mm × 240 mm × 4000 mm) gewogen und entsprechend ihrem Gewicht sortiert.

Da alle Bretter die gleichen Abmessungen aufwiesen, war es möglich, die Rohdichte über deren Gewicht auszurechnen. Von diesen Bohlen wurden jene 13 Stück, deren Rohdichten am wenigsten von der mittleren Rohdichte abwichen, für die weitere Verarbeitung ausgewählt. Die Rohdichte der ausgewählten

Bohlen befand sich im Bereich zwischen  $\sim 420 \text{ kg/m}^3$  und  $\sim 440 \text{ kg/m}^3$ . Die Holzfeuchte wurde stichprobenartig mit der Hydromette M 4050 der Firma GANN gemessen. Die niedrigste gemessene Holzfeuchte betrug 13,7 % und die höchste 22,5 %. Diese hohen und stark voneinander abweichenden Messergebnisse lassen sich durch die vorige Lagerung im Freien erklären.

In einem weiteren Bearbeitungsschritt wurden nun die einzelnen Prüfkörper gefertigt (Abbildung 4.6, Schritt 1).



**Abbildung 4.6: Abmessungen der Prüfkörper**

Nach dem Zuschnitt bekam jedes Brett eine Beschriftung, welche sich aus der Nummer der Ausgangsbohle sowie einer laufenden Stücknummer zusammensetzte. Auf diese Weise wurde bei der Zusammenstellung der Prüfkörper eine heterogene Durchmischung der einzelnen Bretter sichergestellt.

Im Anschluss wurden die Prüfkörper mehrere Wochen im Normklima (lt. ON ISO 554 [39]  $20^\circ$  Raumtemperatur und 65% relative Luftfeuchte) gelagert.

Kurz vor den Prüfungen erfolgte das Vorbohren der notwendigen Löcher (vergl. Abbildung 4.5, Schritt 2). Die Stabdübellöcher wurden mit dem gleichen Durchmesser wie die zu prüfenden Stabdübel vorgebohrt. Um ein Aufspalten des mittleren Brettes (Brett 2) beim Eindrehen der Messschraube zu vermeiden, mussten die Löcher für die Messschraube mit einem Durchmesser von 7 mm ebenfalls vorgebohrt werden (siehe Abbildung 4.6).

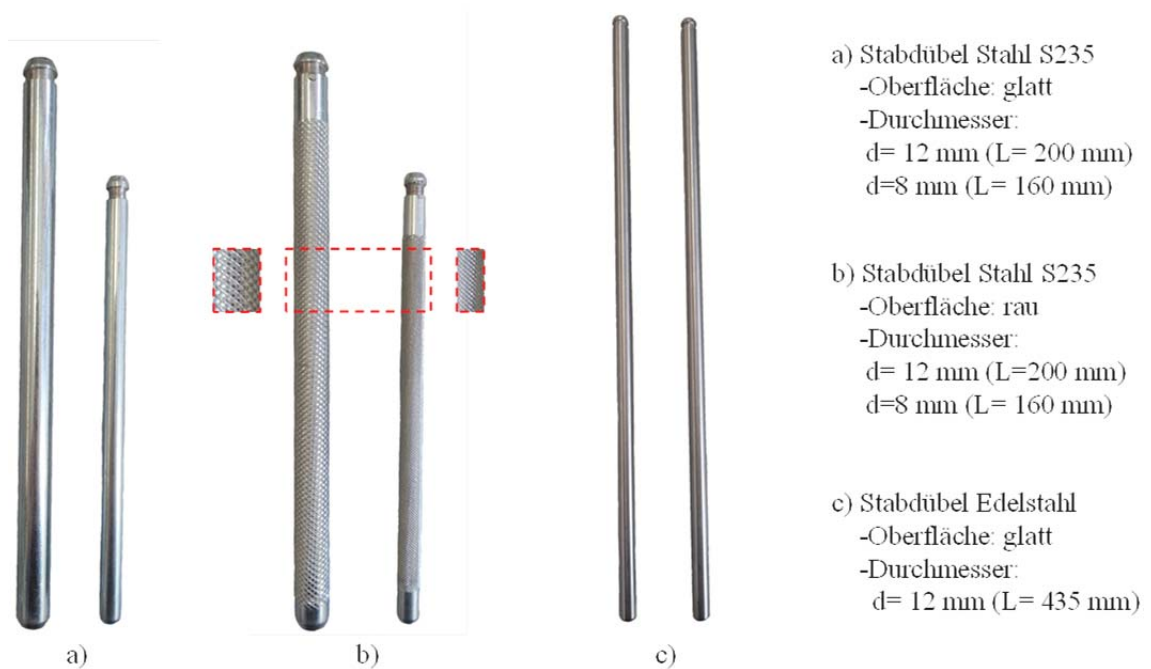
Für die Bestimmung der Holzfeuchte nach ON EN 13183-1 [40] wurde nach Abschluss der Prüfungen (vergl. Abbildung 4.5, Schritt 3) aus jedem Brett und möglichst knapp neben dem Dübelloch, eine Darrprobe entnommen (vergl. Abbildung 4.5, Schritte 4 und 5). Diese Kleinproben hatten eine Abmessung von  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  bzw.  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ .



## 4-4.2 STABDÜBEL

Bei den Prüfungen wurden galvanisch verzinkte Stabdübel (Stahl S235) mit den handelsüblichen Durchmessern von 8 mm und 12 mm sowie Stabdübel aus Edelstahl mit einem Durchmesser von 12 mm benutzt. Um den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf den Reibungsbeiwert zu überprüfen, wurden einige der galvanisch verzinkten Stabdübel durch rändeln mit einer Rautenstruktur versehen; vergleiche Abbildung 4.7 (a) und (b).

Um die Einleitung der Prüfkraft in die Stabdübel zu ermöglichen, wurde abschließend bei allen Stabdübeln eine am oberen Ende befindliche Nut eingefräst (siehe auch Abschnitt 4-2). In Abbildung 4.7 sind alle Variationen der eingesetzten Stabdübel ersichtlich.



**Abbildung 4.7: verwendete Stabdübel: a) Oberfläche: glatt; b) Oberfläche: rau; c) Stabdübel aus Edelstahl**

### 4-4.3 MESSSCHRAUBE

Die, bei den Prüfungen, verwendeten Messschrauben wurden von Wolfthaler im Rahmen seiner Masterarbeit [41] entwickelt (siehe Abbildung 4.8).

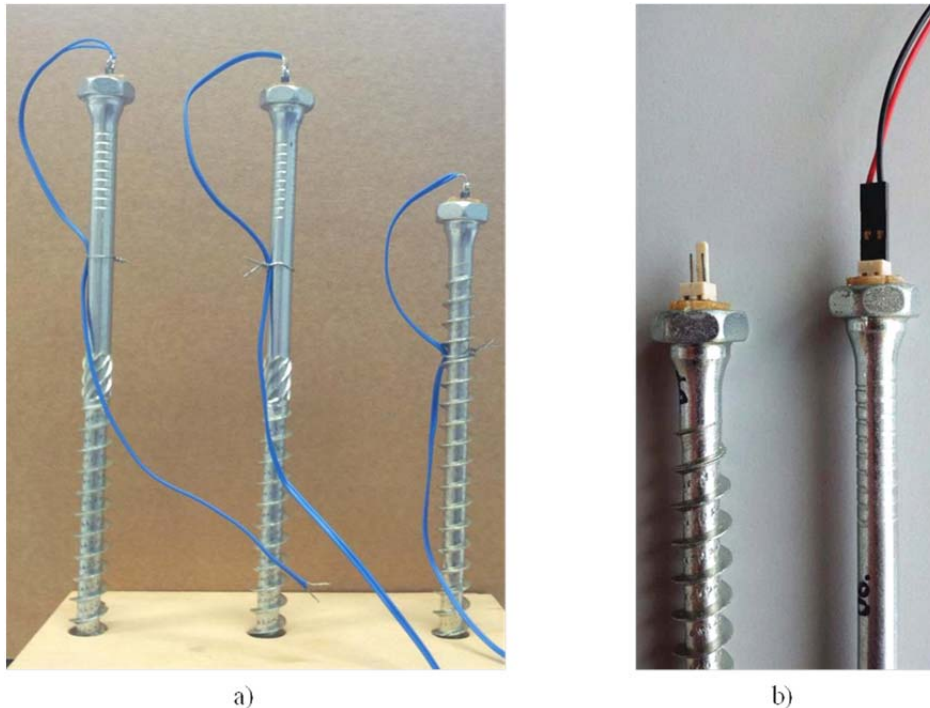


Abbildung 4.8: unterschiedliche Typen von Messschrauben mit: a) fixer Verkabelung und b) Stecksystem [41]

Der Herstellungsprozess einer Messschraube beginnt mit dem axialen Aufbohren einer herkömmlichen selbstbohrenden Holzschraube. In diese Bohrung werden spezielle, temperaturkompensierende Dehnmessstreifen (DMS) eingeklebt (siehe Abbildung 4.9). Für die auch in dieser Arbeit eingesetzten Prototypen, verwendete Wolfthaler [41] die Holzschrauben Assy 3.0 Kombi 12 × 200 mm bzw. 12 × 160 mm von der Firma Adolf Würth GmbH & Co KG.

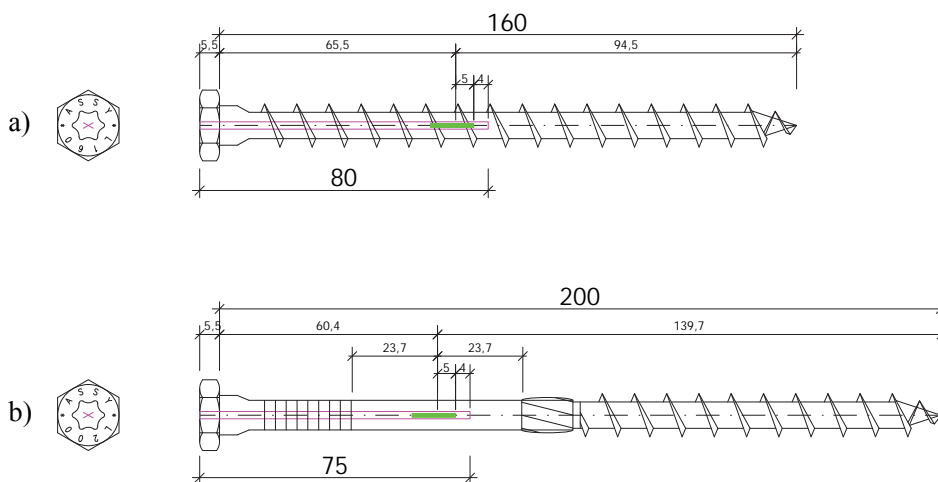


Abbildung 4.9: a) Voll - und b) Teilgewinde Messschraube-Prototypen [41]

Nach der Herstellung wurde jede Messschraube für Zugbeanspruchungen im elastischen Bereich kalibriert. Im Rahmen der Kalibrierungsprüfungen ermittelte Wolfthaler [41] für jede Messschraube eine

spezifische Spannungsänderungs-Kraft-Beziehung in Form einer Regressionsgerade. Mit dieser konnte wiederum ein Umrechnungsfaktor zwischen der Spannungsänderung, welche durch die Dehnungsänderung im DMS ermittelt wurde, und der Kraft in der Messschraube berechnet werden [41].

Eine detaillierte Beschreibung des Herstellungsprozesses sowie weitere mögliche Einsatzbereiche von Messschrauben sind in der Masterarbeit von Wolthaler [41] zu finden.

## 4-5 BESTIMMUNG DER TRAGFÄHIGKEITEN

Im Rahmen dieser Arbeit sollte ausschließlich der Einfluss der Reibung auf den Widerstand gegen das Herausziehen eines Stabdübels untersucht werden. Demzufolge musste sichergestellt werden, dass sich der Stabdübel durch die aufgebrachte Scherbeanspruchung nicht verformt und die dadurch auftretenden geometrischen Zwängungen die Messergebnisse nicht beeinflussen.

Zusätzlich zu der Tragfähigkeit der Stabdübelverbindung musste auch die Tragfähigkeit der Messschraube, mit welcher die Scherbeanspruchung aufgebracht werden sollte, überprüft werden. Danach konnten sowohl die maximale als auch die restlichen zwei Scherlaststufen festgelegt werden.

### 4-5.1 TRAGFÄHIGKEIT DER STABDÜBELVERBINDUNG

Zur Überprüfung der Tragfähigkeit der Stabdübelverbindung, wurden die Tragfähigkeitsgleichungen für einer zweischnittigen Holz-Holz-Verbindung nach EC5 [1] verwendet (siehe Abbildung 4.10).

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d & (g) \\ 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d & (h) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (j) \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \left[ \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (k) \end{cases}$$

Abbildung 4.10: Tragfähigkeitsgleichungen für eine zweischnittige Hol-Holz-Verbindung nach [1]

Wie schon im Abschnitt 4-4.1 erwähnt, wurden die Prüfkörper aus Fichtenbohlen mit einer Rohdichte von  $\sim 420 \text{ kg/m}^3$  bis  $\sim 440 \text{ kg/m}^3$  gefertigt. Die in der Berechnung eingesetzte Rohdichte betrug demzufolge  $420 \text{ kg/m}^3$ .

Die benötigte Lochleibungsfestigkeit in Faserrichtung  $f_{h,0,k}$  wurde nach Gleichung (4.1) berechnet.

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \rho_k \quad (4.1)$$

In den Tragfähigkeitsgleichungen ist mit  $\beta$  das Verhältnis zwischen den Lochleibungsfestigkeiten der beteiligten Holzelemente ausgedrückt. Durch die bereits beschriebenen Vorbereitungen konnte davon ausgegangen werden, dass für  $\beta$  der Wert 1,0 angesetzt werden kann (siehe Gleichung (4.2)).

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \approx 1,0 \quad (4.2)$$

Die Ermittlung des Fließmomentes erfolgte nach Gleichung (4.3). Da jedoch keine gesonderten Zugversuche an den eingesetzten Stabdübeln durchgeführt wurden, musste dabei die Zugfestigkeit der Stabdübel mit  $f_{u,k} = 360 \text{ N/mm}^2$  (charakteristischer Wert für die Stahlgüte S235) angenommen werden.

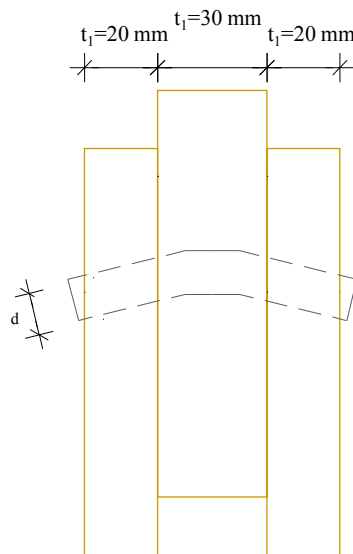
$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (4.3)$$

Wie im EC5 [1] festgeschrieben, wurde der Anteil des Seileffektes nicht berücksichtigt. Die so berechneten Tragfähigkeiten für die zu variierenden Durchmesser (8 mm und 12 mm) sind in Tabelle 4.2 angeführt.

**Tabelle 4.2: Tragfähigkeit der Verbindung mit einem Stabdübel**

$d$ [mm]	$f_{h,a,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$M_{y,Rk}$ [Nmm]	$F_{V,Rk}$ (pro Scherfuge) [N]	$F_{V,Rk}$ (gesamt) [N]	Versagensmechanismus
8	31,68	24068,98	2869,11	5738,21	j
12	30,31	69070,88	5382,06	10764,13	j

Die Berechnung der Tragfähigkeiten zeigte, dass sowohl bei  $d = 8$  mm als auch bei  $d = 12$  mm die Verbindung durch den Versagensmechanismus (j) bzw. durch die Bildung eines Fließgelenkes im Mittelholz, versagt (siehe Abbildung 4.11). Demzufolge wurde für die Festlegung der maximalen Scherbeanspruchung die Tragfähigkeit der Verbindung mit dem Durchmesser  $d = 8$  mm ( $F_{V,Rk,Gesamt} = 5,74$  kN) als maßgebende genommen.



**Abbildung 4.11: Versagensmechanismus j**

## 4-5.2 TRAGFÄHIGKEIT DER MESSSCHRAUBE

Die Berechnung des Ausziehwerstandes der eingesetzten Messschrauben (Assy 3.0 Kombi 12 × 200 mm bzw. 12 × 160 mm) erfolgte in Anlehnung an die Zulassung ETA-11/0190 [42] (siehe Gleichung (4.4)).

$$F_{ax, \alpha, Rk} = k_{ax} \cdot f_{ax, k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \left( \frac{\rho_k}{350} \right)^{0,8} \quad (4.4)$$

$$k_{ax} = 0,3 + \frac{0,7 \cdot \alpha}{45} \quad \text{bei } 0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ \quad (4.5)$$

mit

$F_{ax, \alpha, Rk}$  ..... charakteristischer Ausziehtragfähigkeit einer Schraube bei einem Winkel  $\alpha$  zur Faserrichtung in [N]

$k_{ax}$  ..... Faktor, der den Winkel  $\alpha$  zwischen Schraubenachse und Faserrichtung berücksichtigt in [-]

$f_{ax, k}$  ..... charakteristischer Ausziehparameter bei einer charakteristischen Rohdichte des Holzbauteils von 350 kg/m<sup>3</sup> in [N/mm<sup>2</sup>]

$l_{ef}$  ..... Einbindtiefe der Schraube im Holzbauteil in [mm]

Tabelle 4.3 zeigt sowohl die Eingangsparameter als auch den berechneten Ausziehwerstand der eingesetzten Messschraube.

