

# Prüftechnische Ermittlung der Schubfestigkeit von Vollholz und Analyse des Größeneinflusses



M-4-02/2012

Gatternig Wolfgang 0530302 F066 465

Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz



# Prüftechnische Ermittlung der Schubfestigkeit von Vollholz und Analyse des Größeneinflusses

Masterarbeit von:

Wolfgang Gattermig, BSc

Eingereicht am:

Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz

Begutachtung:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer

Betreuer:

Dipl.-Ing. (FH) Reinhard Brandner

Graz, April 2012

---





## Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die in den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, April 2012

.....

Wolfgang Gatternig

---



## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen herzlich bedanken, die mich während meines Studiums und bei der Erstellung dieser Masterarbeit geistig, moralisch und finanziell unterstützt haben.

Für die unermüdliche Unterstützung und Betreuung bei der Erstellung meiner Masterarbeit möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer und speziell bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Reinhard Brandner, aber auch bei allen Mitarbeitern des Institutes für Holzbau und Holztechnologie sowie der holz.bau forschungs gmbh bedanken.

Mein Dank gilt auch meinen guten Freunden und Studienkollegen sowie ganz besonders meinen Freunden aus dem Beton- und Holzbauzeichensaal, mit denen ich viele schöne, lustige aber auch arbeitsreiche Stunden erleben durfte.

Der größte Dank gebührt meiner Familie, die mich während meiner gesamten Ausbildung und in jeder Lebenslage unterstützt hat.

---



## Kurzfassung

### Prüftechnische Ermittlung der Schubfestigkeit von Vollholz und Analyse des Größeneinflusses

Ziel dieser Masterarbeit war es, neue Erkenntnisse hinsichtlich eines Größeneinflusses auf die Schubfestigkeit von Vollholz zu erlangen, wobei dieser Einfluss speziell für Biegeträger, welche einen großen Anwendungsbereich des Holzbaus abdecken, von Bedeutung ist. Diese neuen Erkenntnisse sind notwendig, da die derzeitige Normung für Schubfestigkeiten keine Anpassungen im Bezug auf das beanspruchte Volumen, sondern lediglich eine Abhängigkeit der Schubfestigkeit von den Festigkeitsklassen, vorsieht, ein Größeneinfluss jedoch in vielen Forschungsarbeiten beschrieben wird.

Im Zuge dieser Arbeit wurden an sieben Prüfserien mit in Summe 221 Prüfträgern die Schubkennwerte mithilfe einer Biegeprüfkonfiguration ermittelt. Um ein Biegezugversagen an möglichst vielen Prüfträgern auszuschließen, kam eine Prüfkonfiguration mit I-Trägern zur Anwendung, wobei der Steg den Prüfquerschnitt darstellte. Die Abmessungen des Steges variierten in der Höhe zwischen 75 mm und 300 mm und in der Breite zwischen 40 mm und 80 mm. Die Länge des Prüfträgers wurde in Abhängigkeit zur Steghöhe festgelegt und lag bei 985 mm für die kleinsten und 3940 mm für die größten Prüfträgerabmessungen.

Mittels einer statistischen Auswertung erfolgte abschließend eine Untersuchung hinsichtlich der Einflüsse der unterschiedlichen geometrischen Parameter und deren Größenvarianz auf die Schubfestigkeit.

Als Fazit dieser Arbeit kann festgehalten werden, dass eine deutliche Abhängigkeit zwischen der Schubfestigkeit und den schubbeanspruchten Bereichen besteht. Infolgedessen ist eine Anpassung der Normung, bei welcher die Bauteilgröße mittels eines Korrekturfaktors berücksichtigt wird, empfohlen.

---



## Abstract

### **Determination of the shear strength of solid timber by testing and analysis of the member size effect**

The goal of this thesis was to broaden knowledge regarding a size effect on the shear strength of solid wood. This effect is of particular importance for bending beams stressed in bending, as common in timber construction. New examinations are necessary since current standards for shear strength do not provide a modification factor regarding the stressed volume. The standards only regulate shear strength in dependency of the strength classes, whereas a size effect is, however, described in many studies.

In the frame of this thesis, the shear characteristics have been determined on seven test series, with a total of 221 test specimens and by means of a bending test configuration. To exclude a bending failure in as many test specimens as possible, a testing configuration with I-beams was used. The actual test section was provided by the web. The dimensions of the web varied in depth between 75 mm and 300 mm and in width between 40 mm and 80 mm. The length of the test specimens was linked to the depth of the web. The length was 985 mm for the smallest test specimens and 3,940 mm for the largest test specimens.

A statistical analysis was used to finally examine the influence of various geometric parameters and their changing structure size on the shear strength.

In conclusion, it can be noted that there is a significant dependency between the shear strength and the shear-stressed areas. According to this, an adjustment of current standards, in which the geometrical dimensions are taken into account by means of a correction factor, is proposed.

---





# Inhaltsverzeichnis

|          |  |    |
|----------|--|----|
| <b>1</b> | <b>Einleitung und Forschungsfrage</b>  |    |
| 1.1      | Motivation .....   | 2  |
| 1.1.1    | Ziel der Arbeit.....   | 2  |
| 1.2      | Strukturierung der Masterarbeit.....   | 3  |
| 1.3      | Allgemeine Definitionen und Begriffsbeschreibungen .....   | 4  |
| 1.3.1    | Spannung vs. Festigkeit .....  | 4  |
| 1.3.2    | Einführung zum Thema Schub in Biegeträgern .....   | 4  |
| 1.3.3    | Isotropes, anisotropes und orthotropes Materialverhalten .....   | 6  |
| 1.3.4    | Größeneinfluss - Allgemein .....   | 6  |
| 1.3.5    | Unterscheidung zwischen merkmalsfreien Kleinproben („clear wood“) und Bauholz („timber“) .....                             | 7  |
| 1.3.6    | Einfluss der Holzfeuchte auf die Schubfestigkeit.....  | 7  |
| 1.3.7    | Einfluss der Rohdichte auf die Schubfestigkeit .....   | 8  |
| 1.3.8    | Schubbeanspruchte Fläche $A_S$ .....   | 9  |
| 1.4      | Normative Regelungen zur Schubfestigkeit.....  | 10 |
| 1.4.1    | ON EN 338 Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen .....   | 10 |
| 1.4.1.1  | ON EN 338 (2003) [9] .....   | 10 |
| 1.4.1.2  | ON EN 338 (2009) [8] .....   | 10 |
| 1.4.2    | Eurocode Nr. 5 (1987) Gemeinsame einheitliche Regeln für Holzbauwerke [6] .....  | 11 |
| 1.4.3    | enBR (2007) eurocodenahe Bemessungsrichtlinie [3] .....  | 12 |
| 1.4.4    | SIA 265 (2003) Bauwesen - Holzbau [13].....  | 12 |
| 1.4.5    | DIN 1052 (2008) Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken [1] .....  | 12 |
| 1.4.6    | Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung lt. ON EN 408 [5]... ..  | 12 |
| 1.4.7    | Zusammenfassung der in den Normen gegebenen Grenzwerte .....   | 14 |
| 1.5      | Referenzierbare Forschungsarbeiten zum Thema Größeneinfluss und der Abhängigkeit Schubfestigkeit vs. Biegefestigkeit ..... | 15 |
| 1.5.1    | Sprödbrechtheorie nach Weibull [20] und Seil-Ketten-Modell nach Mistler [17] .....   | 15 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.5.2 | Größeneinfluss nach Longworth [30] und Gehri [26].....   | 16 |
| 1.5.3 | Größeneinfluss nach Asselin [21] .....   | 16 |
| 1.5.4 | Vertiefende Betrachtung zum Einfluss der Größeneffekte nach Lackner [15] .....   | 17 |
| 1.5.5 | Biegefestigkeitsabhängigkeit nach Schickhofer [35].....  | 20 |
| 1.5.6 | Zusammenfassung der Forschungsergebnisse bezüglich des Größeneffektes auf die Schubfestigkeit von Voll- und Brettschichtholz ..... | 20 |