**Tabelle 4.3: Ausziehwerstand einer Teilgewinde- Messschraube**

$d$ [mm]	$n_{ef}$ [-]	$k_{ax}$ [-]	$f_{ax, k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$l_{ef}$ [mm]	$\rho_k$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{ax, \alpha, Rk}$ [N]
12	1	0,3	10	100	420	4165

Bei den Prüfungen wurden sowohl Voll- als auch Teilgewinde-Messschrauben verwendet. Allerdings hatten die eingesetzten Vollgewindeschrauben eine größere Einbindtiefe ( $l_{ef}$ ) und somit einen höheren Ausziehwerstand. Aus diesem Grund wurde der Ausziehwerstand der Teilgewindeschraube ( $l_{ef} = 100$  mm) entscheidend.

Aus Tabelle 4.2 und Tabelle 4.3 lässt sich erkennen, dass für die Festlegung der maximalen Scherbelastung der Ausziehwerstand der Messschraube maßgebend war. Die Laststufen wurden schlussendlich mit  $F_{Vor,1} = 1000$  N,  $F_{Vor,2} = 2000$  N und  $F_{Vor,3} = 4000$  N definiert.

Demzufolge war die scherbeanspruchte Stabdübelverbindung bei maximaler Vorlast lediglich zu rund 70 % ausgelastet wodurch eine wesentliche Verformung des Stabdübels nicht zu erwarten war.

## 4-6 PRÜFDURCHFÜHRUNG

Die Durchführung der Prüfungen erfolgte an der Universalprüfmaschine lignum\_uni\_275 (siehe Abbildung 4.12 a)) am Lignum Test Center des Institutes für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz. Die Messung der Kraft in der Messschraube erfolgte mit dem Messverstärker QuantumX MX840A (siehe Abbildung 4.12 b)) und der Messtechnik-Software Catman der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.



**Abbildung 4.12: a) Universalprüfmaschine; b) Messverstärker QuantumX MX840A und MX410A [41]**

Mit Ausnahme der Referenzserien, bei welchen keine Messschraube verwendet wurde, erfolgte die Prüfdurchführung bei jeder Prüfserie auf die gleiche Weise.

Zuerst erfolgte die Zusammenstellung der einzelnen Prüfkörperteile (vergleiche Abbildung 4.1). Nach dem Eindrehen der Messschraube wurden die Prüfkörper beschriftet und so ausgerichtet, dass sich der zu prüfende Stabdübel zentrisch unter der Traverse der Prüfmaschine befand. Danach erfolgte die Befestigung der Prüfkörper auf dem Basisträger der Prüfmaschine. Abschließend wurde noch die Messschraube an den Messverstärker angeschlossen.

Da bei den Prüfungen der Auszieh Widerstand eines Stabdübels einer zweischnittigen Holz-Holz-Verbindung untersucht wurde, war es möglich die Prüfung zu beenden, sobald der Stabdübel aus dem unteren Seitenholz herausgezogen war. Demzufolge wurde als automatisches Prüfende eine Verschiebung des Stabdübels von 35 mm (~ Überstand von 12 mm + 20 mm Brettstärke des Seitenholzes) voreingestellt. Danach erfolgte die Aufbringung der Scherbeanspruchung auf den Prüfkörper. Die Messschraube wurde hierfür mit einem Maulschlüssel solange langsam angezogen bis sie die geplante Vorlast erreicht hatte und weitestgehend auch halten konnte. Insbesondere der letzte Punkt war aufgrund von auftretenden Kriecheffekten mitunter recht schwierig zu erfüllen. Die Erfahrungen aus den ersten Prüfungen zeigten jedoch, dass das Aufbringen einer zunächst etwas höheren Scherbeanspruchung (rund 4000 N) und die anschließende Reduktion auf die geplante Vorlast gewisse Vorteile mit sich brachte.

Schließlich konnte die Prüfung gestartet werden, wobei die Prüfgeschwindigkeit für das Herausziehen des Stabdübels bei allen Prüfserien mit 10 mm/min festgelegt wurde.

Nach dem Ende der Prüfung erfolgte der Ausbau des Prüfkörpers sowie die Vorbereitung für die nächste Prüfung. Um die Gültigkeit der Prüfergebnisse sicherzustellen, wurde nach jeder Prüfung kontrolliert, ob der verwendete Stabdübel Verformungen aufwies. Sofern dies nicht der Fall war, konnte derselbe Stabdübel auch für die nächste Prüfung eingesetzt. Da der mehrmalige Einsatz des gleichen Stabdübels jedoch zu einer Veränderung der Rauheit der Oberfläche führen kann, wurden diese – auch wenn keine Verformungen festgestellt werden konnten – nach maximal fünf Prüfungen ausgewechselt.

Bei den Stabdübeln mit rauer Oberfläche kam es während der Prüfung zu einer Ansammlung von Holzfaser in der aufgerauten Oberfläche (siehe Abbildung 4.13). Um auch diese Stabdübel für mehrere Prüfungen einsetzen zu können, wurden die Verunreinigungen nach jeder Prüfung mit einer Drahtbürste wieder entfernt.



**Abbildung 4.13: Holzfaser in rauer Oberfläche nach der Prüfung**

Erwähnenswert ist noch der Umstand, dass das Eintreiben der Stabdübel je nach Durchmesser und Oberflächenbeschaffenheit mit unterschiedlichem Kraftaufwand verbunden war. Insbesondere die Stabdübel mit einem Durchmesser von 8 mm ließen sich nur schwer in die Verbindung einbringen.

Es muss ebenfalls auf folgende Punkte hingewiesen werden:

- Da bei den Referenzserien (8\_G\_0 und 12\_G\_0) der Stabdübel unbelastet war, zeigte das Stabdübelloch nach der Prüfung keine Veränderungen. Aus diesem Grund wurden die gleichen Bretter auch bei den Prüfserien 8\_G\_1 und 12\_G\_1 verwendet.
- Bei den Prüfungen kamen insgesamt 4 Messschrauben zur Verwendung. Dies war notwendig, da die empfindlichen Löt- bzw. Anschlussstellen der ausgetauschten Messschrauben während den Prüfvorbereitungen Schaden nahmen und somit keine Messung mehr erfolgen konnte.

Mit Ausnahme der Referenzserien, bei welchen keine Messschrauben zum Einsatz kamen, wurden von den eingesetzten Messsystemen für alle Prüfserien die folgenden Parameter aufgenommen:

- Prüfzeit [s]
- Traversenweg [mm]
- Kraft im Stabdübel [N]
- Kraft in der Messschraube [N]

Um die aufgebrachten Scherbeanspruchungen, die maximal erreichten Kräfte in den Stabdübeln sowie etwaig auftretende Besonderheiten oder Auffälligkeiten zu notieren, wurde zusätzlich zu den eigentlichen Messungen bei jeder Prüfung ein handschriftliches Protokoll geführt.





# KAPITEL 5: AUSWERTUNG UND DISKUSSION DER PRÜFERGEBNISSE

## 5-1 ALLGEMEIN

Das vorliegende Kapitel enthält einen Überblick zu den Auswertungen sowie die Diskussion der aus den Prüfungen erhaltenen Auszieh Widerstände der Stabdübel und der berechneten Reibungsbeiwerte. Die Auswertung erfolgte mit dem Computerprogramm Microsoft® Excel (2010).

## 5-2 AUSZIEHWIDERSTAND DER STABDÜBEL

Für die Auswertung des Auszieh Widerstandes war eine Korrektur des Traversenwegs bzw. die Festlegung des Auswertebereiches notwendig. Als Kriterium für den ersten Auswertepunkt wurde eine konstante Traversenwegdifferenz festgelegt welche händisch bei jeder einzelnen Auswertedatei eingestellt werden musste. Abbildung 5.1 zeigt einige typische Kraft-Weg-Diagramme der untersuchten Serien wobei deutlich erkennbar ist, dass die Kraft-Weg-Verläufe durch die Variation der Parameter „Vorlast“ und „Oberfläche“ wesentlich beeinflusst wurden.

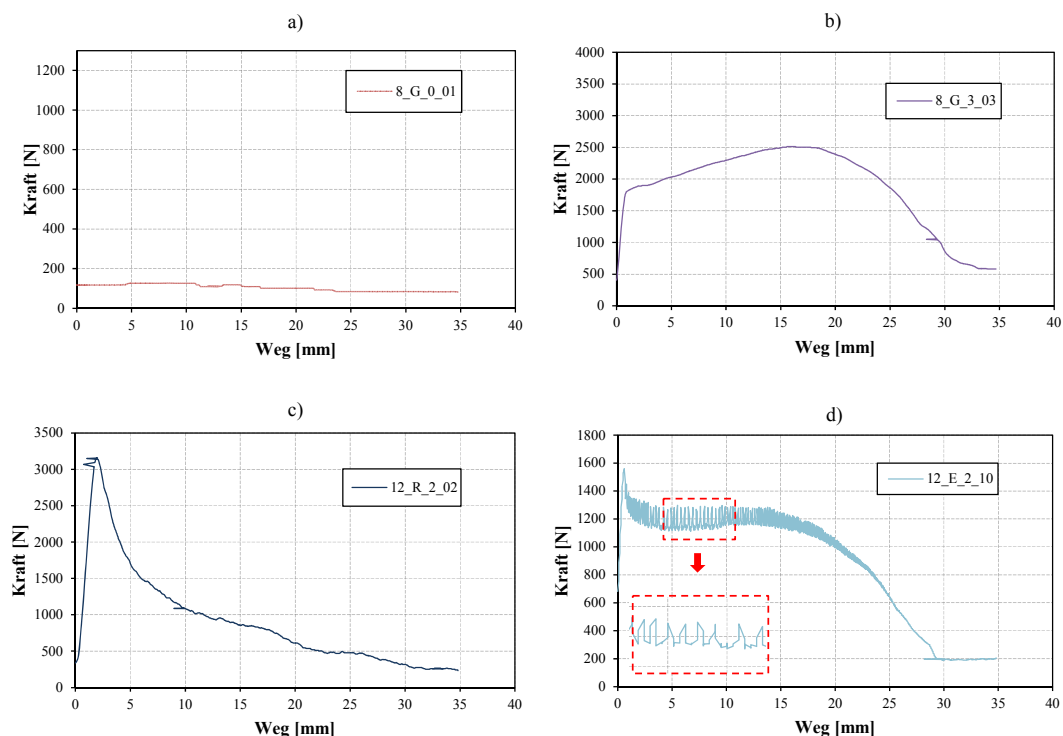


Abbildung 5.1: typische Kraft-Weg-Verläufe: a) Referenzserie, b) Stabdübeloberfläche glatt, c) Stabdübeloberfläche rau, d) Stabdübel aus Edelstahl

Abbildung 5.1a) zeigt exemplarisch einen Kraft-Weg-Verlauf für die Referenzprüfserien, bei welchen keine Vorlasten aufgebracht wurden. Hierbei lässt sich ein annähernd konstanter bzw. leicht abfallender Verlauf erkennen. Wie erwartet, waren die aufgezeichneten Auszieh Widerstände der Stabdübel bei dieser Prüfserie relativ gering (siehe auch Abschnitt 5-2.1).

Der in Abbildung 5.1b) dargestellte Kraft-Weg-Verlauf trat bei Prüfserien mit belasteten Stabdübeln mit glatter Oberfläche auf. Er ist durch einen langsam steigenden Auszieh Widerstand bis zum Erreichen des maximalen Wertes und einem darauffolgenden Lastabfall gekennzeichnet. Diese Kraftverläufe sind bei beiden geprüften Durchmessergruppen zu finden und erheblich durch den Kraftverlauf der Messschraube beeinflusst.

Im Unterschied zu den Kraftverläufen der Stabdübel mit glatter Oberfläche weisen die Kraftverläufe von rauen Stabdübeln andere Eigenschaften auf. Wie sich aus Abbildung 5.1 c) erkennen lässt, zeigt der Kraftverlauf gleich am Anfang einen steilen, fast senkrechten, Anstieg bis zum Erreichen des Maximums. Danach folgt ein plötzlicher Abfall des Auszieh Widerstandes. Dieses Verhalten hat seinen Ursprung im größeren Einfluss der Haftreibung, welcher durch die raue Oberfläche begünstigt wurde.

Im Gegensatz zu den bisher erklärten Kraftverläufen, zeigt der in Abbildung 5.1 d) dargestellte Verlauf ein stoßartiges Verhalten. Nach dem Erreichen des maximalen Auszieh Widerstandes kam es zu einem kurzen Gleiten des Stabdübels mit gleichzeitigem Abfall des Auszieh Widerstandes. Im Anschluss stieg der Auszieh Widerstand wieder ein wenig bis zum Eintreten einer neuerlichen Gleitphase. Wie in Abbildung 5.1 d) zu erkennen ist, konnte der am Anfang gemessene Auszieh Widerstand aber nicht mehr erreicht werden.

Die in Abbildung 5.1 dargestellten Kraft-Weg-Verläufe waren jedoch nicht bei allen Prüfungen zu finden. Einige Prüfergebnisse zeigten auffällig höhere oder kleinere Widerstände des Stabdübels gegen Herausziehen.

Die Bereinigung von solchen „Ausreißen“ erfolgte in zwei Schritten. Das handschriftliche, während der Prüfungen geführte, Protokoll wurde als erstes Bereinigungskriterium herangezogen. Beispielsweise wurden Prüfungen bei welchen Verformungen des Stabdübels nicht sicher ausgeschlossen werden konnten bei der Auswertung nicht weiter berücksichtigt. Von den insgesamt 110 durchgeführten Prüfungen wurden auf diese Weise 4 Datensätze ausgeschlossen.

Die verbleibenden Datensätze jeder Serie wurden anschließend hinsichtlich ihrer Lage zum Median beurteilt. Lag ein Wert außerhalb des Interquartil-Bereichs (IQR) plus/minus des 1,5-fachen IQR, wurde dieser bei den weiteren Untersuchungen ebenfalls nicht berücksichtigt.

Jene Prüfungen, welche durch keines der beiden Bereinigungskriterien betroffen waren (84 von insgesamt 90 Datensätzen (ohne Referenzserien)), wurden für die Berechnung der Reibungsbeiwerte eingesetzt.

## 5-2.1 VERGLEICH DER AUSZIEHWIDERSTÄNDE

In Abbildung 5.2 ist ein Vergleich der Auszieh Widerstände von allen Prüfserien mit dem Durchmesser  $d = 8$  mm dargestellt. Abbildung 5.3 zeigt denselben Vergleich für Stabdübel mit einem Durchmesser von 12 mm.

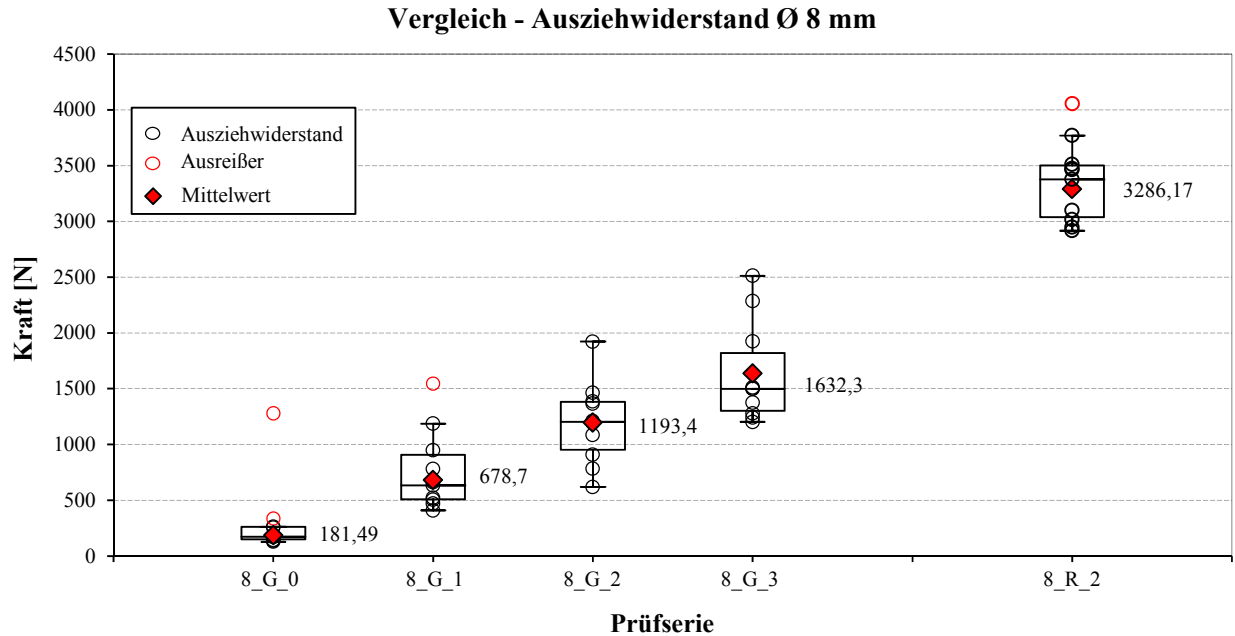


Abbildung 5.2: Vergleich der Auszieh Widerstände, Prüfserien mit dem Durchmesser  $d = 8$  mm

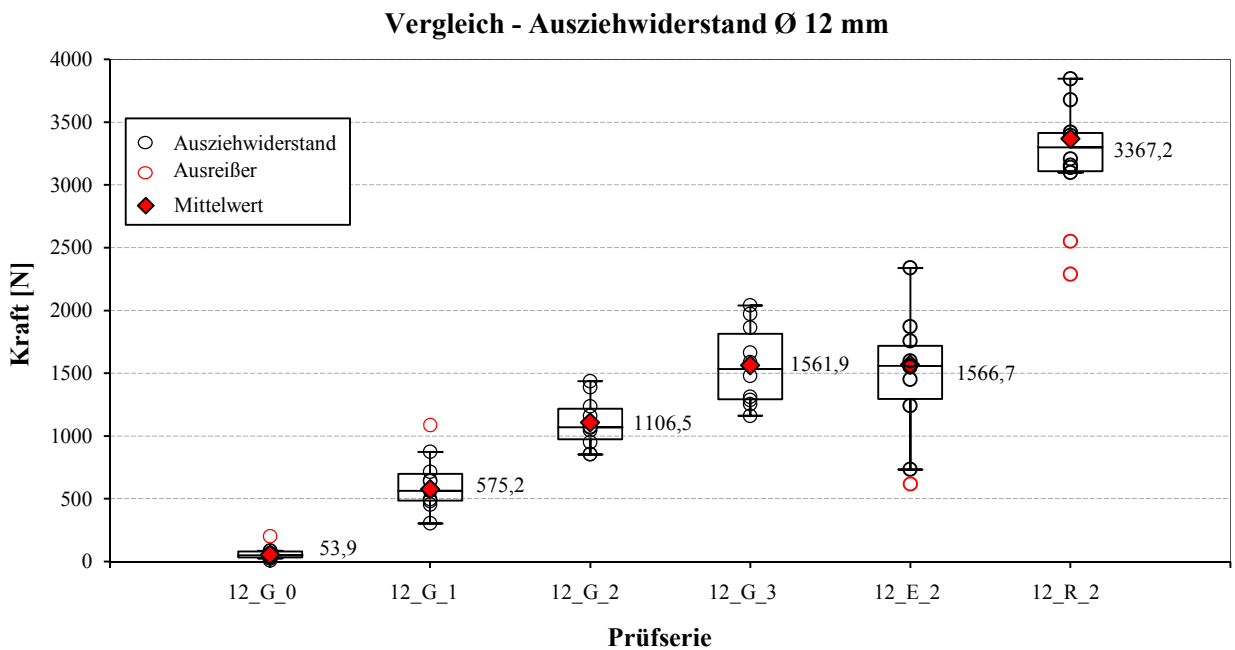


Abbildung 5.3: Vergleich der Auszieh Widerstände, Prüfserien mit dem Durchmesser  $d = 12$  mm

In Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3 sind mit den Bezeichnungen 8\_G\_0 und 12\_G\_0 die Referenzserien bzw. Prüfserien ohne Vorlasten dargestellt. Wie klar zu erkennen ist, bieten auch unbelastete Stabdübel

einen gewissen Auszieh widerstand. Der in Abschnitt 4-6 erwähnte höhere Kraftaufwand beim Einbringen der Stabdübel mit Durchmesser 8 mm, spiegelt sich dabei in den etwas höheren Auszieh widerstandswerten der Referenzprüfserie 8\_G\_0 im Vergleich zu der Referenzprüfserie 12\_G\_0 wider. Im Wesentlichen hängen diese Kennwerte jedoch von der Passgenauigkeit der Bohrung ab und liegen deutlich unter jenen von belasteten Stabdübeln. Dies ist auch in Abbildung 5.4 ersichtlich, wo der prozentuale Anteil des Auszieh widerstandes der Referenzprüfserie bezogen auf die jeweiligen Auszieh widerstände der einzelnen Prüfserien mit Vorlast dargestellt ist.

In diesem Zusammenhang sei noch erwähnt, dass bei dem hier vorgestellten Prüfprogramm ein möglicher Einfluss der Holzfeuchte, durch die kurze Zeitspanne zwischen dem Bohren der Löcher und der Prüfdurchführung, vermieden wurde.

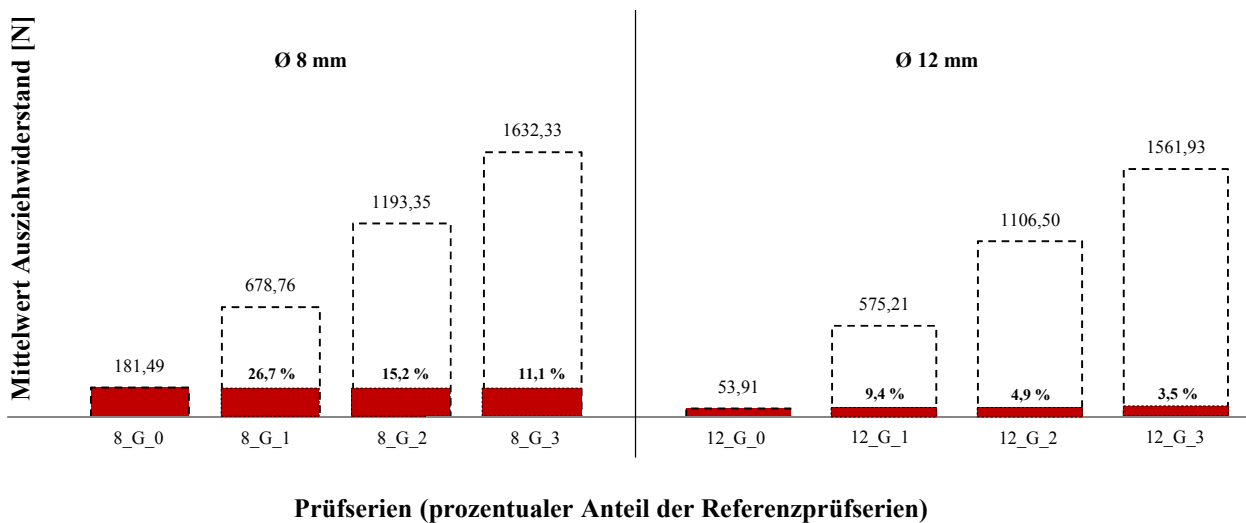


Abbildung 5.4: Vergleich des Auszieh widerstandes der Referenzprüfserien mit den Prüfserien mit Vorlast

Aus Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3 ist auch ersichtlich, dass der Auszieh widerstand bei beiden Durchmessergruppen mit glatter Oberfläche nahezu linear mit der aufgebrauchten Scherbeanspruchung steigt. Des Weiteren zeigt die Prüfserie mit Edelstahl-Dübeln einen höheren mittleren Auszieh widerstand im Vergleich zum mittleren Auszieh widerstand der Prüfserie mit Stabdübeln aus herkömmlichem Stahl mit glatter Oberfläche (vergleiche Abbildung 5.3, Prüfserien 12\_G\_2 und 12\_E\_2).

Aus Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3 lässt sich ebenfalls ablesen, dass die rauen Stabdübel im Vergleich zu den glatten Stabdübeln bei gleicher Vorlaststufe einen markant höheren Auszieh widerstand besitzen. Dies kann auf die Oberflächenbeschaffenheit des Stabdübels und den dadurch erhöhten Reibungsbeiwert zwischen dem Stabdübel und dem umgebenden Holz zurückgeführt werden und wird in den folgenden Abschnitten näher erklärt.

Die einzelne Kraft-Weg-Verläufe von allen Prüfungen sowie die tabellarische Darstellung der Auszieh widerstände sind Kapitel 6: ANHANG B zu entnehmen.

## 5-3 REIBUNGSBEIWERTE

Wie schon im Abschnitt 3-2 beschrieben und aus Gleichung (5.1) ersichtlich, ist der Reibungsbeiwert als Verhältnis zwischen der wirkenden Normalkraft und der Reibungskraft definiert.

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} \quad (5.1)$$

$F_R$	Reibungskraft in [N]
$F_N$	Normalkraft (Anpresskraft) in [N]
$\mu$	Reibungsbeiwert [-]

Um aus den Prüfdaten die entsprechenden Reibungsbeiwerte zu ermitteln, wurde der Auszieh Widerstand des Stabdübels als die Reibungskraft sowie die doppelte Kraft in der Messschraube als Anpresskraft in Gleichung (5.1) eingesetzt. Dies lässt sich dadurch begründen, dass neben der durch die Messschraube aufgebrachten Kraft im Mittelholz, auch die entsprechenden Reaktionskräfte in den Seitenhölzern Reibungskräfte am Stabdübel aktivieren (vergl. Abbildung 4.3b)).

Dies bedeutet, dass der Reibungsbeiwert zu jedem beliebigen Zeitpunkt der Prüfung als Quotient des Auszieh Widerstandes und der Kraft in der Messschraube zum jeweiligen Zeitpunkt dargestellt werden kann.

Die in Abbildung 5.5 exemplarisch dargestellten Kraft-Zeit-Diagramme, zeigen die zeitabhängige Veränderung der Kraft in der Messschraube und des Auszieh Widerstandes des Stabdübels bei einem Stabdübel mit glatter (Abbildung 5.5a)) bzw. mit rauher (Abbildung 5.5b)) Oberfläche.

Ab dem Beginn der eigentlichen Prüfung (siehe rote Markierung in Abbildung 5.5) lässt sich in beiden dargestellten Fällen eine gewisse Übereinstimmung in den Kraft-Zeit-Verläufen der Messschraube bzw. des Stabdübels erkennen. Der Kraft-Zeit-Verlauf der Messschraube veranschaulicht dabei auch das Aufbringen der Kraft vor dem Prüfungsbeginn.

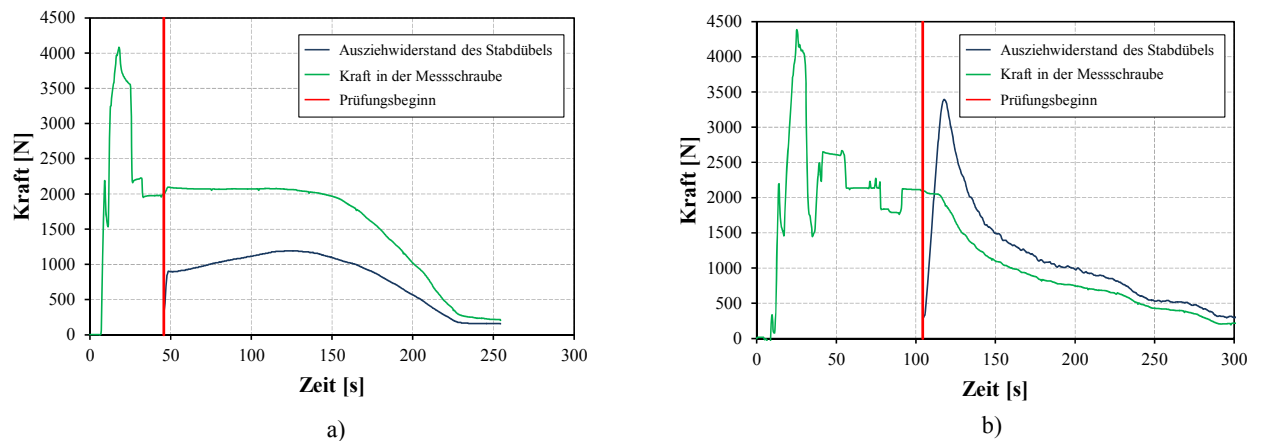
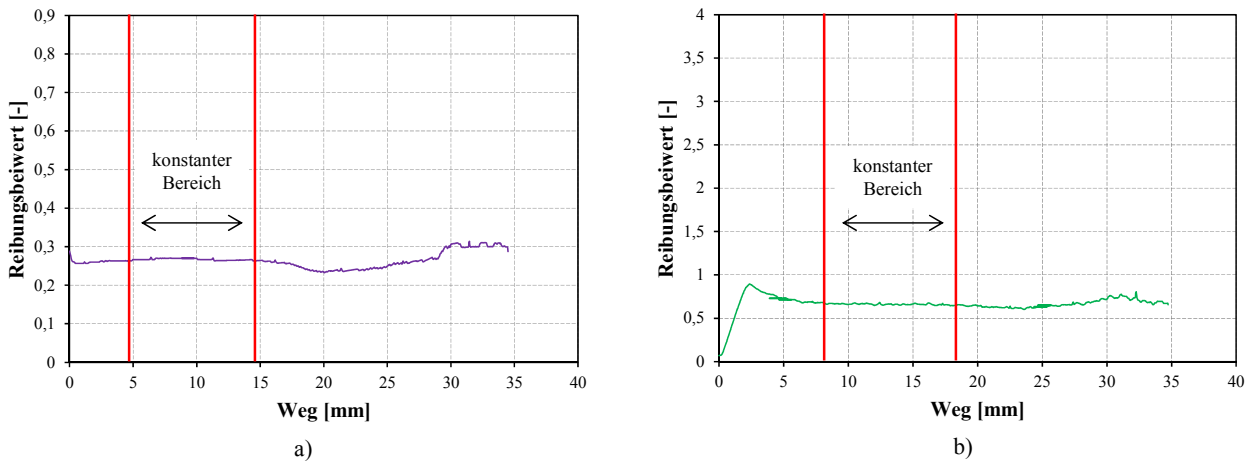


Abbildung 5.5: Kraft-Zeit-Diagramm : a) Stabdübel mit glatter Oberfläche, b) Stabdübel mit rauher Oberfläche

In Abbildung 5.6 sind die Reibungsbeiwert-Weg-Diagramme von Stabdübeln mit glatter (Abbildung 5.6a)) und mit rauher (Abbildung 5.6b)) Oberfläche dargestellt.



**Abbildung 5.6: Reibungsbeiwert-Weg-Verläufe mit markiertem konstanten Bereich: a) Stabdübeloberfläche glatt, b) Stabdübeloberfläche rau**

Dabei ist zu erkennen, dass der Verlauf der Reibungsbeiwerte – welcher nach Überwindung der Haftreibung theoretisch konstant sein müsste – an einigen Stellen starke Unregelmäßigkeiten aufweist. Für die Berechnung des Reibungsbeiwertes einer Prüfung wurde daher ein Bereich mit möglichst konstantem Verlauf ausgewählt und der Mittelwert der darin enthaltenen Reibungsbeiwerte gebildet. Demzufolge sind die für jede Prüfung angegebenen Reibungsbeiwerte keine definierten Einzelkenngrößen sondern spiegeln das Ergebnis eines gewissen Bereichs wider.

Da die ermittelten Werte natürlich stark vom gewählten Abschnitt abhängen, wurde für eine möglichst objektive Auswertung bestimmt, dass der untersuchte Bereich für alle Datensätze eine Länge von 10 mm aufweisen muss. Als maßgebender Abschnitt innerhalb eines betrachteten Reibungsverlaufs galt jener, in welchem die Differenz zwischen dem maximalem und minimalem Reibungsbeiwert ein Minimum erreichte. Des Weiteren wurde festgelegt, dass Prüfungen, deren minimale Differenzen einen Wert von 0,1 überschreiten, bei der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt werden; dieses Kriterium wurde für 5 Datensätze maßgebend.

Die Mittelwerte der berechneten Differenzen der Reibungsbeiwerte innerhalb der bestimmten Auswertebereiche pro Prüferie lagen zwischen  $\sim 0,02$  und  $\sim 0,03$  bei den Stabdübeln mit glatter Oberfläche und  $\sim 0,04$  bei den Stabdübeln mit rauher Oberfläche.

Die berechneten Reibungsbeiwerte wurden schlussendlich wie die maximalen Auszieh Widerstände bezüglich ihrer Lage zum Median beurteilt und Werte außerhalb des IQR plus/minus des 1,5-fachen IQR von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Von insgesamt 84 waren 7 Datensätze durch diese Ausreißerbereinigungen betroffen.

Die grafische Darstellung der einzelnen Reibungsbeiwert-Weg-Verläufe und die Tabellen mit Reibungsbeiwerten befinden sich in Kapitel 6: ANHANG B.