## 2 Material und Methoden

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>2.1</b> | <b>Material und Prüfkfiguration.....</b>   | <b>22</b> |
| 2.1.1      | Allgemeine Erläuterungen zu den Prüfkfigurationen .....  | 22        |
| 2.1.2      | Ausgangsmaterial .....   | 23        |
| 2.1.3      | Voruntersuchungen .....  | 23        |
| 2.1.4      | Abweichungen der Prüfkfiguration gegenüber den Vorversuchen nach Lackner [15] und gegenüber der Vordimensionierung lt. Abschnitt 2.2.1 ..... | 25        |
| 2.1.5      | Übersicht über den Prüfumfang .....  | 27        |
| <b>2.2</b> | <b>Vordimensionierung der Prüfserien .....</b>   | <b>29</b> |
| 2.2.1      | Rechenablauf für die Vordimensionierung anhand der Serie T-1 .....   | 29        |
| 2.2.2      | Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Vorbemessung .....  | 34        |
| 2.2.2.1    | Serie T-1 .....  | 34        |
| 2.2.2.2    | Serie T-2 .....  | 35        |
| 2.2.2.3    | Serie T-3 .....  | 36        |
| 2.2.2.4    | Serie T-4 .....  | 37        |
| 2.2.2.5    | Serie T-5 .....  | 38        |
| 2.2.2.6    | Serie T-6 .....  | 39        |
| 2.2.2.7    | Serie T-7 .....  | 40        |
| 2.2.3      | Vordimensionierung der Biegeprüfserie T-8 .....  | 41        |
| 2.2.4      | Verwendung der Daten aus der Vordimensionierung .....  | 44        |
| <b>2.3</b> | <b>Prüfvorbereitung .....</b>  | <b>45</b> |
| 2.3.1      | Verwendete Bearbeitungs-, Mess- und Prüfgeräte sowie Hilfsmaterialien.....   | 45        |
| 2.3.1.1    | Bearbeitungsgeräte .....   | 45        |
| 2.3.1.2    | Messgeräte .....   | 48        |
| 2.3.1.3    | Prüfgeräte .....   | 49        |
| 2.3.1.4    | Hilfsmaterialien .....   | 52        |
| 2.3.2      | Prüfträgerherstellung .....  | 53        |
| 2.3.2.1    | Verklebung .....   | 53        |