### 5-3.1 VERGLEICH DER REIBUNGSBEIWERTE

Im Folgenden werden die berechneten Reibungsbeiwerte einander gegenübergestellt. Wie auch bei den Auszieh Widerständen, wurden für die vergleichende Darstellung Boxplots verwendet. Die Berechnung der hier zusätzlich angegebenen charakteristischen Reibungsbeiwerte erfolgte nach ON EN 14358 [43].

Abbildung 5.7 zeigt dabei die Reibungsbeiwerte für die mit einem Durchmesser von 8 mm durchgeführten Prüfungen und Abbildung 5.8 jene für Prüfungen mit einem Durchmesser von 12 mm.

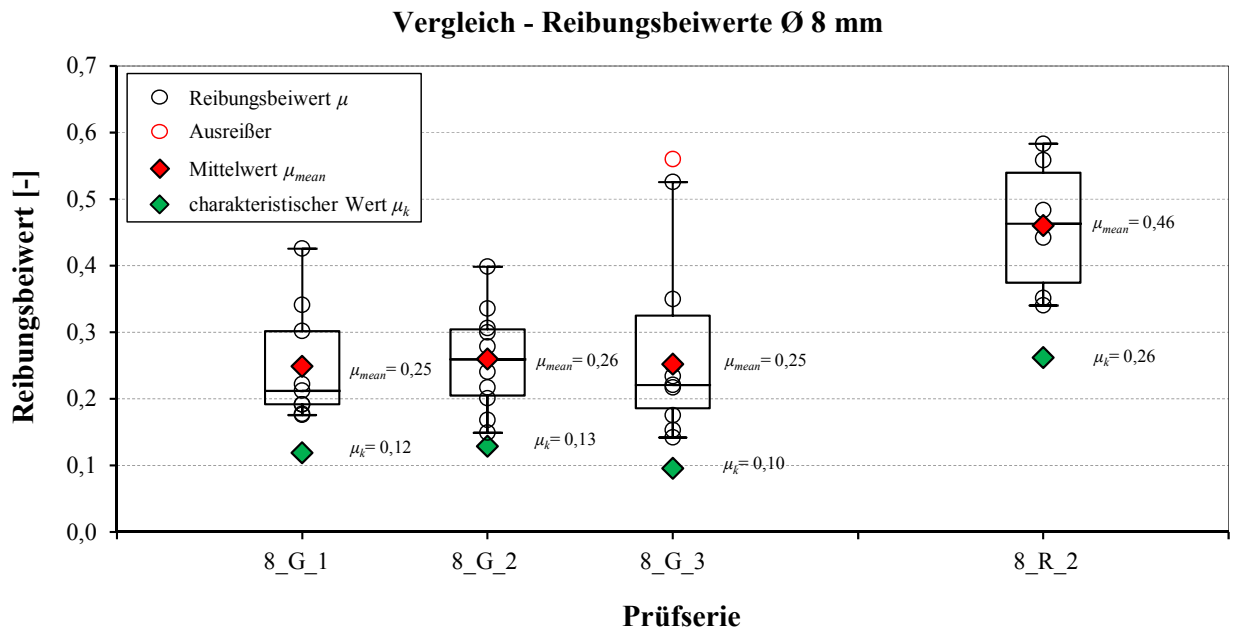


Abbildung 5.7: Vergleich der Reibungsbeiwerte, Prüfserien mit Durchmesser  $d = 8 \text{ mm}$

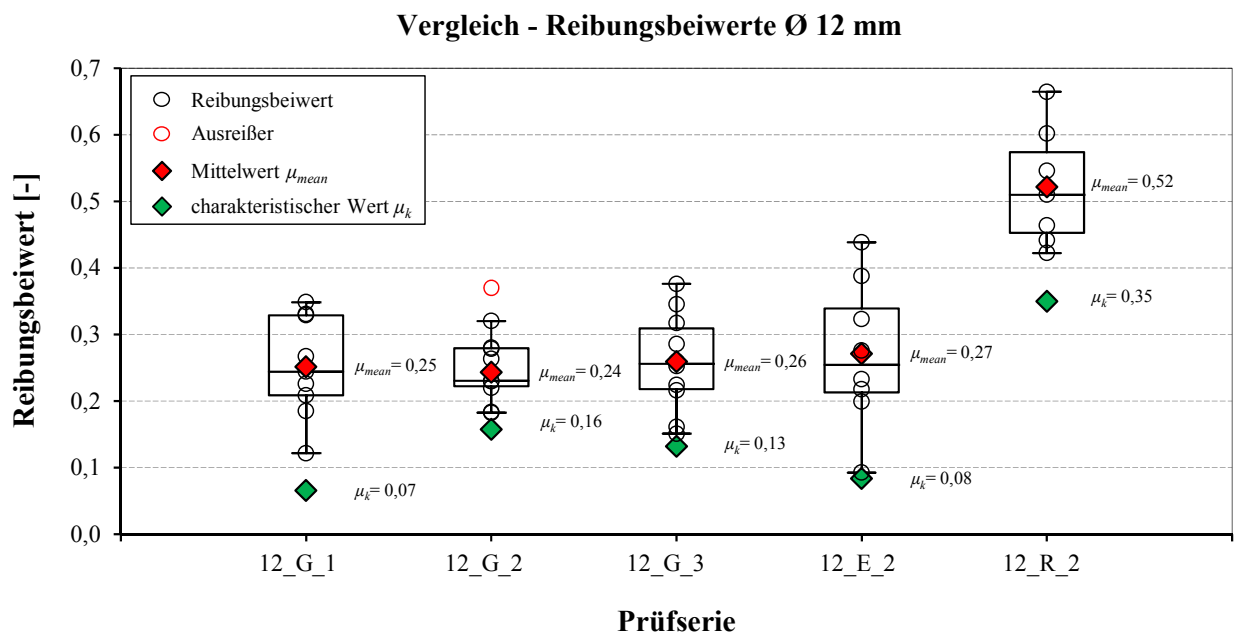


Abbildung 5.8: Vergleich der Reibungsbeiwerte, Prüfserien mit Durchmesser  $d = 12 \text{ mm}$

Wie aus Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8 ersichtlich, zeigen die mittleren Reibungsbeiwerte ( $\mu_{mean}$ ) der einzelnen Prüferien mit glatter Oberfläche und Stabdübeln aus einer Stahlgüte von S235, keine wesentlichen Unterschiede. Alle ermittelten Mittelwerte liegen zwischen  $\mu_{mean} = 0,24$  und  $\mu_{mean} = 0,26$  womit gezeigt wurde, dass weder der Stabdübeldurchmesser noch die aufgebrachte Vorlast einen maßgebenden Einfluss auf den Reibungsbeiwert haben. Auch die mit einem Stabdübel aus Edelstahl durchgeführte Prüferie (12\_E\_2) zeigt mit einem Reibungsbeiwert von  $\mu_{mean} = 0,27$  ein vergleichbares Verhalten.

Die Ergebnisse der Prüferien mit rauer Stabdübeloberfläche zeigen hingegen, dass die Aufprägung einer Rautenstruktur (siehe Abbildung 4.7b) deutlich höhere Reibungsbeiwerte zur Folge hat ( $\mu_{mean} = 0,46$  für Durchmesser  $d = 8$  mm bzw.  $\mu_{mean} = 0,52$  für Durchmesser  $d = 12$  mm). Der geringe Unterschied zwischen den ermittelten Kenngrößen lässt sich vermutlich auf die etwas feinere Rautenstruktur der kleineren Stabdübel zurückführen, wobei hierzu keine näheren Untersuchungen durchgeführt wurden.

Die charakteristischen Reibungsbeiwerte befinden sich bei den Prüferien mit herkömmlichen Stabdübeln (S 235) und glatter Oberfläche in einem Bereich von  $\mu_k = 0,07$  bis  $\mu_k = 0,16$ ; bei der Prüferie mit Stabdübeln aus Edelstahl beträgt der charakteristische Reibungsbeiwert  $\mu_k = 0,08$ . Für die Prüferien mit rauer Oberfläche sind die charakteristische Werte bei  $\mu_k = 0,26$  für Durchmesser  $d = 8$  mm bzw.  $\mu_k = 0,35$  für Durchmesser  $d = 12$  mm zu finden. In diesem Zusammenhang sei noch erwähnt, dass die berechneten charakteristischen Werte, bei allen Prüferien unter dem minimalen Reibungsbeiwert der jeweiligen Prüferie liegen.

Die erhöhten Ausziehkenwerte der Referenzserie für Stabdübel mit einem Durchmesser  $d = 8$  mm wurden bei diesen Betrachtungen jedoch nicht näher berücksichtigt. Würden die erreichten Ausziehkkräfte unter Vorlast jedoch um einen entsprechenden Betrag reduziert werden, hätte dies eine Verringerung des mittleren Reibungsbeiwertes zur Folge. Da die Widerstände ohne Vorlast jedoch ausschließlich auf zu kleine Bohrlöcher zurückzuführen sind und sich diese bei einer entsprechenden Scherbeanspruchung ausweiten, ist davon auszugehen, dass sich der tatsächliche Einfluss (bei konstanter Holzfeuchte) in Grenzen hält.

Wie bereits erwähnt, wurden für die Berechnung der mittleren Reibungsbeiwerte je Prüfung nur die im definierten konstanten Bereich befindlichen Einzelwerte berücksichtigt. Da sich dieser Abschnitt grundsätzlich im mittleren Feld des Reibungsverlaufs befand, handelt es sich bei den berechneten Reibungsbeiwerten um Gleitreibungsbeiwerte. Eine Ausnahme stellt dabei die Prüferie mit Stabdübeln aus Edelstahl dar, bei welcher eine eindeutige Trennung zwischen Haft- und Gleitreibung aufgrund des in Abschnitt 5-2 beschriebenen stoßartigen Verlaufs nicht eindeutig möglich war.

Anhand der Prüfergebnisse ist zu sehen, dass von allen im Rahmen dieser Arbeit variierten Parametern nur die Oberflächenbeschaffenheit des Stabdübels einen klar erkennbaren Einfluss auf die ermittelten Reibungsbeiwerte hat. Als Reibungsbeiwert zwischen einem Stabdübel mit glatter Oberfläche und dem umgebenden Holz kann somit ein Mittelwert von rund  $\mu_{mean} = 0,25$  bzw. ein charakteristischer Wert von  $\mu_k = 0,12$  angegeben werden. Bei Stabdübeln mit rauer Oberfläche können diese Reibungsbeiwerte annähernd verdoppelt werden.

Die hier ermittelten mittleren Gleitreibungsbeiwerte liegen im unteren Bereich der aus verschiedenen Unterlagen zusammenfassten und in Tabelle 3.3 angeführten Reibungsbeiwerte zwischen Holz und Metall. Auch der von Hübner [3] für seine Prüfungen mit einreihigen Stabdübeln (siehe auch Abschnitt 3-1) ermittelte Reibungsbeiwert von 0,52 liegt höher als die Prüfergebnisse aus dieser Arbeit; die aus den mehrreihigen Versuchen abgeleiteten Reibungsbeiwerte stimmen hingegen gut mit den hier vorgestellten Kenngrößen überein.

Abschließend sei noch erwähnt, dass der Einfluss der Holzfeuchte auf die Reibungsbeiwerte im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet wurde. Im Gegenteil, durch die kurze Zeitspanne zwischen dem Bohren der Löcher und der Prüfdurchführung sowie durch die gleichmäßige Konditionierung der Prüfkörper, wurde ein möglicher Einfluss der Holzfeuchte bewusst ausgeschlossen.



## KAPITEL 6: SCHLUSSBETRACHTUNG UND AUSBLICK

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit lag zunächst auf der Untersuchung von für das Trag- und Verformungsverhalten einer auf Abscheren beanspruchten Stabdübelverbindung verantwortlichen Parametern. Dabei wurde vor allem versucht, den für die Abweichungen zwischen prüfungstechnisch ermittelten und rechnerisch nach dem EYM berechneten Tragfähigkeiten hauptverantwortlichen Parameter auszuforschen. Im Rahmen der durchgeführten Literaturrecherche stellte sich heraus, dass die Differenz mitunter auf den Seileffekt zurückgeführt werden kann, welcher in theoretischen Betrachtungen für Stabdübelverbindungen im Allgemeinen jedoch nicht mitberücksichtigt wird. Eine der Hauptkenngrößen, welche wiederum den Seileffekt beeinflussen, ist der Auszieh Widerstand der eingesetzten Verbindungsmittel. Bei einem Stabdübel kann sich dieser jedoch ausschließlich durch Reibung zwischen dem Stabdübel und dem umgebendem Holz aufbauen.

Um das entsprechende Potential eines Stabdübels zu untersuchen, wurden 110 Prüfungen an zweischnittigen Holz-Holz-Stabdübelverbindungen durchgeführt. In insgesamt 11 Prüfserien mit jeweils 10 Prüfungen erfolgte eine Variation der Stabdübeldurchmesser (8 mm und 12 mm), der Oberflächenbeschaffenheit der Stabdübel (glatt und rau), des Stabdübelmaterials (Stahl S235 und Edelstahl) sowie des Lastniveaus der Scherbeanspruchung ( $F_{Vor,0} = 0$  N,  $F_{Vor,1} = 1000$  N,  $F_{Vor,2} = 2000$  N und  $F_{Vor,3} = 4000$  N). Für Letzteres wurde eine Messschraube verwendet, welche eine kontrollierte Aufbringung der Scherbeanspruchung ermöglichte.

Die Prüfergebnisse zeigen, dass auch nicht belastete Stabdübel (Prüfserien ohne Vorlasten) einen gewissen Auszieh Widerstand besitzen, welcher aber im Vergleich zu den Auszieh Widerständen der belasteten Stabdübel deutlich kleiner ist und wesentlich von der Genauigkeit der Vorbohrung abhängt. Bei den Prüfungen mit aufgebrachtener Scherbeanspruchung zeigte sich bei den Prüfserien mit glatten Stabdübeln ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Vorlast und erzielter Ausziehtragfähigkeit. Ebenfalls zu erkennen war, dass Stabdübel mit einer rauhen Oberfläche wesentlich höhere Auszieh Widerstände bei gleicher Vorlast erreichen als Stabdübel mit glatten Oberflächen.

Die schlussendlich ermittelten Reibungsbeiwerte von Stabdübeln mit glatter Oberfläche (aus Stahl S235) lagen im Mittel in einem Bereich von  $\mu_{mean} = 0,24$  bis  $\mu_{mean} = 0,26$  und zeigten keine Abhängigkeit von den variierten Parametern Durchmesser oder Vorlast. Der Mittelwert der durchgeführten Prüfserie mit Stabdübeln aus Edelstahl befand sich ebenfalls in einem vergleichbaren Bereich ( $\mu_{mean} = 0,27$ ). Im Gegensatz dazu lieferten die Stabdübel mit einer rauhen Oberfläche annähernd doppelt so hohe mittleren Reibungsbeiwerte ( $\mu_{mean} = 0,46$  für Durchmesser  $d = 8$  mm bzw.  $\mu_{mean} = 0,52$  für Durchmesser  $d = 12$  mm).

Die zugehörigen charakteristischen Reibungsbeiwerte der Prüfserien mit glatter Oberfläche (aus Stahl S235) befanden sich in einem Bereich von  $\mu_k = 0,07$  bis  $\mu_k = 0,16$ . Die Prüfserie mit Stabdübeln aus Edelstahl lieferte einen charakteristischen Reibungsbeiwert von  $\mu_k = 0,08$ . Bei den Prüfserien mit einer rauhen Oberfläche wurden charakteristische Werte von  $\mu_k = 0,26$  (für  $d = 8$  mm) bzw.  $\mu_k = 0,35$  (für  $d = 12$  mm) berechnet.

Die erarbeiteten Ergebnisse zeigen somit, dass sich infolge der Reibung auch in Stabdübelverbindungen ein Seileffekt ausbilden kann, welcher mitunter eine Laststeigerung in der betrachteten Verbindung zur Folge hat. Beispielsweise ergaben Untersuchungen in [3], dass eine Laststeigerung um bis zu 20 % durchaus möglich ist.

Um eine allgemeingültige Aussage über den Einfluss der Reibung zwischen einem Stabdübel und dem umgebenden Holz auf das Trag- und Verformungsverhalten einer Stabdübelverbindung zu bekommen, sind jedoch noch weitere Untersuchungen notwendig. Insbesondere den Einfluss der Holzfeuchte gilt es noch näher zu erforschen. Beispielsweise könnte bei niedrig beanspruchten Verbindungen, durch gezielten Einbau der Stabdübel bei einer niedrigen Holzfeuchte, eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit erzielt werden.