---

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 2.3.2.2    | Konditionierung der Prüfräger .....  | 54        |
| 2.3.2.3    | Krafteinleitungs- und Auflagerverstärkung .....  | 55        |
| <b>2.4</b> | <b>Prüfdurchführung .....</b>  | <b>60</b> |
| 2.4.1      | Allgemeine Beschreibung zu den Prüfungen .....   | 61        |
| 2.4.1.1    | Bestimmung des Holzfeuchtegehalts .....  | 61        |
| 2.4.2      | Serie T-1 .....  | 63        |
| 2.4.3      | Serie T-2 .....  | 64        |
| 2.4.4      | Serie T-3 .....  | 65        |
| 2.4.5      | Serie T-4 .....  | 66        |
| 2.4.6      | Serie T-5 .....  | 67        |
| 2.4.7      | Serie T-6 .....  | 68        |
| 2.4.7.1    | Bestimmung des Schubmoduls .....   | 69        |
| 2.4.8      | Serie T-7 .....  | 72        |
| 2.4.9      | Serie T-8 (4-Punkt-Biegeprüfungen) .....   | 73        |
| <b>2.5</b> | <b>Übersicht der Bezeichnungen und verwendeten Formeln sowie<br/>notwendige Anpassungen für die Prüfergebnisse .....</b> | <b>74</b> |
| 2.5.1      | Bezeichnungen der verwendete Formeln.....  | 74        |
| 2.5.2      | Anpassung der Prüfergebnisse an die Referenzholzfeuchte von 12% ..   | 75        |
| 2.5.3      | Abweichungen zwischen Stab- und Scheibentheorie .....  | 76        |
| <b>3</b>   | <b>Ergebnisse</b>  |           |
| <b>3.1</b> | <b>Übersicht.....</b>  | <b>78</b> |
| 3.1.1      | Bezeichnungsbeschreibung der Ergebnisübersichten.....  | 78        |
| 3.1.2      | Versagensarten und deren Häufigkeiten .....  | 80        |
| 3.1.3      | Übersicht der empirischen Häufigkeitsverteilungen (empD) der einzelnen<br>Serien .....                                   | 81        |
| <b>3.2</b> | <b>Ergebnisübersicht Serie T-1 .....</b>   | <b>83</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Ergebnisübersicht Serie T-2 .....</b>   | <b>85</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Ergebnisübersicht Serie T-3 .....</b>   | <b>87</b> |
| <b>3.5</b> | <b>Ergebnisübersicht Serie T-4 .....</b>   | <b>89</b> |
| <b>3.6</b> | <b>Ergebnisübersicht Serie T-5 .....</b>   | <b>91</b> |
| <b>3.7</b> | <b>Ergebnisübersicht Serie T-6 .....</b>   | <b>93</b> |
| <b>3.8</b> | <b>Ergebnisübersicht Serie T-7 .....</b>   | <b>95</b> |
| <b>3.9</b> | <b>Ergebnisübersicht Serie T-8 (4-Punkt-Biegeprüfungen) .....</b>  | <b>97</b> |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>4</b>   | <b>Diskussion</b>  |            |
| 4.1        | Vorsortierung der Prüfdaten .....  | 102        |
| 4.2        | Korrekturen .....  | 107        |
| 4.2.1      | Korrektur aufgrund des Fehlers zwischen Stab- und Scheibentheorie, ermittelt auf Basis einer FE-Studie (Gatterinig [25]) ..... | 107        |
| 4.2.2      | „Maximum Likelihood Estimation“ (MLE) für rechts zensierte Daten ..  | 108        |
| <b>4.3</b> | <b>Statistische Untersuchungen</b> .....   | <b>110</b> |
| 4.3.1      | Übersicht über die ermittelten Schubkenngrößen.....  | 110        |
| 4.3.2      | Vergleich der Schubfestigkeit mit den Größeneinflüssen.....  | 111        |
| 4.3.2.1    | Beziehung Schubfestigkeit $f_{v,1,12}$ vs. Prüfquerschnittsbreite $b_{Pr-QS}$ .....  | 111        |
| 4.3.2.2    | Beziehung Schubfestigkeit $f_{v,1,12}$ vs. Prüfquerschnittshöhe $h_{Pr-QS}$ .....  | 112        |
| 4.3.2.3    | Beziehung Schubfestigkeit $f_{v,1,12}$ vs. Prüfquerschnitt $A_{Pr-QS}$ .....   | 113        |
| 4.3.2.4    | Beziehung Schubfestigkeit $f_{v,1,12}$ vs. schubbeanspruchter Fläche $A_S$ .....   | 114        |
| 4.3.2.5    | Beziehung Schubfestigkeit $f_{v,1,12}$ vs. schubbeanspruchtem Volumen $V_S$ .....  | 115        |
| 4.3.3      | Vergleich der Schubfestigkeit mit den Festigkeitsklassen.....  | 116        |
| 4.3.3.1    | Vergleich der Schubfestigkeit mit Steifigkeitseigenschaften und Rohdichten   | 116        |
| 4.3.3.2    | Vergleich der Schubfestigkeit mit der Biegefestigkeit .....  | 117        |
| 4.3.4      | Schubmodulverhältnisse der Serie T-6.....  | 118        |
| 4.3.5      | Verhältnis Rohdichte zu E-Modul .....  | 120        |
| 4.3.6      | Serie T-8 (4-Punkt-Biegeprüfungen) .....   | 122        |
| <b>5</b>   | <b>Schlussbetrachtung</b>  |            |
| 5.1        | Resümee .....  | 126        |
| 5.2        | Fazit .....  | 128        |
| 5.3        | Ausblick .....   | 129        |
| <b>6</b>   | <b>Literaturverzeichnis</b>  |            |
| 6.1        | Normen .....   | 131        |
| 6.2        | Bücher/ Dissertationen/ Abschlussarbeiten .....  | 132        |
| 6.3        | Berichte/ Skripten .....   | 132        |
| 6.4        | Zulassungen/ Produktinformationen .....  | 134        |
| 6.5        | Internet .....   | 134        |

# 1 Einleitung und Forschungsfrage



Zu Beginn der Arbeit erfolgt eine Einleitung zum Thema Schub in Biegeträgern. Im Anschluss daran beschäftigt sich dieses Kapitel mit einer Literaturrecherche, bei welcher auf die derzeitige Normung und vertiefend auf den Größeneinfluss von Schubfestigkeitskennwerten eingegangen wird.

## 1.1 Motivation

*„Bauingenieure haben dafür Sorge zu tragen, dass ihre Bauwerke sicher und zuverlässig geplant, berechnet und ausgeführt werden. Auf der Materialseite sind daher Baustoffkennwerte zu ermitteln und festzulegen, die diesen Anforderungen gerecht werden und außerdem das möglichst reale Verhalten des Baustoffes im Bauwerk wiedergeben. Für die Ermittlung von Kenngrößen des Baustoffes Holz müssen diese daher an Probekörpern in Bauteilabmessungen ermittelt werden.“ (Schickhofer [36])*

Ein großer Teil der von der Holzindustrie produzierten Produkte und damit errichteten Konstruktionen sind Biegeträger, ob dies „einfache“ zimmermannstechnische Dachstühle aus Vollholz oder große Hallenkonstruktionen aus Brettschichtholz sind. Für all diese hat die Schubfestigkeit eine wesentliche Bedeutung.

Zur Bemessung der Konstruktionen aus Vollholz kommen die charakteristischen Werte der Schubfestigkeit  $f_{v,k}$  lt. ON EN 338 [8] zur Anwendung. Diese Werte sind jedoch zu hinterfragen, da sie unabhängig vom schubbeanspruchten Volumen konstant bleiben und lediglich in Abhängigkeit der Festigkeitsklasse variieren.

### 1.1.1 Ziel der Arbeit

In dieser Masterarbeit wird auf die oben genannte Problematik eingegangen. Hierzu erfolgte eine Literaturrecherche (vertiefend in der Arbeit von Lackner [15]) und eine prüftechnische Ermittlung der Schubkennwerte unter einer Variation des Prüfquerschnittes als auch der Festigkeitsklasse mit einer statistischen Auswertung der ermittelten Daten.

Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen sollen in Zukunft zu einer wirtschaftlicheren bzw. realitätsnäheren Bemessung von Biegeträgern aus Vollholz hinsichtlich der Schubbeanspruchung führen.

## 1.2 Strukturierung der Masterarbeit

Zu Beginn dieser Masterarbeit erfolgt eine allgemeine Definitions- und Begriffsbeschreibung zum Thema Schub sowie eine Darstellung der Eigenheiten von Schub in Bezug auf den Werkstoff Holz. Anschließend folgt eine eingehende Literaturrecherche bezüglich der derzeitigen europäischen Normung und zum Thema „Größeneinflüsse auf die Schubfestigkeit von Vollholz“.

Im nachfolgenden Kapitel 2 (Material und Methoden) wird das verwendete Ausgangsmaterial, die Prüfkongfiguration, die Vordimensionierung der Prüfträger, deren Herstellung und im Speziellen die Prüfdurchführung selbst beschrieben.