## ANHANG A VERZEICHNISSE

### Literaturverzeichnis

- [1] ON EN 1995-1-1; Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten-Teil 1-1: Allgemeines-Allgemeine Regeln für den Hochbau, 2014.
- [2] K. W. Johansen, „Theory of timber connections,“ In: (International Association for Bridge and Structural Engineering) IABSE Journal 9 (1949), Nr. 9, S.249-262, 1949.
- [3] U. Hübner, *Mechanische Kenngrößen von Büchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile*, Graz: Dissertation, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 2013.
- [4] G. Schickhofer, *Holzbau- Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz*, Graz: Institut für Holzbau und Holzwerktechnologie, Technische Universität Graz, Skriptum, 2009.
- [5] E. Gehri, „Überprüfung des EYM-Tragmodells für Holz-Stahl-Holz-Verbindungen,“ Rüschnikon, unveröffentlicht, 2013.
- [6] T. Weinlinger, *Stabdübelverbindungen-Vergleich von ÖNORM B4100-2 und Eurocode 5, Diplomarbeit*, Wien: Institut für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau, Technische Universität Wien, 2008.
- [7] A. Leijten, *Timber Connections*, Brüssel: TU-Eindhoven, Brussels, 18-20 February 2008- Dissemination of information workshop, 2008.
- [8] G. Schickhofer, M. Augustin, G. Jeitler und G. Traetta, „Verbindungstechnik im Ingenieurholzbau (6. Grazer Holzbau Fachtagung),“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, holz.bau forschungs gmbh, holzcluster steiermark gmbh, Graz, 2007.
- [9] T. Hofer, *Erweiterung der Johansen- Theorie auf gekreuzt geschichtete Holzwerkstoffe*, Graz: Diplomarbeit, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 2006.
- [10] H. J. Blaß, A. Bienhaus und V. Krämer, „Ermittlung des Biegewiderstandes stiftförmiger Verbindungsmittel,“ Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2000.
- [11] A. Meyer, „Tragfähigkeit der Nagelverbindungen,“ *Holz als Roh- und Werkstoff*, Nr. 15.Jg.Heft 2, Februar 1957, Februar 1957.
- [12] A. Jorissen und A. Leijten, „The yield capacity of dowel type fasteners,“ Eindhoven University of Technology and SHR Timber Research, Delft University of Technology, Meeting thirty- eight, Netherlands, Germany, 2005.
- [13] C. P. Heine, *Simulated Response of Degrading Hysteretic Joints With Slack Behavior, Chapter 2: Unidirectionally, Laterally Loaded Dowel-Type Fasteners*, Department of Wood Science and Forest Products, 2001.
- [14] A. Mischler, *Bedeutung der Duktilität für das Tragverhalten von Stahl-Holz-*

- Bolzenverbindungen, Zürich: ETH Zürich, Dissertation, 1988.
- [15] M. Dorn, K. d. Borst und J. Eberhardsteiner, „Experiments on dowel-type timber connections,“ *Engineering Structures* 47, pp. 67-80, 2013.
- [16] C. Erchinger, „Zum Verhalten von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall,“ Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, Februar 2009.
- [17] E. Gehri, „Zur Tragfähigkeit von Stabdübelverbindungen, Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis,“ Karlsruhe, 1982.
- [18] H. J. Blaß und M. Schmid, „Spaltgefahr von Nadelhölzern,“ Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Fridericiana Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2002.
- [19] A. Spörk, Lochleibungsfestigkeit von Nadelhölzern - Einflussfaktoren und Modellvergleiche., Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz, Diplomarbeit, 2007.
- [20] enBR, *eurocodenahe Bemessungsrichtlinie- Holzbauwerke- Entwurf, Berechnung und Bemessung*, Graz: holz.bau forschungs gmbh, 2007.
- [21] J. Sjödin, E. Serrano und B. Enquist, „An experimental and numerical Study of the effect of friction in single dowel joints,“ Springer Verlag, 2008.
- [22] M. Schmid, *Anwendung der Bruchmechanik auf Verbindungen mit Holz*, Karlsruhe: Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Dissertation, 2002.
- [23] A. Spörk und G. Schickhofer, „Einflussfaktoren auf die Lochleibungsfestigkeit für die Nadelholzart Fichte,“ holz.bau forschungs gmbh, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, Graz, 2007.
- [24] C. Sandhass, J.-W. Van de Kuilen, H. J. Blaß und G. Ravenshorst, „Embedment tests parallel -to-grain and ductility in tropical hardwood species,“ in *WCTE-World Conference on timber engineering*, Riva del Garda, Italy, 2010.
- [25] H. Werner, „Tragfähigkeit von Holz-Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln unter Berücksichtigung streuender Einflussgrößen,“ Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Karlsruhe, 1993.
- [26] S. Koponen, „Embedding characteristics of wood in the grain direction,“ Laboratory of Structural Engineering and Building Physics, Helsinki University of Technology, Finland, 1991.
- [27] *ON EN 409: Holzbauwerke- Prüfverfahren- Bestimmung des Fließmomentes von stiftförmigen Verbindungsmitteln*, 15. Juni 2009.
- [28] B. Rowek, *Demonstrationsversuche im Holzbau, Diplomarbeit*, Breitenbrunn: Staatliche Studienakademie, Glauchau, 2009.
- [29] I. Smith, G. Foliente, M. Syme, R. McNamara und C. Seath, „Development of Limit States Design Method for Joints with Dowel Type Fasteners, Part 2: Comparison of Experimental Results with European Yield Model,“ CSIRO Building, Construction and Engineering, Australian Government, Forest and Wood Products, Research and Development Corporation, Victoria,

- Australia, 2004.
- [30] F. Colling, *Holzbau, Grundlagen, Bemessungshilfen*, 2. überarbeitete Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH, 2008.
- [31] *DIN 1052: Entwurf und Bemessung von Holzbauwerken-Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*, Dezember 2008.
- [32] R. Mahnken, *Lehrbuch der Technischen Mechanik-Statik*, Berlin: Springer-Verlag, 2012.
- [33] V. L. Popov, *Kontaktmechanik und Reibung*, Berlin: Springer-Verlag, 2009, 2010.
- [34] M. H. Kessel, *Bauteile aus Holz und ihre Verbindungen, Vorlesungsskriptum*, Braunschweig: Institut für Baukonstruktion und Holzbau, Technische Universität Braunschweig, 2014/2015.
- [35] M. B. Sayir, J. Dual, S. Kaufmann und E. Mazza, *Ingenieurmechanik 1- Grundlagen und Statik*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [36] T. Finke, *Technische Mechanik II, Vorlesungsunterlage*, Frankfurt: Hessische BA, 2012.
- [37] A. Bertram, *Formelsammlung Technische Mechanik I-IV*, Magdeburg: Institut für Mechanik, Lehrstuhl für Festigkeitslehre, 2008.
- [38] R. Krapfenbauer und T. Krapfenbauer, *Bautabellen*, Wien: Verlag Jugend & Volk, 2004.
- [39] *ON ISO 554: Normklimatologie für die Konditionierung und/oder Prüfung Zahlenangaben*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 1994.
- [40] *ON EN 13183-1: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz, Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2014.
- [41] F. Wolfthaler, *Entwicklung einer Messschraube und Anwendung auf das Bauwerksmonitoring und die Prüftechnik, Masterarbeit*, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 2015.
- [42] *Europäische Technische Zulassung ETA-11/0190*, Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, Zulassungsstelle für Bauprodukte und Bauarten, Bautechnisches Prüfamtsamt, 2013.
- [43] *ONORM EN 14358: Holzbauwerke- Berechnung der 5%- Quantile für charakteristische Werte und Annahmekriterien für Proben*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2007.
- [44] CEN, *Eurocode 5 EN 1995-1-1: Design of timber structures. Part -1-: General - Common rules and rules for buildings.*, CEN, Ed., Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [45] E. Gehri, „Grundlagen der Verbindungstechnik,“ ETH Zürich, Zürich, 1993.
- [46] A. Mischler, „Übersicht über Verbindungsarten und ihre Wirkungsweisen,“ Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Zürich, 2000.
- [47] J. Sjödin, „Steel-to-Timber dowel joints loaded in tension parallel to the grain,“ School of Technology and Design, Växjö University, Växjö, Sweden, 2006.

- [48] *ON ISO 3131: Holz, Bestimmung der Dichte für physikalische und mechanische Prüfungen*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 1995.
- [49] E. Gehri, „Betrachtungen zum Tragverhalten von Bolzenverbindungen im Holzbau,“ *Schweizer Ingenieur und Architekt, Band 98, Heft 51-52*, 1980.
- [50] H. J. Blaß, „Verbindungssysteme für Holzkonstruktionen,“ Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, KIT, Karlsruhe, 2012.
- [51] J. Ehlbeck, G. Steck, J. Kuipers und T. van der Put, *Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis; Betrachtungen zum Bruchmechanismus von Nagelverbindungen*, Karlsruhe: Bruderverlag, 1982.
- [52] I. Bejtka und H. J. Blaß, „Joints with inclined screws,“ International council for research and innovation in building and construction, Meeting thirty-five, Kyoto, Japan, September 2002.

## A-1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Beispiele für einen: a) Stoß und b) Anschluss [4].....	3
Abbildung 2.2: Arbeitslinie mit wesentlichen Grundbegriffen für das mechanische Verhalten von Verbindungsmitteln bzw. Verbindungen [4] .....	4
Abbildung 2.3: „Reißverschluss-effekt“ in einem: a) einreihigen und b) zweireihigen Zuglaschenstoß [4] .....	5
Abbildung 2.4: Einteilung von ingenieurmäßigen Verbindungen bzw. Verbindungsmittel [4] .....	6
Abbildung 2.5: Kraftübertragung und Verformung einer auf Abscheren beanspruchte einschnittigen Verbindung mit stiftförmigem Verbindungsmittel [4], (überarbeitet).....	7
Abbildung 2.6: a) tatsächliche und b) vereinfachte Last-Verformungs-Beziehung von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Holz bzw. Holzwerkstoffen [9] .....	8
Abbildung 2.7: Elastische und plastische Spannungsverteilung bei einem Verbindungsmittel unter Biegebeanspruchung [13] .....	9
Abbildung 2.8: Versagen bei verschiedenen Schlankheiten: a) kleine Schlankheit, b) mittlere Schlankheit, c) große Schlankheit [16].....	10
Abbildung 2.9: Einfluss der Lagerungsbedingungen; unterschiedliche Stützweiten und Beanspruchungen der Stabdübel bei gleicher Schlankheit bei einer: a) Holz-Holz-Verbindung und b) Holz-Stahlblech-Verbindung [14].....	11
Abbildung 2.10: Einfluss der Lagerungsbedingungen auf die Grenzschlankheit von Stabdübeln [17]	11
Abbildung 2.11: Spaltversagen eines Prüfkörpers [18].....	12
Abbildung 2.12: Definition der Verbindungsmittelabstände nach [1] .....	12
Abbildung 2.13: a) reale und b) idealisierte Verteilung der Lochleibungsspannung im Holz [19] .....	13
Abbildung 2.14: Lochleibungsfestigkeit $f_h$ abhängig von der Rohdichte $\rho$ , qualitativ [19] .....	14
Abbildung 2.15: typische Holz-Stahlblech-Verbindung mit einem Stabdübel; a) Foto des Prüfkörpers und b) Skizze [15].....	15
Abbildung 2.16: Verlauf der Hankinson-Funktion, qualitativ [19].....	16
Abbildung 2.17: Abhängigkeit der mittleren bezogenen Lochleibungsfestigkeit vom Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung, Verlauf der Hankinson-Funktion [19].....	17

Abbildung 2.18: Abhängigkeit der mittleren bezogenen Lochleibungsfestigkeit vom Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung [19].....	18
Abbildung 2.19: Bezogene Lochleibungsfestigkeit abhängig vom Verbindungsmitteldurchmesser, qualitativ [19] .....	19
Abbildung 2.20: Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit vom Durchmesser [3].....	19
Abbildung 2.21: a) Geometrie der Verbindung, b) Ansicht des Hirnholzes des Prüfkörpers mit Jahrringverlauf, c) Stabdübel der Gruppe 1 mit einer glatten Oberfläche, d) Stabdübel der Gruppe 2 mit einer rauen Oberfläche und deren Struktur [21].....	20
Abbildung 2.22: typische Bruchbilder beider Gruppen 1 und 2, a) Aufnahme vor dem Bruch, b) Bruchbild [21].....	21
Abbildung 2.23: Rissstellen nach Jorissen (1998), Rissbildung wenn $F_{\mu} = F_t$ [13] .....	22
Abbildung 2.24: Kraft- Weg- Diagramme der [21] untersuchten Verbindungen .....	22
Abbildung 2.25: Querspannungen im Nahbereich eines Stabdübels [22].....	23
Abbildung 2.26: Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit von der Holzfeuchte bei Eschenholz (Stabdübeldurchmesser 12 mm) [3].....	23
Abbildung 2.27: Streudiagramme zum Einfluss der Jahrringe auf die Lochleibungsfestigkeit und die Verformungswege von Eschenholz bei Stabdübeln mit 12 mm Durchmesser [3] .....	24
Abbildung 2.28: a) Buche mit 45° Jahrringneigung, b) Buche mit 0° Jahrringneigung [24].....	25
Abbildung 2.29: Vergleich der bezogenen Lochleibungsfestigkeit bei fehlerhaft und exakt gebohrten Stabdübellöchern [19].....	26
Abbildung 2.30: Vergleich der Eindrückung des Stabdübels mit fehlerhaften und exakt gebohrten Bohrlöchern bei Erreichen von $F_{max}$ [19].....	26
Abbildung 2.31: 4-Punkt Biegeprüfung nach [27].....	27
Abbildung 2.32: Vergleich der Fließeigenschaften $M_{y,k}$ nach ON EN 1995-1-1 (2009), SIA 265 (2003) und Blaß u.a. (2000) bei theoretischen Biegewinkeln, Blaß u.a. (2000) bei einem Winkel von 45° für Stabdübel mit einer charakteristischen Zugfestigkeit von $f_{u,k} = 600 \text{ N/mm}^2$ [3] .....	28
Abbildung 2.33: Einfluss der Stahlfestigkeit von Stabdübeln $d=16 \text{ mm}$ auf den Tragwiderstand einer zweischnittigen Holz- Holz-Verbindung (Brettschicht aus Fichte), Mittelwerte aus jeweils 3 Versuchen [17] .....	28
Abbildung 2.34: Verlauf des Biegewinkels $\alpha$ in Abhängigkeit des Verbindungsmitteldurchmessers für die Versagensmechanismen 2 und 3 [10] (überarbeitet) .....	30
Abbildung 2.35: „Seileffekt“ bei einer zweischnittigen Holz-Holz-Verbindung mit einem Bolzen ....	31
Abbildung 2.36: Versagensmechanismen einer einschnittigen Holz-Holz-Verbindung [1] .....	32
Abbildung 2.37: Tragfähigkeitsgleichungen für eine einschnittige Holz-Holz-Verbindung [1].....	32
Abbildung 2.38: Versagensmechanismen einer zweischnittigen Holz-Holz-Verbindung [1] .....	33
Abbildung 2.39: Tragfähigkeitsgleichungen für eine zweischnittige Holz-Holz-Verbindung [1].....	33
Abbildung 2.40: Versagensmechanismen einer Holz-Stahlblech-Verbindung [1] .....	33
Abbildung 2.41: Tragfähigkeitsgleichungen für eine Holz-Stahlblech-Verbindung (dünnes Stahlblech, einschnittige Verbindung) [1].....	34
Abbildung 2.42: Tragfähigkeitsgleichungen für eine Holz-Stahlblech-Verbindung (dickes Stahlblech, einschnittige Verbindung) [1].....	34
Abbildung 2.43: Tragfähigkeitsgleichungen für eine Holz-Stahlblech-Verbindung (innenliegende Stahlblech, zweischnittige Verbindung) [1] .....	34