Die bei der Prüfdurchführung gesammelten Ergebnisse sind in Kapitel 3 tabellarisch sowie grafisch (deren empirische Häufigkeitsverteilung) dargestellt. Zusätzlich werden die Versagensarten sowie deren Lage innerhalb der empirischen Häufigkeitsverteilungen der Schubspannungen zum Zeitpunkt des Versagens, getrennt nach den einzelnen Serien, dargestellt.

Anschließend folgen im Kapitel 4 die statistischen Auswertungen der zuvor dargestellten Prüfergebnisse. Hierfür wurden die (zensierten) Ergebnisse der Prüfträger, im Speziellen die Schubfestigkeiten, in Abhängigkeit zu den unterschiedlichen geometrischen Parametern (der Breite des Prüfquerschnittes, der Höhe des Prüfquerschnittes, der Fläche des Prüfquerschnittes sowie der schubbeanspruchten Fläche und dem schubbeanspruchten Volumen) sowie den Festigkeitsklassen lt. ON EN 338 [8] untersucht.

Als Abschluss erfolgt eine Schlussbetrachtung, welche die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit zusammenfasst und einen Ausblick auf deren weitere Verwendung anstellt.

## 1.3 Allgemeine Definitionen und Begriffsbeschreibungen

Nachstehend erfolgt eine kurze Einleitung zum Thema Schub in Biegeträgern. Zusätzlich wird auf die Eigenheiten des Werkstoffes Holz eingegangen und diese hinsichtlich einer Beanspruchung auf Schub genauer betrachtet.

### 1.3.1 Spannung vs. Festigkeit

Die (mechanische) Spannung ist ein Begriff aus der Festigkeitslehre und ist definiert als Kraft pro Flächeneinheit (z.B.  $[N/mm^2]$ ). Sie kann weiter unterteilt werden in Normalspannung (Zug-, Druck- und Biegespannung) und Schubspannung [46].

Die Festigkeit ist eine Werkstoffeigenschaft und eine spezielle Form der Spannung. Sie beschreibt den mechanischen Widerstand, den ein Werkstoff einer plastischen Verformung oder Trennung (Bruch) entgegensetzt [44].

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Schubspannungen mit  $\tau$  in  $[N/mm^2]$  und die Schubfestigkeiten mit  $f_v$  in  $[N/mm^2]$  bezeichnet. Anschließend verwendete Indizes werden bei deren jeweiliger Verwendung noch genauer beschrieben.

### 1.3.2 Einführung zum Thema Schub in Biegeträgern

Entsprechend der Elastizitätstheorie entstehen bei Biegebeanspruchung Schubspannungen. Diese Schubspannungen rechtwinklig zur Balkenachse (Abb. 1.1 rechts) treten aufgrund der „Dualität der Schubspannungen“ stets gleichzeitig mit Schubspannungen gleicher Größe parallel zur Balkenachse (siehe Abb. 1.1; Schickhofer [37]) auf.

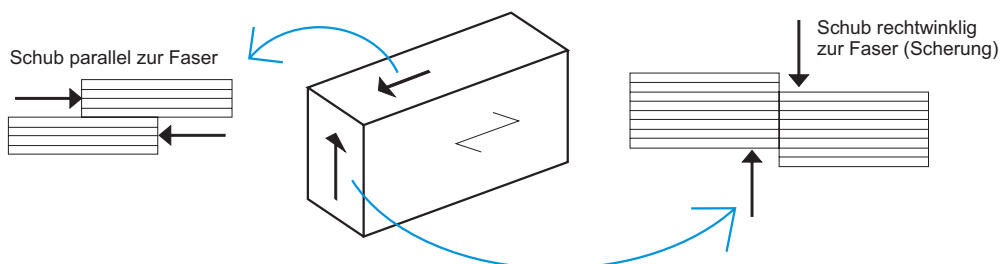


Abb. 1.1 Schubspannungen an einem Biegebalken zufolge Querkraftbeanspr. (Lackner [15])

Zufolge des natürlichen Wachstums bzw. des Stammaufbaus (biomechanisches Holzmodell, Mattheck [16]) liegt die Schubfestigkeit parallel zur Faser um ein Vielfaches niedriger als die Schubfestigkeit rechtwinklig zur Faser. Infolgedessen wird im Allgemeinen bei einer Beanspruchung zufolge Schub aus Querkraft die Schubfestigkeit parallel zur Faser maßgebend.



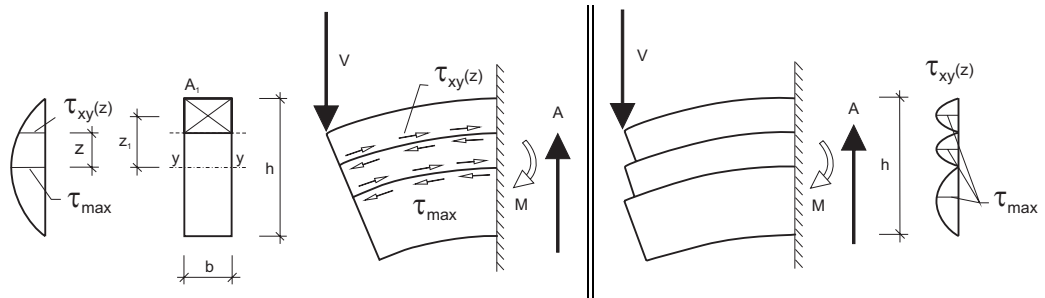


Abb. 1.2 Schubspannungen an einem Kragträger zufolge einer Querkraft V (lt. Lackner [15]), links: Träger mit starrem Verbund, rechts: Träger mit nachgiebigem Verbund

Wie in Abb. 1.2 rechts (nach Schickhofer [37]) dargestellt ist, erfährt ein lose übereinander geschichteter Träger (nachgiebiger Verbund) unter einer Querkraft V eine Verschiebung der einzelnen Teilträger. Dies gilt speziell für den idealen Fall, bei welchem zwischen den Teilstücken keine Reibung ( $\mu=0$ ) vorherrscht. Der in Abb. 1.2 links dargestellte Vollholzträger lässt hingegen keine gegenseitige Verschiebung zu (starrer Verbund). Diese starre Koppelung zwischen den Teilträgern erzwingt Schubspannungen  $\tau_{xy}(z)$ , welche sich für einen Rechteckquerschnitt nach der folgenden Glg. 1.1 bestimmen lassen:

$$\tau_{xy}(z) = \frac{V \cdot S_y(z)}{J_y(z) \cdot b}, \quad \text{mit dem statischen Moment } S_y(z) = \int_A z \cdot dA, \quad 1.1$$

|                |   |
|----------------|---|
| V              | Querkraft [N]   |
| $\tau_{xy}(z)$ | Schubspannung $\tau_{xy}$ an der Stelle z [N/mm <sup>2</sup> ]                            |
| $S_y(z)$       | statisches Moment an der Stelle z [mm <sup>3</sup> ]                                      |
| $J_y(z)$       | Trägheitsmoment an der Stelle z [mm <sup>4</sup> ]  |
| b              | Breite des Querschnitts [mm]  |
| $A_1$          | Fläche des abgetrennt gedachten Querschnittsteils [mm <sup>2</sup> ]                      |
| $z_1$          | Schwerpunktsabstand des abgetrennt gedachten Querschnittsteils vom Gesamtschwerpunkt [mm] |

Für den in Abb. 1.2 dargestellten Rechteckquerschnitt verläuft die Schubspannung parabolförmig, wobei der Maximalwert in der neutralen Faser liegt. Hierfür lässt sich  $\tau_{max}$  nach der folgenden Glg. 1.2 bestimmen:

$$\tau_{max} = \frac{3}{2} \cdot \tau_{mean}, \quad \text{mit } \tau_{mean} = \frac{V}{A} \quad 1.2$$

|               |   |
|---------------|---|
| V             | Querkraft [N]                               |
| A             | Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]       |
| $\tau_{mean}$ | mittlere Schubspannung [N/mm <sup>2</sup> ] |
| $\tau_{max}$  | maximale Schubspannung [N/mm <sup>2</sup> ] |

### 1.3.3 Isotropes, anisotropes und orthotropes Materialverhalten

Isotrop, anisotrop und orthotrop sind Begriffe aus der Mechanik (Schanz [34]), welche die Eigenschaften eines Materials hinsichtlich einer möglichen Richtungsabhängigkeit und Symmetrie beschreiben.

**Isotropes** Materialverhalten bezeichnet Materialien, welche in allen Richtungen das gleiche Werkstoffverhalten besitzen. Im linear-elastischen Bereich trifft dies auf viele technische Materialien wie z.B. Glas zu [34].

**Anisotropes** Materialverhalten ist durch eine Richtungsabhängigkeit der Materialkonstanten (E-Module, Festigkeiten, etc.) gekennzeichnet. Daraus resultieren 21 unabhängige Materialkonstanten, die keinerlei Symmetrie besitzen. Diese Materialien sind jedoch sehr selten [34].

**Orthotropes** Materialverhalten ist ein Spezialfall der Anisotropie. Bei solchen Materialien gibt es drei aufeinander senkrecht stehende Symmetrieebenen, wodurch einige Materialkonstanten zu null werden. Dementsprechend weist ein orthotropes Material neun unabhängige Elastizitätskonstanten auf. Ein typisches Beispiel dafür ist Holz oder faserverstärkter Kunststoff mit einer Faserorientierung in die entsprechenden Richtungen [34].

### 1.3.4 Größeneinfluss - Allgemein

Wie in [45] erläutert, beschreibt der Größeneinfluss die Zusammenhänge zur Übertragbarkeit von unter genormten Bedingungen ermittelten Werkstoffkennwerten auf von den Prüfbedingungen abweichende Verhältnisse. Dabei wird der Größeneinfluss in folgende vier Bereiche unterteilt:

- **statistischer Größeneinfluss:** Dieser beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass bei größeren Bauteilen bzw. beanspruchtem Bauteilvolumen, auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von versagensinitiierenden Fehlstellen im beanspruchten Bereich ansteigt.
- **spannungsmechanischer / geometrischer Größeneinfluss:** Auch hier lässt sich die Festigkeit in Abhängigkeit des Werkstoffvolumens darstellen, jedoch liegt hier die Ursache an unterschiedlichen Spannungsgradienten im Werkstoff.
- **technologischer Größeneinfluss:** Dieser beruht auf den Unterschieden im Gefüge des Werkstoffes, die aus der Herstellung und Bearbeitung resultieren. So können sich z.B. Größe und Form der Fehlstellen mit dem sich ändernden Bauteilvolumen unterscheiden.
- **oberflächentechnischer Größeneinfluss:** Dieser bezieht sich auf die begrenzte Eindringtiefe von Verfahren zum Einbringen von Druckeigenspannungen, aber auch

auf den Einfluss der Bauteilrandzone, welche im Verhältnis zum Bauteilvolumen nicht konstant gleich groß ist. Dies ist z.B. beim Faseranschnitt von Vollholz der Fall.

Aufgrund dieser Größeneinflüsse müssen bei der Auslegung von Bauteilen entsprechende Korrekturfaktoren, wie dem Volumenbeiwert  $k_{vol}$  (lt. Schickhofer [37]), mit berücksichtigt werden. Als Alternative dazu kann ein unterer Grenzwert der Festigkeit, welcher die Variationen über die Bauteilgröße abdeckt, bestimmt werden. Hierbei besteht jedoch die Problematik, dass vor allem bei kleineren Bauteilgrößen eine unwirtschaftliche Ausnutzung vorliegen kann.

Um gezielte Aussagen über den Größeneinfluss auf Baustoffkenngrößen treffen zu können, ist bei dessen Untersuchung darauf zu achten, dass möglichst viele Einflussfaktoren, wie die Holzart, die Holzfeuchte uvm., konstant gehalten werden.

### 1.3.5 Unterscheidung zwischen merkmalsfreien Kleinproben („clear wood“) und Bauholz („timber“)

Die ersten Kennwerte für Holzwerkstoffe wurden für den Maschinen- und Flugzeugbau ermittelt. Dafür wurden entsprechend den dafür gültigen Normen (wie der DIN 52186 [2]) merkmalsfreie Kleinproben („clear wood“) geprüft. Gemäß Schickhofer [36] liegen die dabei ermittelten Kennwerte jedoch um ein Vielfaches höher als jene an bauteilgroßen Proben ermittelten (z.B. liegt nach [36] die ermittelte Zugfestigkeit bei „fehlerfreiem“ Holz bei rund 100 N/mm<sup>2</sup> und jene an Holz in Bauteilgröße bei rund 10 N/mm<sup>2</sup>).

Diese starken Abweichungen sind vor allem durch Strukturstörungen und den dadurch verursachten beträchtlichen Streuungen sowie der, durch die aufgrund des natürlichen Wuchses bedingte, Anisotropie im Werkstoff Holz zu erklären ([36]).