Abbildung 2.44: Tragfähigkeitsgleichungen für eine Holz-Stahlblech-Verbindung (außenliegende Stahlbleche, zweischnittige Verbindung) [1].....	34
Abbildung 2.45: Tragfähigkeitsgleichungen für eine Holz-Stahlblech-Verbindung (außenliegende Stahlbleche, zweischnittige Verbindung) [1].....	35
Abbildung 3.1: Vergleich von unterschiedlichen Kraft-Weg-Verläufen einer Verbindung und ihre Relation zum EYM [29] .....	37
Abbildung 3.2: verformter Zustand eines: a) Stabdübels und b) Bolzens [30] (überarbeitet).....	38
Abbildung 3.3: Konfiguration der Zugprüfungen der Stabdübelverbindung mit mittigem Stahlblech [3] .....	38
Abbildung 3.4: Tragfähigkeitsgleichungen mit zugehörigen Versagensmechanismen für eine Holz-Stahlblech-Verbindung (innenliegendes Stahlblech, zweischnittige Verbindung) [1], [3] .....	39
Abbildung 3.5: Öffnung der Verbindungsfuge .....	41
Abbildung 3.6: Reibungskraft bei Stabdübelverbindungen [3] (überarbeitet).....	41
Abbildung 3.7: Vergleich der Tragfähigkeiten aus [3] mit und ohne Berücksichtigung der Reibungskraft.....	42
Abbildung 3.8: ein durch Normal- und Tangentialkraft beanspruchter Klotz auf einer Ebene mit zugehörigen Reaktions- und Reibungskräften [33] (überarbeitet).....	43
Abbildung 3.9: Reibungszustände: a) Haftreibung mit enger Verzahnung, b) Gleitreibung [32] (überarbeitet) .....	43
Abbildung 3.10: Kraft-Zeit-Diagramm mit Unterscheidung von zwei Reibungszuständen [34] (überarbeitet) .....	44
Abbildung 4.1: Prüfkonfiguration: a) Schnitt, b) Ansicht.....	47
Abbildung 4.2: Bilder der Prüfkonfiguration .....	48
Abbildung 4.3: a) Detail Kraftereinleitung in den Stabdübel, b) Detail Kontaktbereich Stabdübel-Holz	49
Abbildung 4.4: Beschriftung der Prüfkörper.....	50
Abbildung 4.5: Bearbeitungsprozess Holz.....	51
Abbildung 4.6: Abmessungen der Prüfkörper.....	52
Abbildung 4.7: verwendete Stabdübel: a) Oberfläche: glatt; b) Oberfläche: rau; c) Stabdübel aus Edelstahl .....	53
Abbildung 4.8: unterschiedliche Typen von Messschrauben mit: a) fixer Verkabelung und b) Stecksystem [41].....	54
Abbildung 4.9: a) Voll - und b) Teilgewinde Messschraube-Prototypen [41].....	54
Abbildung 4.10: Tragfähigkeitsgleichungen für eine zweischnittige Hol-Holz-Verbindung nach [1].	55
Abbildung 4.11: Versagensmechanismus j .....	56
Abbildung 4.12: a) Universalprüfmaschine; b) Messverstärker QuantumX MX840A und MX410A [41].....	58
Abbildung 4.13: Holzfaser in rauher Oberfläche nach der Prüfung.....	59
Abbildung 5.1: typische Kraft-Weg-Verläufe: a) Referenzserie, b) Stabdübeloberfläche glatt, c) Stabdübeloberfläche rau, d) Stabdübel aus Edelstahl.....	61
Abbildung 5.2: Vergleich der Auszieh Widerstände, Prüfserien mit dem Durchmesser $d = 8$ mm.....	63
Abbildung 5.3: Vergleich der Auszieh Widerstände, Prüfserien mit dem Durchmesser $d = 12$ mm.....	63



Abbildung 5.4: Vergleich des Ausziehwiderstandes der Referenzprüfserien mit den Prüfserien mit Vorlast .....	64
Abbildung 5.5: Kraft-Zeit-Diagramm : a) Stabdübel mit glatter Oberfläche, b) Stabdübel mit rauher Oberfläche .....	65
Abbildung 5.6: Reibungsbeiwert-Weg-Verläufe mit markiertem konstanten Bereich: a) Stabdübeloberfläche glatt, b) Stabdübeloberfläche rau .....	66
Abbildung 5.7: Vergleich der Reibungsbeiwerte, Prüfserien mit Durchmesser $d = 8$ mm .....	67
Abbildung 5.8: Vergleich der Reibungsbeiwerte, Prüfserien mit Durchmesser $d = 12$ mm .....	67

## A-2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Mindestabstände von Stabdübeln nach [1].....	13
Tabelle 2.2: Abweichung des Mittelwertes der Lochleibungsfestigkeiten jeder Serie zum Verlauf der Hankinson-Funktion [19].....	16
Tabelle 2.3: Abweichung des Mittelwertes der Lochleibungsfestigkeit jeder Serie zur Ausgleichskurve [19].....	17
Tabelle 2.4: Duktilitätskenngrößen in Abhängigkeit der eingesetzten Prüfkörper [24].....	25
Tabelle 2.5: Anteile des Seileffektes [1] .....	31
Tabelle 3.1: Gegenüberstellung der Traglasten aus Prüfung und Berechnung [3].....	40
Tabelle 3.2: gemittelte maximale Maximallasten und Verhältnisse zu berechneten Werten [3] .....	40
Tabelle 3.3: Haft-und Gleitreibungsbeiwerte für die Kombination Holz-Metall .....	45
Tabelle 3.4: Haft-und Gleitreibungsbeiwerte für die Kombination Holz-Holz.....	45
Tabelle 4.1: Prüfserien .....	50
Tabelle 4.2: Tragfähigkeit der Verbindung mit einem Stabdübel .....	56
Tabelle 4.3: Ausziehwiderstand einer Teilgewinde- Messschraube.....	57



# ANHANG B ERGEBNISSE ALLER PRÜFSERIEN

## B-1 Prüfsreihe 8\_G\_0

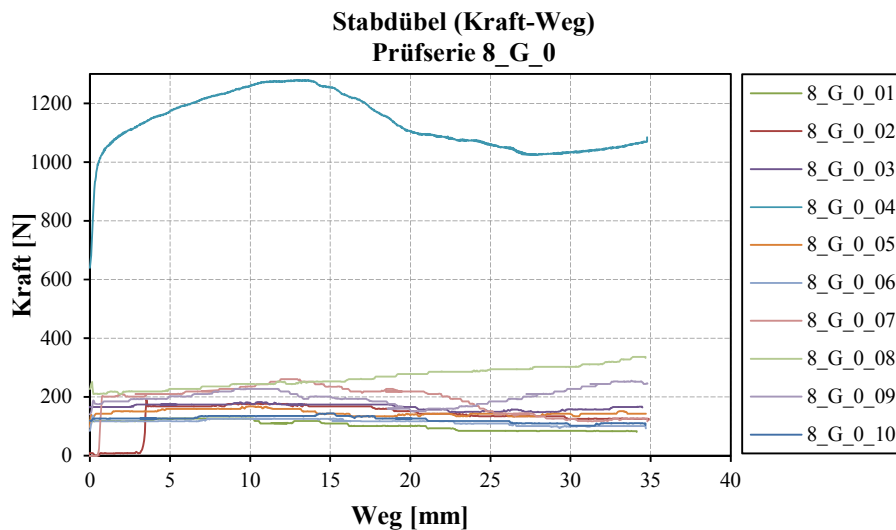


Abbildung ANHANG B 1: Kraft-Weg-Diagramm\_ Prüfsreihe 8\_G\_0

Tabelle ANHANG B 1: Ergebnisse\_ Prüfsreihe 8\_G\_0

Prüfungsbezeichnung [-]	Auszieh widerstand $F_{max, STD}$ [N]
8_G_0_01	176,75
8_G_0_02	127,06
8_G_0_03	182,68
8_G_0_04	1279,70 (Ausreißer)
8_G_0_05	167,94
8_G_0_06	136,60
8_G_0_07	261,23
8_G_0_08	336,66 (Ausreißer)
8_G_0_09	255,08
8_G_0_10	143,88
<b>Min</b>	127,06
<b>Max</b>	261,23
<b>Mittelwert</b>	181,40
<b>Median</b>	172,35
<b>Standardabw.</b>	51,20
<b>CoV</b>	28%

## B-2 Prüfsreihe 8\_G\_1

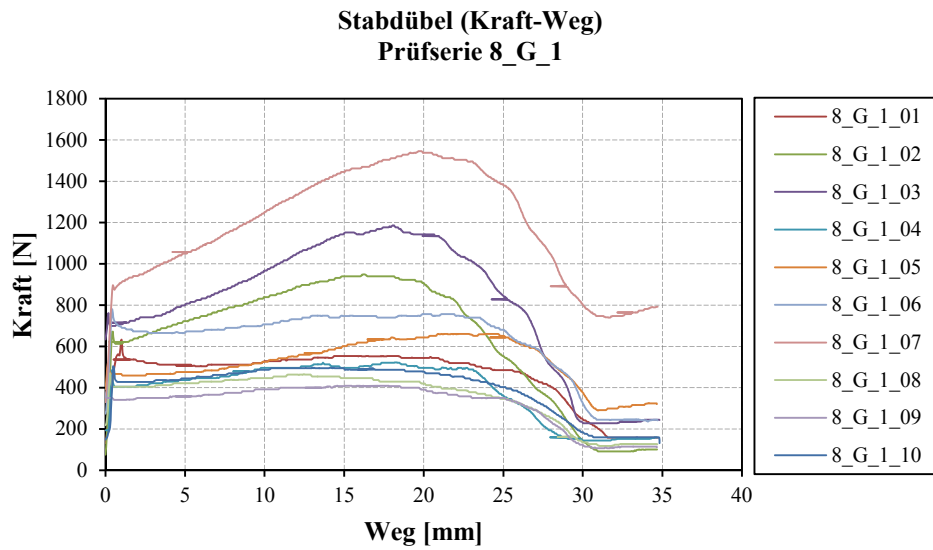


Abbildung ANHANG B 2: Kraft-Weg-Diagramm\_ Prüfsreihe 8\_G\_1

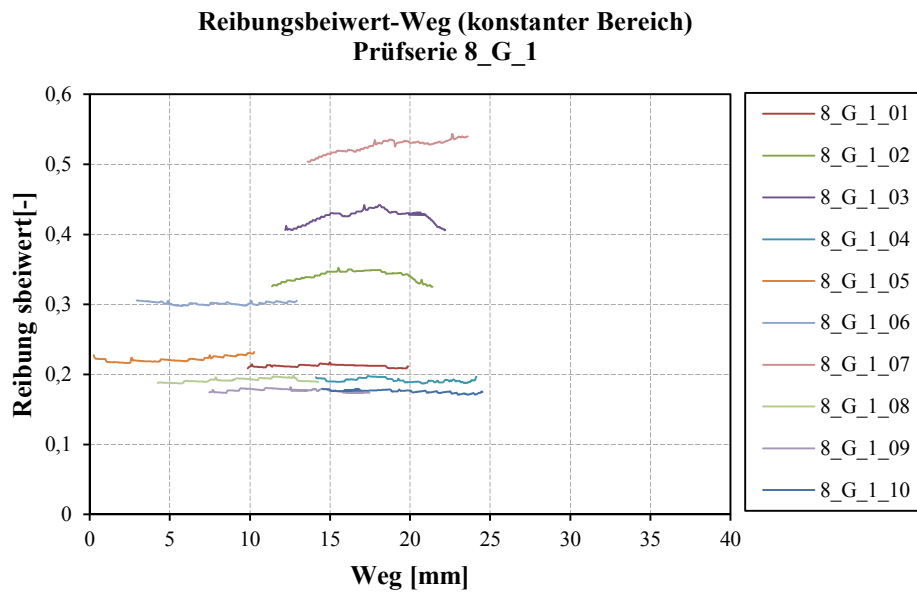


Abbildung ANHANG B 3: Reibungsbeiwert-Weg-Diagramm\_ Prüfsreihe 8\_G\_1

*Tabelle ANHANG B 2: Ergebnisse\_ Prüfserie 8\_G\_1*

<b>Prüfungsbezeichnung</b> [-]	<b>Ausziehwiderstand <math>F_{max, STD}</math></b> [N]	<b>Reibungsbeiwert <math>\mu</math></b> [-]
8_G_1_01	632,25	0,21
8_G_1_02	948,22	0,34
8_G_1_03	1185,70	0,43
8_G_1_04	521,61	0,19
8_G_1_05	659,96	0,22
8_G_1_06	780,36	0,30
8_G_1_07	1545,90 (Ausreißer)	-
8_G_1_08	469,13	0,19
8_G_1_09	408,59	0,18
8_G_1_10	503,01	0,18
<b>Min</b>	408,59	0,18
<b>Max</b>	1185,70	0,43
<b>Mittelwert</b>	678,80	0,25
<b>Median</b>	632,25	0,21
<b>Standardabw.</b>	253,70	0,1
<b>CoV</b>	37%	35%
<b>charakteristischer Wert</b>	-	0,12

## B-3 Prüfsreihe 8\_G\_2

Stabdübel (Kraft-Weg)  
Prüfsreihe 8\_G\_2

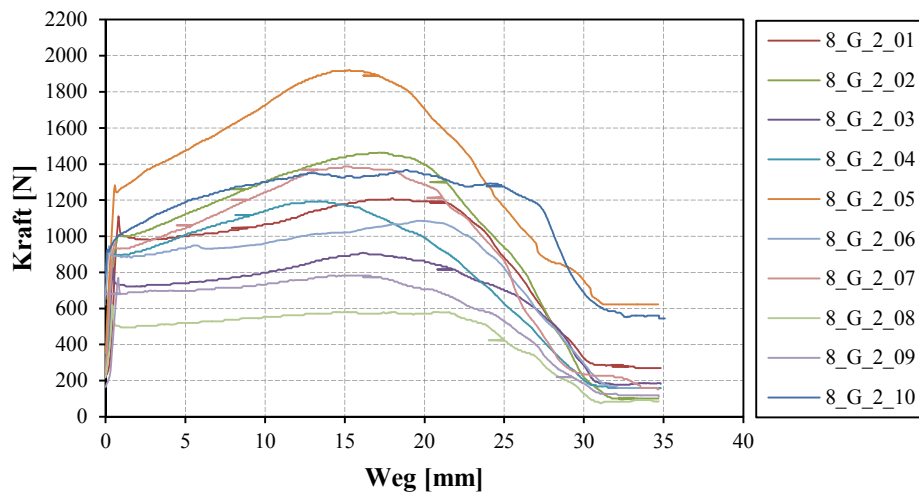


Abbildung ANHANG B 4: Kraft-Weg-Diagramm\_ Prüfsreihe 8\_G\_2

Reibungsbeiwert-Weg (konstanter Bereich)  
Prüfsreihe 8\_G\_2

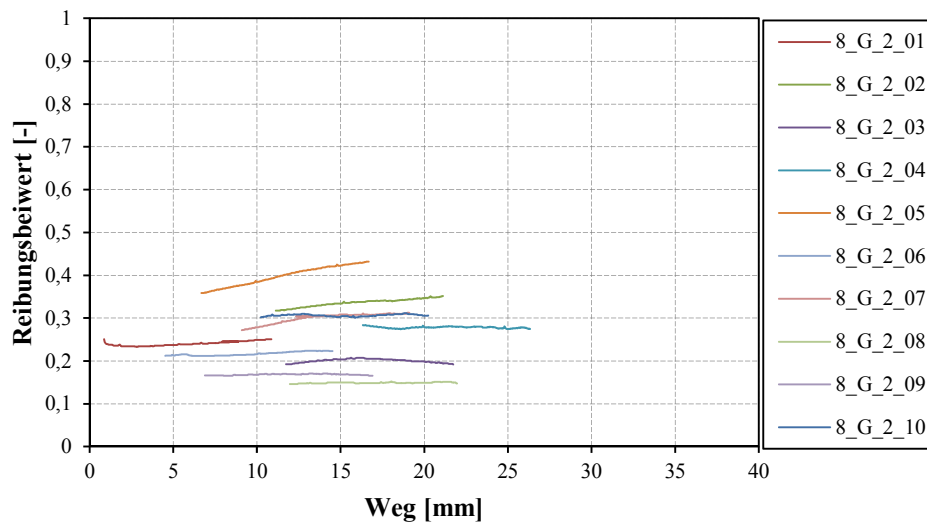


Abbildung ANHANG B 5: Reibungsbeiwert-Weg-Diagramm\_ Prüfsreihe 8\_G\_2

*Tabelle ANHANG B 3: Ergebnisse\_ Prüfsrie 8\_G\_2*

<b>Prüfungsbezeichnung</b> [-]	<b>Ausziehwiderstand <math>F_{max, STD}</math></b> [N]	<b>Reibungsbeiwert <math>\mu</math></b> [-]
8_G_2_01	1210,40	0,24
8_G_2_02	1462,20	0,34
8_G_2_03	907,19	0,20
8_G_2_04	1192,70	0,28
8_G_2_05	1921,20	0,40
8_G_2_06	1085,70	0,22
8_G_2_07	1386,30	0,30
8_G_2_08	618,39	0,15
8_G_2_09	782,32	0,17
8_G_2_10	1367,10	0,31
<b>Min</b>	618,39	0,15
<b>Max</b>	1921,20	0,40
<b>Mittelwert</b>	1193,40	0,26
<b>Median</b>	1201,55	0,26
<b>Standardabw.</b>	374,60	0,1
<b>CoV</b>	31%	30%
<b>charakteristischer Wert</b>	-	0,13

## B-4 Prüfsreihe 8\_G\_3

Stabdübel (Kraft-Weg)  
Prüfsreihe 8\_G\_3

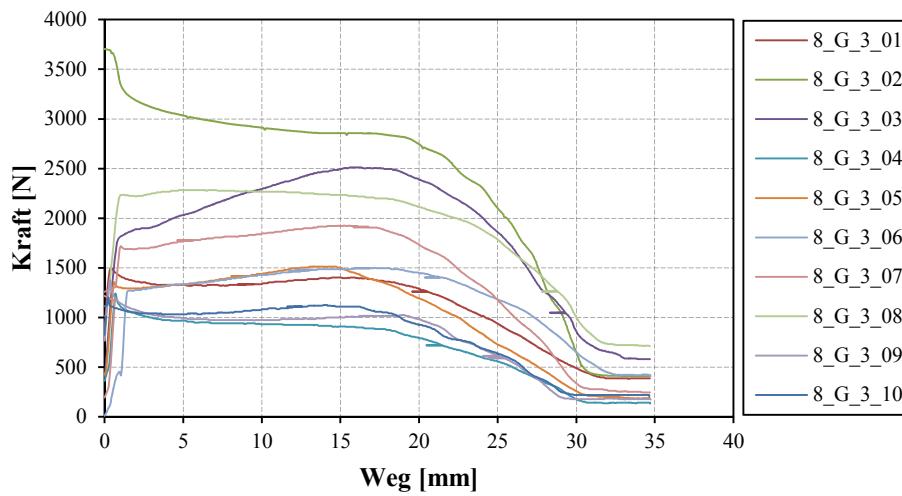


Abbildung ANHANG B 6: Kraft-Weg Diagramm\_ Prüfsreihe 8\_G\_3

Reibungsbeiwert-Weg (konstanter Bereich)  
Prüfsreihe 8\_G\_3

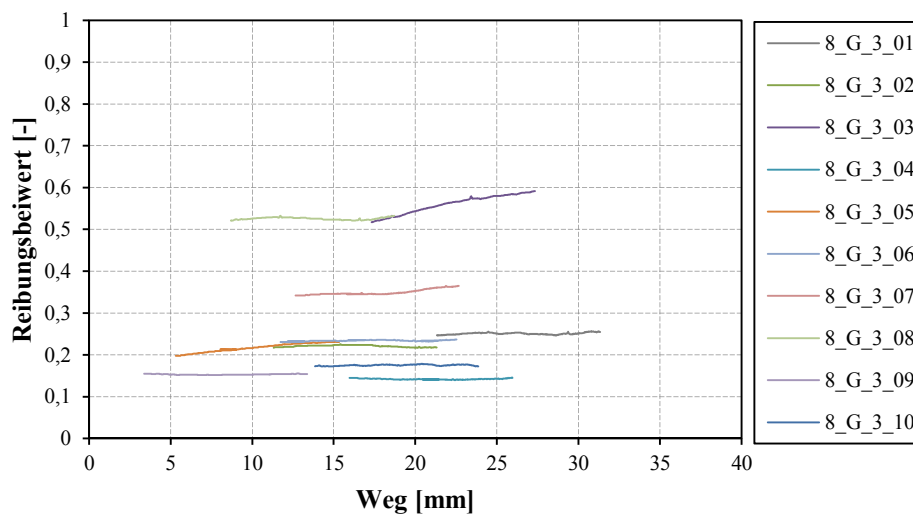


Abbildung ANHANG B 7: Reibungsbeiwert-Weg-Diagramm\_ Prüfsreihe 8\_G\_3



*Tabelle ANHANG B 4: Ergebnisse\_ Prüfsrie 8\_G\_3*

<b>Prüfungsbezeichnung</b> [-]	<b>Auszieh widerstand <math>F_{max, STD}</math></b> [N]	<b>Reibungsbeiwert <math>\mu</math></b> [-]
8_G_3_01	1495,70	0,25
8_G_3_02	1277,50	0,22
8_G_3_03	2512,10	0,56 (Ausreißer)
8_G_3_04	1242,10	0,14
8_G_3_05	1512,20	0,22
8_G_3_06	1500,30	0,23
8_G_3_07	1923,40	0,35
8_G_3_08	2284,50	0,53
8_G_3_09	1374,20	0,15
8_G_3_10	1201,30	0,18
<b>Min</b>	1201,30	0,14
<b>Max</b>	2512,10	0,56
<b>Mittelwert</b>	1632,30	0,25
<b>Median</b>	1498,00	0,22
<b>Standardabw.</b>	455,20	0,1
<b>CoV</b>	28%	53%
<b>charakteristischer Wert</b>	-	0,10

## B-5 Prüfsreihe 8\_R\_2

Stabdübel (Kraft-Weg)  
Prüfsreihe 8\_R\_2

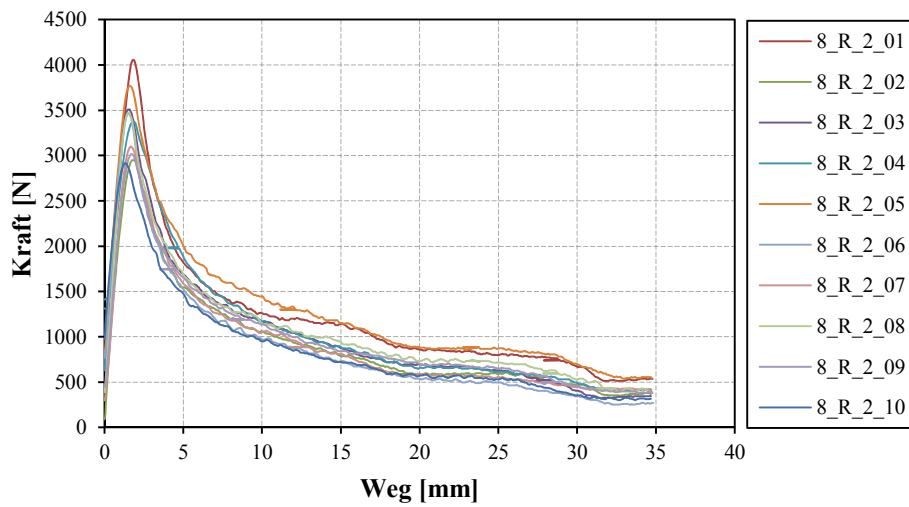


Abbildung ANHANG B 8: Kraft-Weg Diagramm\_ Prüfsreihe 8\_R\_2

Reibungsbeiwert-Weg (konstanter Bereich)  
Prüfsreihe 8\_R\_2

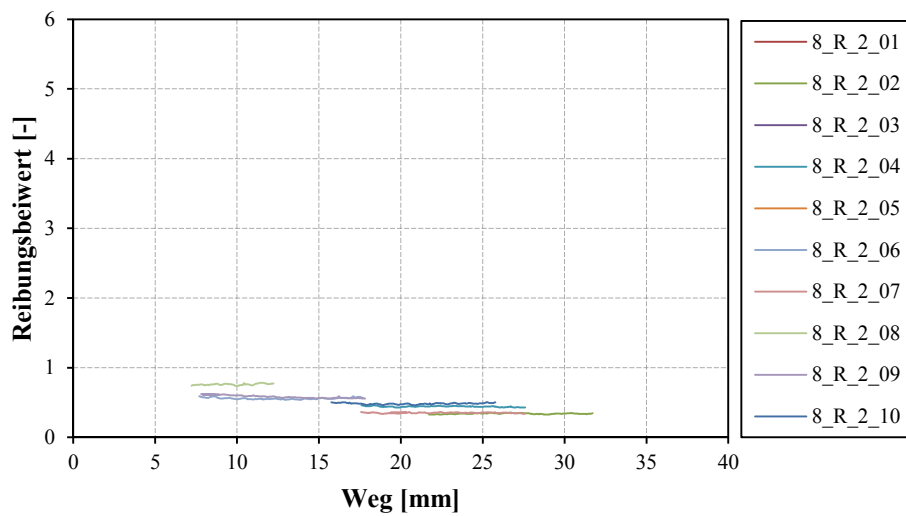


Abbildung ANHANG B 9: Reibung-Weg Diagramm\_ Prüfsreihe 8\_R\_2

*Tabelle ANHANG B 5: Ergebnisse\_ Prüfsrie 8\_R\_2*

<b>Prüfungsbezeichnung</b> [-]	<b>Ausziehwiderstand <math>F_{max, STD}</math></b> [N]	<b>Reibungsbeiwert <math>\mu</math></b> [-]
8_R_2_01	4055,80 (Ausreißer)	-
8_R_2_02	2948,70	0,34
8_R_2_03	3510,60	-
8_R_2_04	3376,50	0,44
8_R_2_05	3769,50	-
8_R_2_06	3464,40	0,56
8_R_2_07	3098,50	0,35
8_R_2_08	3474,60	-
8_R_2_09	3016,90	0,58
8_R_2_10	2915,80	0,48
<b>Min</b>	2915,80	0,34
<b>Max</b>	3769,50	0,58
<b>Mittelwert</b>	3286,20	0,46
<b>Median</b>	3376,50	0,46
<b>Standardabw.</b>	299,60	0,1
<b>CoV</b>	9%	22%
<b>charakteristischer Wert</b>	-	0,26

## B-6 Prüfsreihe 12\_G\_0

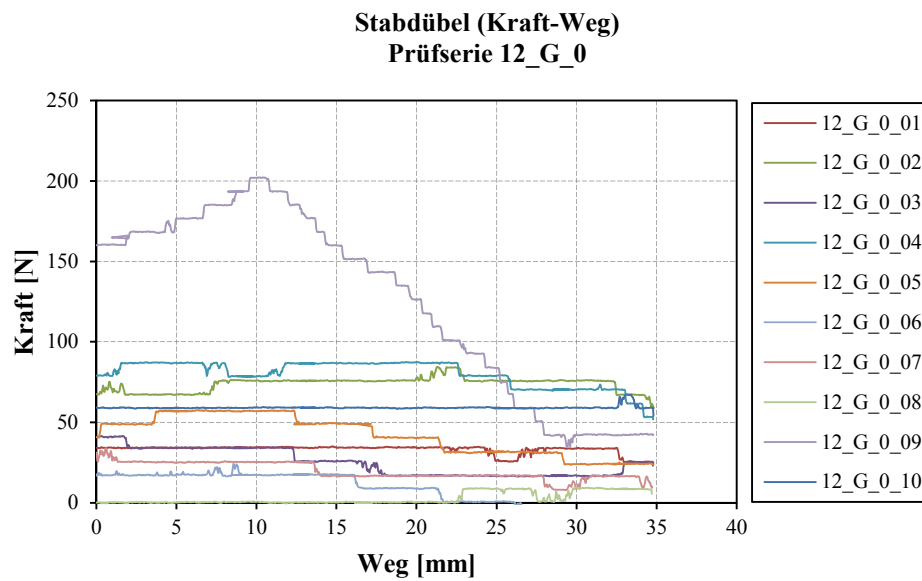


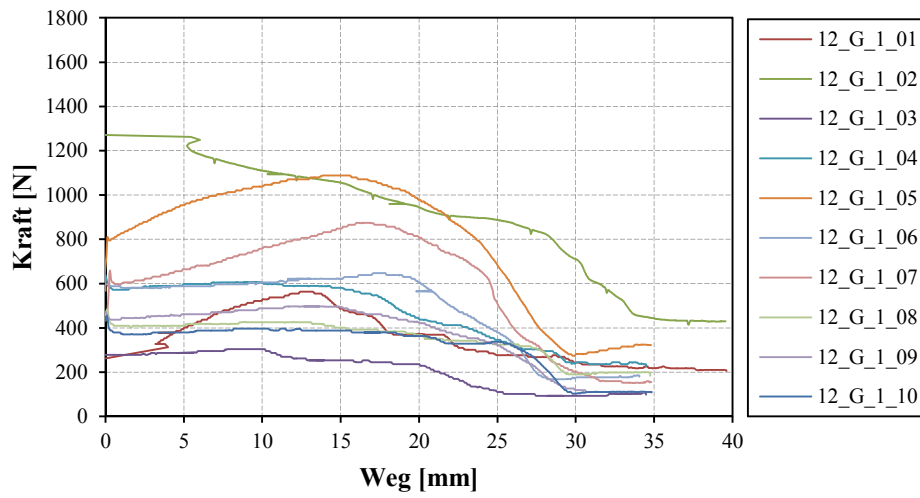
Abbildung ANHANG B 10: Kraft-Weg-Diagramm\_ Prüfsreihe 12\_G\_0

Tabelle ANHANG B 6: Ergebnisse\_ Prüfsreihe 12\_G\_0

Prüfungsbezeichnung	Auszieh Widerstand $F_{max, STD}$
[-]	[N]
12_G_0_01	35,02
12_G_0_02	84,35
12_G_0_03	41,40
12_G_0_04	87,40
12_G_0_05	57,62
12_G_0_06	24,25
12_G_0_07	33,95
12_G_0_08	9,37 (Ausreißer)
12_G_0_09	202,15 (Ausreißer)
12_G_0_10	67,25
<b>Min</b>	24,25
<b>Max</b>	87,40
<b>Mittelwert</b>	53,90
<b>Median</b>	49,51
<b>Standardabw.</b>	24,0
<b>CoV</b>	45%

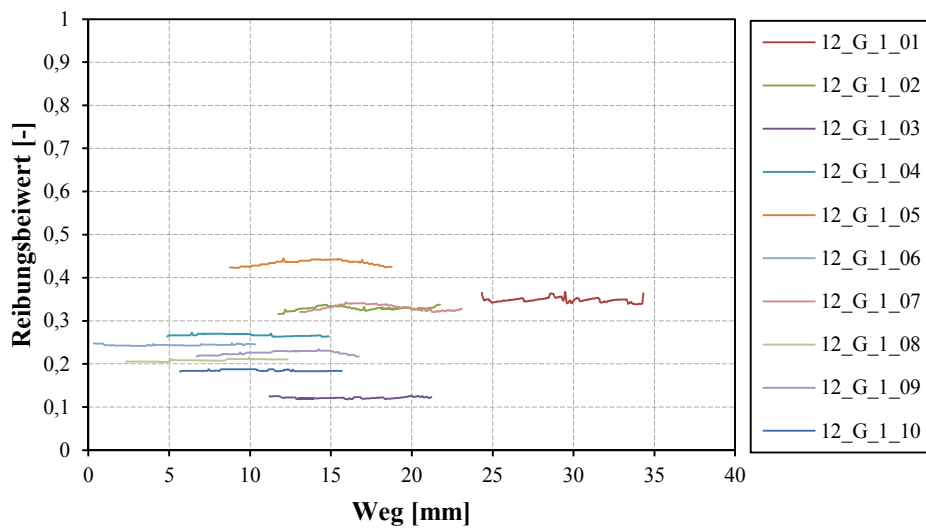
## B-7 Prüfsreihe 12\_G\_1

**Stabdübel (Kraft-Weg)  
Prüfsreihe 12\_G\_1**



*Abbildung ANHANG B 11: Kraft-Weg-Diagramm\_ Prüfsreihe 12\_G\_1*

**Reibungsbeiwert-Weg (konstanter Bereich)  
Prüfsreihe 12\_G\_1**



*Abbildung ANHANG B 12: Reibungsbeiwert-Weg-Diagramm\_ Prüfsreihe 12\_G\_1*

Tabelle ANHANG B 7: Ergebnisse\_ Prüfserie 12\_G\_1

Prüfungsbezeichnung [-]	Auszieh Widerstand $F_{max, STD}$ [N]	Reibungsbeiwert $\mu$ [-]
12_G_1_01	563,61	0,35
12_G_1_02	715,08	0,33
12_G_1_03	304,55	0,12
12_G_1_04	638,90	0,27
12_G_1_05	1088,50 (Ausreißer)	-
12_G_1_06	646,98	0,24
12_G_1_07	873,88	0,33
12_G_1_08	483,19	0,21
12_G_1_09	496,24	0,23
12_G_1_10	494,49	0,18
<b>Min</b>	304,55	0,12
<b>Max</b>	873,88	0,35
<b>Mittelwert</b>	575,20	0,25
<b>Median</b>	563,61	0,24
<b>Standardabw.</b>	166,10	0,1
<b>CoV</b>	29%	30%
<b>charakteristischer Wert</b>	-	0,07