### 1.3.6 Einfluss der Holzfeuchte auf die Schubfestigkeit

Entsprechend der vertiefenden Literaturrecherche bezüglich des Einflusses der Holzfeuchte nach Lackner [15], lässt sich folgende Aussage treffen:

Nach Kollmann [14] ist die Holzfeuchte der wesentlichste Einflussparameter auf die Holzeigenschaften.

Wie in Abb. 1.3 dargestellt, gibt Kollmann an, dass die höchste Scherfestigkeit (bei Kleinproben) bei einer Holzfeuchte von 8% liegt. Bei einer Feuchtigkeitszunahme bzw. Feuchtigkeitsabnahme von dieser Grenze von 8%, sinkt die Scherfestigkeit ( $f_v$ ) von Holz um ca. 3% je 1% Feuchtigkeitszu- bzw. -abnahme.

Die Untersuchungen von Kretschmann und Green [28], die im baurelevanten Bereich von 12% bis 19% einen Abfall der Scherfestigkeit von 2,7% je 1% Feuchtezunahme feststellten, bestätigten, dass bei einer Zunahme der Holzfeuchte die Scherfestigkeit sinkt und auch die von Kollmann angegebene Größenordnung von 3% realistisch ist.

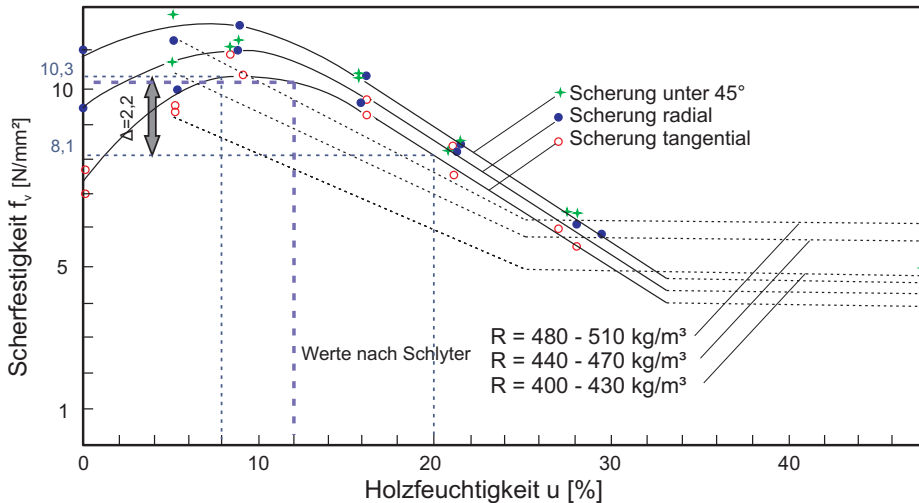


Abb. 1.3 Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit  $f_v$  [N/mm<sup>2</sup>] und Holzfeuchte  $u$  [%] bei Kiefer (R beschreibt hier die Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]), nach Kollmann [14]

Um den Einfluss der Holzfeuchte auf die Prüfergebnisse möglichst gering zu halten, sind die Prüfkörper vor deren Prüfung entsprechend dem Referenzklima nach ON EN 408 [5] zu konditionieren. Dadurch wird, insbesondere bei Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.), eine möglichst konstante Referenzholzfeuchte von 12% erreicht.

### 1.3.7 Einfluss der Rohdichte auf die Schubfestigkeit

Wie in der Literaturrecherche von Lackner [15] genauer beschrieben und wie die Untersuchungen von Müller [31] (Abb. 1.4) zeigen, scheint bei Fichte die Schubfestigkeit trotz Variation der Rohdichte nahezu konstant.

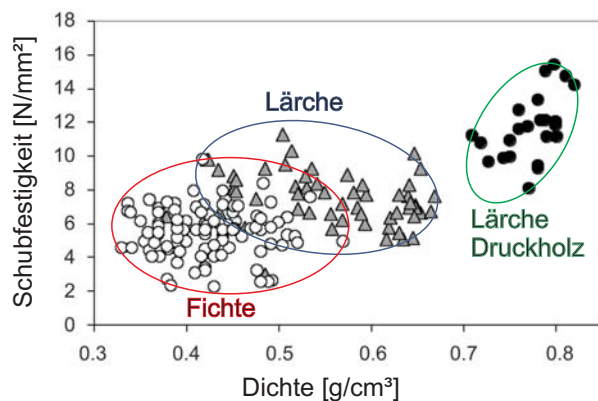


Abb. 1.4 Beziehung zwischen Schubfestigkeit und Rohdichte bei 12% Holzfeuchte, nach [31]

### 1.3.8 Schubbeanspruchte Fläche $A_S$

Entsprechend den Literaturrecherchen von Lackner [15] ist die theoretische Schubfläche  $A_S$  als die Länge aus dem Abstand zwischen Lasteinleitung und Auflager mal der Breite definiert. Aufgrund der überdrückten Bereiche unter der Lasteinleitungs- und Auflagerplatte wird dort die Schubfestigkeit jedoch deutlich erhöht.

Aus diesem Grund wird für die korrigierte Schubfläche ein, wie in Abb. 1.5 rechts dargestellter, Lastausbreitungswinkel von  $30^\circ$  angenommen. Diese Annahme basiert auf den Vorversuchen von Lackner [29] sowie der Arbeit von Salzmann [19]. Die korrigierte Schubfläche  $A_{S,korr}$  ergibt sich daher aus der korrigierten Schublänge  $l_{korr}$  mal der Breite des Prüfquerschnittes (hier  $b_2$ ).

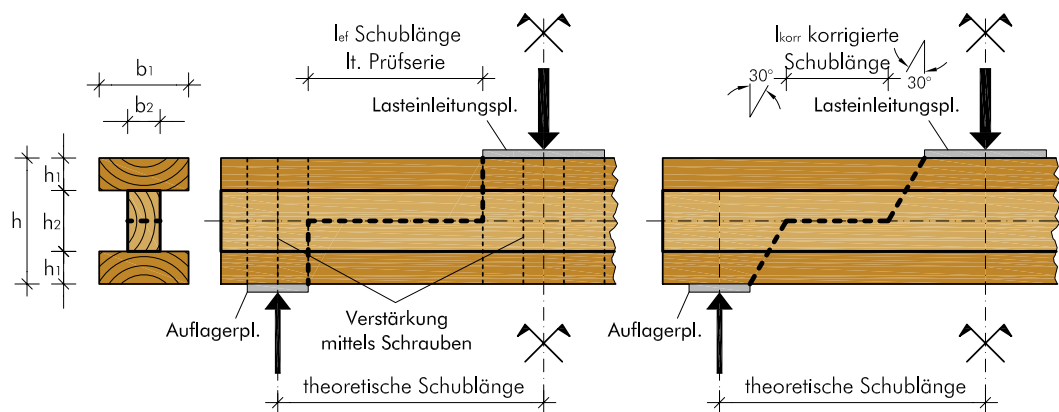


Abb. 1.5 Vergleich der Schublängen am, im Kapitel 2 genauer beschriebenen, Prüfquerschnitt; links: Schublänge  $l_{ef}$  lt. Prüfserie; rechts: korrigierte Schublänge  $l_{korr}$

Für die im Kapitel 2 beschriebenen Prüfkonfigurationen ist es erforderlich, die Schubfläche möglichst groß und die Stützweite zwischen den Auflagern möglichst gering zu gestalten. Dies ist notwendig, um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Schubbrüchen zu erhöhen. Eine Möglichkeit ist die Verstärkung des Lasteinleitungs- sowie Auflagerbereiches, um die Lastausbreitung möglichst zu minimieren. Diese Verstärkungsmöglichkeit wurde bereits von Gehri [26] (mithilfe von eingeklebten Ankerstangen) vorgeschlagen und für dieses Projekt (vergleiche  $l_{ef}$  vs.  $l_{korr}$  Abb. 1.5) mithilfe von Vollgewindeschrauben adaptiert.

## 1.4 Normative Regelungen zur Schubfestigkeit

Im nachfolgenden Abschnitt wird auf die europäische Normung zum Thema Schubfestigkeit eingegangen. Diesbezüglich werden die Regelungen für Vollholz näher betrachtet.

### 1.4.1 ON EN 338 Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen

#### 1.4.1.1 ON EN 338 (2003) [9]

In der Vorgängernorm der derzeit gültigen ON EN 338 (2009) aus dem Jahr 2003, war die charakteristische Schubfestigkeit  $f_{v,k}$  in einem direkten Verhältnis zur charakteristischen Biegefestigkeit  $f_{m,k}$ , entsprechend Glg. 1.3, gegeben und mit einer Obergrenze von  $3,8 \text{ N/mm}^2$  definiert.

$$f_{v,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} 3,8 \\ 0,2 \cdot f_{m,k}^{0,8} \end{array} \right\} \quad 1.3$$

#### 1.4.1.2 ON EN 338 (2009) [8]

In der seit 2009 gültigen Fassung der ON EN 338 [8] sind die Festigkeitsklassen mit den dazugehörigen Festigkeitseigenschaften, Steifigkeitseigenschaften und Rohdichten für die Bemessung von Holzbauwerken entsprechend Tab. 1.1 gegeben.

|   |              | Nadelholz |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---|--------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|   |              | C14       | C16 | C18 | C20 | C22 | C24 | C27 | C30 | C35 | C40 | C45 | C50 |
| Festigkeitsseigenschaften (in $\text{N/mm}^2$ ) |              |           |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Biegung   | $f_{m,k}$    | 14        | 16  | 18  | 20  | 22  | 24  | 27  | 30  | 35  | 40  | 45  | 50  |
| Zug in Faserrichtung                            | $f_{t,0,k}$  | 8         | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 16  | 18  | 21  | 24  | 27  | 30  |
| Zug rechtwinklig zur Faserrichtung              | $f_{t,90,k}$ | 0,4       | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Druck in Faserrichtung                          | $f_{c,0,k}$  | 16        | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 25  | 26  | 27  | 29  |
| Druck rechtwinklig zur Faserrichtung            | $f_{c,90,k}$ | 2,0       | 2,2 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,1 | 3,2 |
| Schub   | $f_{v,k}$    | 3,0       | 3,2 | 3,4 | 3,6 | 3,8 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 |

Tab. 1.1 Ausschnitt aus Tabelle 1 – Festigkeitsklassen lt. ON EN 338 [8], hervorgehoben sind die charakteristischen Schubfestigkeiten  $f_{v,k}$  in Abhängigkeit der Festigkeitsklassen.

Zu sehen ist eine Abhängigkeit der Schubfestigkeit von der Biegefestigkeit, wobei diese bis zur Festigkeitsklasse C24 ansteigt und für höhere Klassen mit einer Obergrenze von  $4,0 \text{ N/mm}^2$  angegeben wird.

Bei einer Rückrechnung der lt. Tab. 1.1 gegebenen Werte würde sich folgende Beziehung zwischen  $f_{v,k}$  und  $f_{m,k}$  (Glg. 1.4) ergeben:

$$f_{v,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} 4,0 \\ 0,73 \cdot f_{m,k}^{0,53} \end{array} \right\} \quad 1.4$$

## 1.4.2 Eurocode Nr. 5 (1987) Gemeinsame einheitliche Regeln für Holzbauwerke [6]

In der Urversion der heute gültigen ON EN 1995-1-1 dem Eurocode Nr. 5 (1987) [6], ist die charakteristische Schubfestigkeit  $f_{v,k}$  ebenfalls in Abhängigkeit zur Biegefestigkeit gegeben, wobei diese zwischen  $f_{v,k} = 1,7 \text{ N/mm}^2$  für C1 ( $f_{m,k,visu} = 12,0 \text{ N/mm}^2$  und  $f_{m,k,masch} = 11,0 \text{ N/mm}^2$ ) und  $f_{v,k} = 6,0 \text{ N/mm}^2$  für C10 ( $f_{m,k,visu} = 75,0 \text{ N/mm}^2$  und  $f_{m,k,masch} = 68,0 \text{ N/mm}^2$ ) lag. Für die Festigkeitsklasse C5 ( $f_{m,k,visu} = 24,0 \text{ N/mm}^2$  und  $f_{m,k,masch} = 21,5 \text{ N/mm}^2$ ), die weitestgehend der derzeitigen Festigkeitsklasse C24 entspricht, war die charakteristische Schubfestigkeit mit  $f_{v,k} = 2,3 \text{ N/mm}^2$  gegeben.