## B-8 Prüfsreihe 12\_G\_2

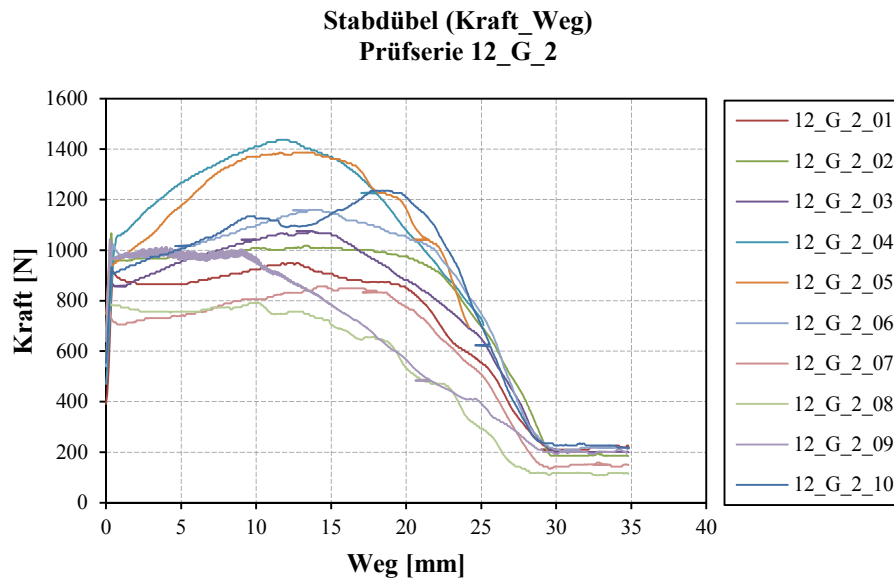


Abbildung ANHANG B 13: Kraft-Weg Diagramm\_ Prüfsreihe 12\_G\_2

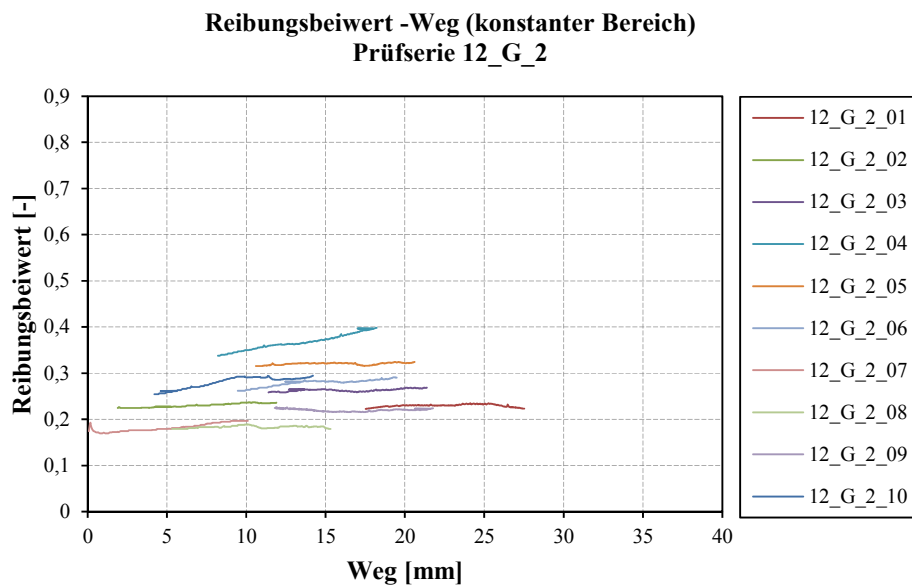


Abbildung ANHANG B 14: Reibungsbeiwert-Weg-Diagramm\_ Prüfsreihe 12\_G\_2

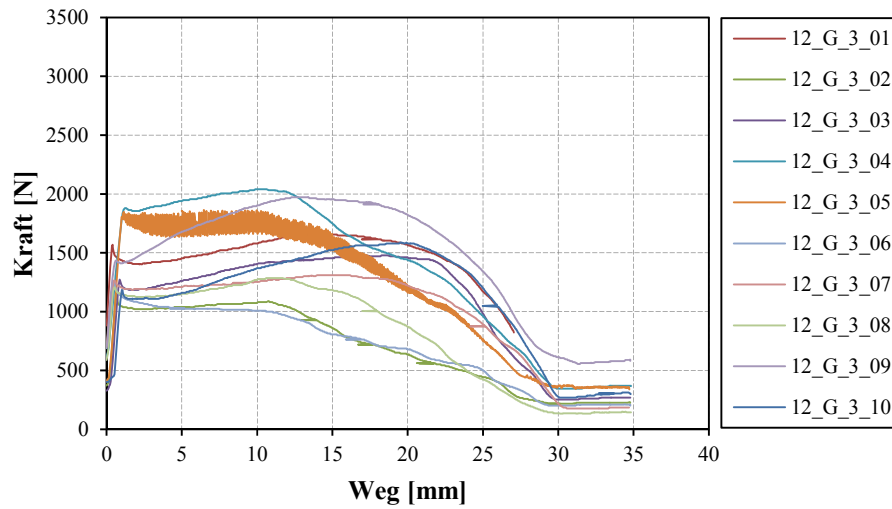
Tabelle ANHANG B 8: Ergebnisse\_ Prüfserie 12\_G\_2

Prüfungsbezeichnung [-]	Ausziehwiderstand $F_{max, STD}$ [N]	Reibungsbeiwert $\mu$ [-]
12_G_2_01	949,05	0,23
12_G_2_02	1067,30	0,23
12_G_2_03	1075,30	0,26
12_G_2_04	1436,70	0,37 (Ausreißer)
12_G_2_05	1386,70	0,32
12_G_2_06	1159,70	0,28
12_G_2_07	857,20	0,18
12_G_2_08	853,13	0,18
12_G_2_09	1044,60	0,22
12_G_2_10	1235,30	0,28
<b>Min</b>	853,13	0,18
<b>Max</b>	1436,70	0,37
<b>Mittelwert</b>	1106,50	0,26
<b>Median</b>	1071,30	0,23
<b>Standardabw.</b>	201,20	0,1
<b>CoV</b>	18%	23%
<b>charakteristischer Wert</b>	-	0,16



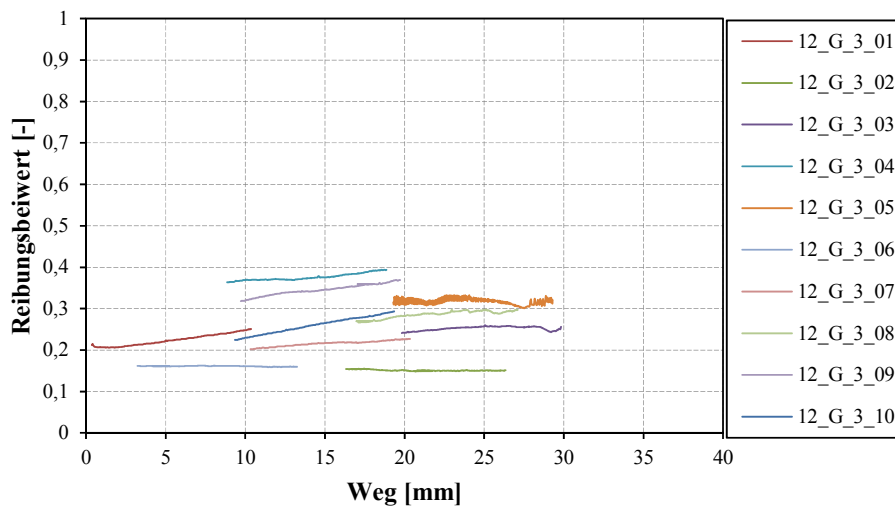
## B-9 Prüfsreihe 12\_G\_3

**Stabdübel (Kraft-Weg)  
Prüfsreihe 12\_G\_3**



*Abbildung ANHANG B 15: Kraft-Weg Diagramm\_ Prüfsreihe 12\_G\_3*

**Reibungsbeiwert-Weg (konstanter Bereich)  
Prüfsreihe 12\_G\_3**



*Abbildung ANHANG B 16: Reibungsbeiwert-Weg-Diagramm\_ Prüfsreihe 12\_G\_3*

Tabelle ANHANG B 9: Ergebnisse\_ Prüfsreihe 12\_G\_3

Prüfungsbezeichnung [-]	Auszieh Widerstand $F_{max, STD}$ [N]	Reibungsbeiwert $\mu$ [-]
12_G_3_01	1663,70	0,22
12_G_3_02	1160,40	0,15
12_G_3_03	1478,40	0,25
12_G_3_04	2040,50	0,38
12_G_3_05	1863,60	0,32
12_G_3_06	1254,40	0,16
12_G_3_07	1311,10	0,22
12_G_3_08	1286,00	0,29
12_G_3_09	1973,40	0,35
12_G_3_10	1587,80	0,26
<b>Min</b>	1160,40	0,15
<b>Max</b>	2040,50	0,38
<b>Mittelwert</b>	1561,90	0,26
<b>Median</b>	1533,10	0,26
<b>Standardabw.</b>	316,60	0,1
<b>CoV</b>	20%	29%
<b>charakteristischer Wert</b>	-	0,13

## B-10Prüfserie 12\_R\_2

**Stabdübel (Kraft-Weg)  
Prüfserie 12\_R\_2**

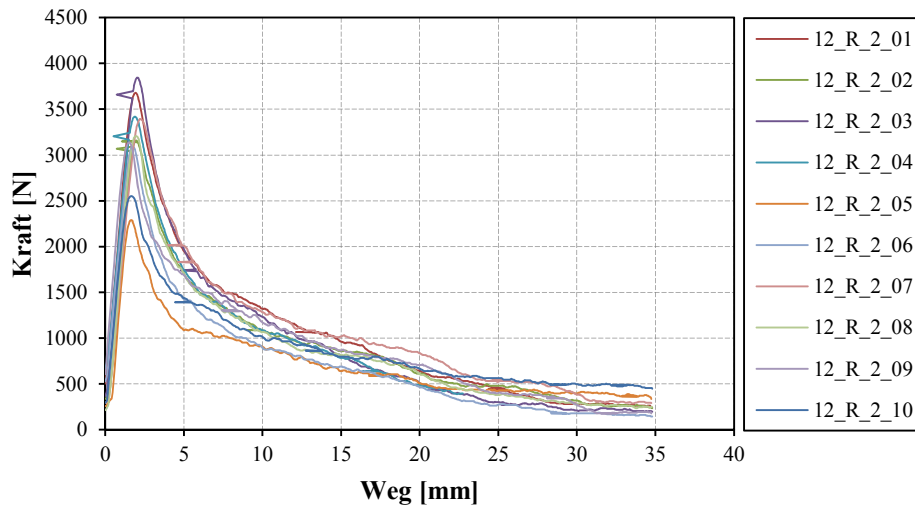


Abbildung ANHANG B 17: Kraft-Weg-Diagramm\_ Prüfserie 12\_R\_2

**Reibungsbeiwert-Weg (konstanter Bereich)  
Prüfserie 12\_R\_2**

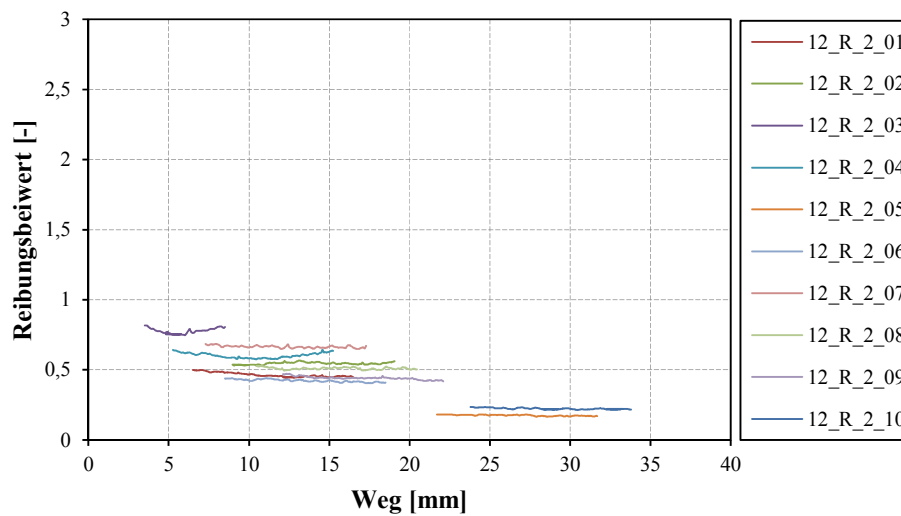


Abbildung ANHANG B 18: Reibungsbeiwert-Weg-Diagramm\_ Prüfserie 12\_R\_2

Tabelle ANHANG B 10: Ergebnisse\_ Prüfserie 12\_R\_2

Prüfungsbezeichnung [-]	Auszieh Widerstand $F_{max, STD}$ [N]	Reibungsbeiwert $\mu$ [-]
12_R_2_01	3678,50	0,46
12_R_2_02	3156,50	0,55
12_R_2_03	3845,20	-
12_R_2_04	3418,80	0,60
12_R_2_05	2289,20 (Ausreißer)	-
12_R_2_06	3098,70	0,42
12_R_2_07	3393,80	0,66
12_R_2_08	3207,10	0,51
12_R_2_09	3139,20	0,44
12_R_2_10	2551,70 (Ausreißer)	-
<b>Min</b>	3098,70	0,42
<b>Max</b>	3845,20	0,66
<b>Mittelwert</b>	3367,20	0,52
<b>Median</b>	3300,45	0,51
<b>Standardabw.</b>	273,30	0,1
<b>CoV</b>	8%	17%
<b>charakteristischer Wert</b>	-	0,35

## B-11 Prüfserie 12\_E\_2

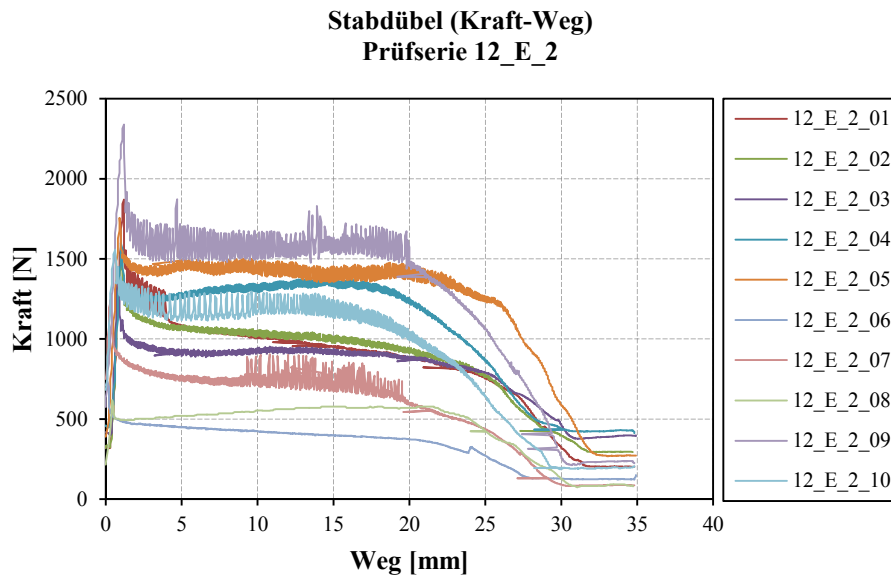


Abbildung ANHANG B 19: Kraft-Weg-Diagramm\_ Prüfserie 12\_E\_2

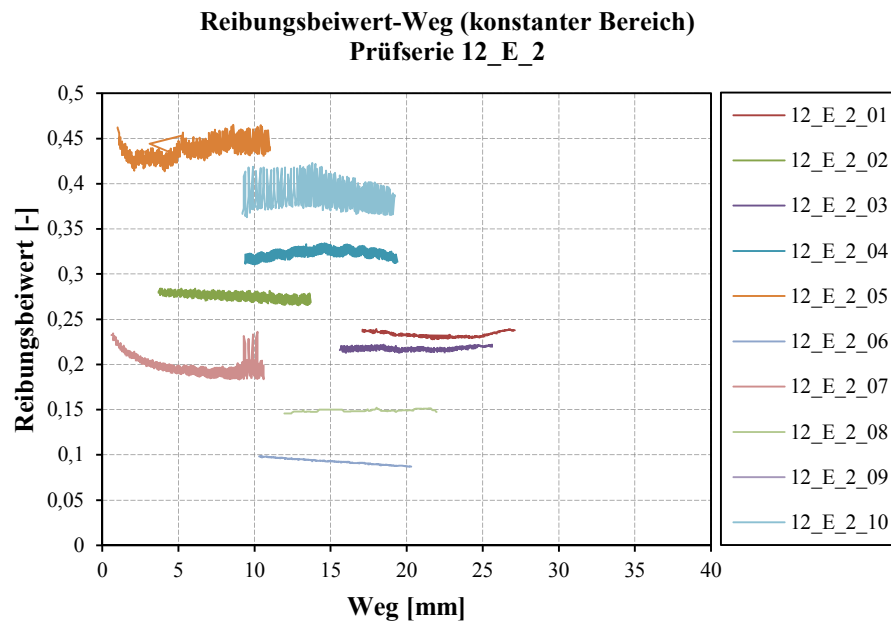


Abbildung ANHANG B 20: Reibungsbeiwert-Weg-Diagramm\_ Prüfserie 12\_E\_2

Tabelle ANHANG B 11: Ergebnisse\_ Prüfserie 12\_E\_2

Prüfungsbezeichnung [-]	Ausziehwiderstand $F_{max, STD}$ [N]	Reibungsbeiwert $\mu$ [-]
12_E_2_01	1871,20	0,23
12_E_2_02	1548,70	0,28
12_E_2_03	1450,80	0,22
12_E_2_04	1598,30	0,32
12_E_2_05	1757,50	0,44
12_E_2_06	734,01	0,09
12_E_2_07	1242,10	0,20
12_E_2_08	618,39 (Ausreißer)	-
12_E_2_09	2338,20	-
12_E_2_10	1559,20	0,39
<b>Min</b>	734,01	0,09
<b>Max</b>	2338,20	0,44
<b>Mittelwert</b>	1566,70	0,27
<b>Median</b>	1559,20	0,25
<b>Standardabw.</b>	438,40	0,1
<b>CoV</b>	28%	41%
<b>charakteristischer Wert</b>	-	0,08

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