Für die Bemessung auf Schub bei Brettschichtholzträger mit einem Volumen  $V \leq 0,1 \text{ m}^3$  muss die Bemessungslast  $Q_d$  die Bedingung nach Glg. 1.5 erfüllen. Dabei erfolgt eine Korrektur der Schubfestigkeit bezüglich des Einflusses der Größe des beanspruchten Volumens  $k_{vol,v}$  (lt. Glg. 1.6), des Einflusses der Verteilung der Querkraft  $k_{dis,v}$  und dem Einfluss der Trägerlänge  $k_l$  (lt. Glg. 1.7).

$$Q_d \leq k_{vol,v} \cdot k_{dis,v} \cdot k_l \cdot \left( \frac{4}{3} \cdot b \cdot h \cdot f_{v,d} \right) \quad 1.5$$

Hierbei stellt:

b ... die Trägerbreite und

h ... die Trägerhöhe dar,

$k_{dis,v}$  darf bei konstanter Querkraft und konstanter Höhe h mit 1,0 angenommen werden.

$$k_{vol,v} = \left( \frac{V_0}{V} \right)^{1/k_{wei}} \quad 1.6$$

$V_0$  Referenzvolumen ( $V_0 = 0,1 \text{ m}^3$ )

V Trägervolumen [ $\text{m}^3$ ]

$k_{wei}$  Weibull-Formparameter, kann mit  $k_{wei} = 5$  angenommen werden

$$k_l = \frac{1}{(l - 2 \cdot h)} \quad 1.7$$

l Trägerlänge

h Trägerhöhe

### 1.4.3 enBR (2007) eurocodenahe Bemessungsrichtlinie [3]

In den ausgearbeiteten „eurocodenahen“ Regeln, der enBR [3], sind die charakteristischen Schubfestigkeiten  $f_{v,k}$  für Vollholz über alle Festigkeitsklassen konstant mit  $2,7 \text{ N/mm}^2$  gegeben.

Für Brettschichtholzträger ist die charakteristische Schubfestigkeit  $f_{v,k}$  konstant mit  $3,0 \text{ N/mm}^2$  gegeben. Jedoch besteht bei diesen Bemessungsregeln die Möglichkeit einer Anpassung der Schubfestigkeit  $f_{v,k}$  in Abhängigkeit der Trägerhöhe. Unter einer Trägerhöhe von  $600 \text{ mm}$  kann die Schubfestigkeit mithilfe des Höhenkorrekturfaktors  $k_h$  um bis zu  $10\%$  erhöht werden.

### 1.4.4 SIA 265 (2003) Bauwesen - Holzbau [13]

In der derzeit gültigen Schweizer Norm für den Holzbau, der SIA 265 [13], sind für die Schubfestigkeit Bemessungswerte ( $f_{v,d}$ ) angeführt. Diese sind wie in der ON EN 338 [8] abhängig von den Festigkeitsklassen. Hier erfolgt jedoch lediglich eine Unterteilung für die „niedrigen“ Festigkeitsklassen (C20, C24 und C27),  $f_{v,d} = 1,5 \text{ N/mm}^2$  und eine für die „hohen“ Festigkeitsklassen (C35 und C45)  $f_{v,d} = 1,8 \text{ N/mm}^2$ .

Mithilfe des verwendeten Sicherheitsbeiwertes, welcher für normale Einwirkungen und die Feuchteklasse 1 ( $u \leq 12\%$ ) bei  $\gamma_m/\eta_m = 1,7$  [-] liegt, kann auf die charakteristische Schubfestigkeit  $f_{v,k}$  zurückgerechnet werden (für C24 ergibt sich beispielsweise die charakteristische Schubfestigkeit zu  $f_{v,k} \approx 1,5 \cdot 1,7 = 2,55 \text{ N/mm}^2$ ).

### 1.4.5 DIN 1052 (2008) Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken [1]

In der deutschen Norm, der DIN 1052 [1], ist die charakteristische Schubfestigkeit  $f_{v,k}$  für Vollholz über alle Festigkeitsklassen konstant mit  $2,0 \text{ N/mm}^2$  gegeben. Jedoch wurden für die hier gegebenen Festigkeiten bereits Risse im Holz implizit berücksichtigt.

### 1.4.6 Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung lt. ON EN 408 [5]

In der derzeit gültigen Prüfnorm ON EN 408 [5] wird die Schubfestigkeit  $f_v$  anhand des in Abb. 1.6 dargestellten Prüfkörpers mit den Abmessungen von  $l = (300 \pm 2) \text{ mm}$ ,  $b = (32 \pm 1) \text{ mm}$  und  $h = (55 \pm 1) \text{ mm}$  ermittelt. Dazu werden Stahlplatten an den Prüfkörper angeklebt. Nach dem Aushärten des Klebers ist der Prüfkörper entsprechend der dargestellten Prüfanordnung zu prüfen, wobei der Winkel zwischen Lasteinleitung und Längsachse des Prüfkörpers  $14^\circ$  betragen muss.



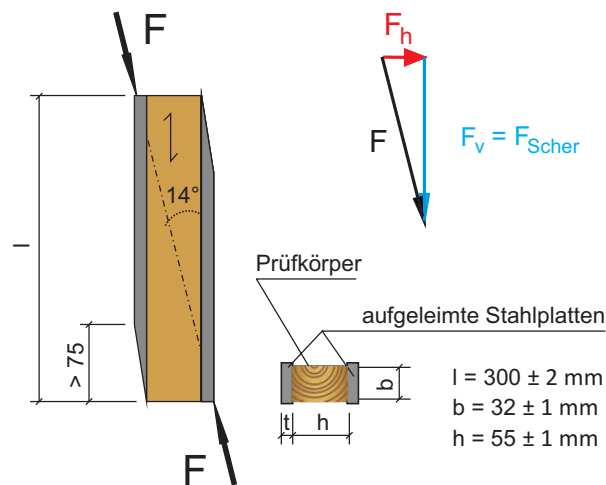


Abb. 1.6 Prüfkörper zur Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung lt. ON EN 408 [5]

Die Scherfestigkeit  $f_v$  ist anschließend nach der folgenden Glg. 1.8 zu ermitteln:

$$f_v = \frac{F_{max} \cdot \cos 14^\circ}{l \cdot b} \quad 1.8$$

Anzumerken ist, dass die ermittelte Scherfestigkeit eine Kombination aus zwei Spannungskomponenten ist. Einerseits wirkt, wie in Abb. 1.6 dargestellt, die Scherkraft  $F_v$ , resultierend aus der vertikalen Komponente der eingeleiteten Kraft  $F$  und zum Anderen die horizontale Komponente  $F_h$ , welche einen Querdruck auf den Prüfkörper ausübt. Aufgrund dieser Querkraft-Schubinteraktion (Überdrücken des Prüfquerschnittes) kann davon ausgegangen werden, dass die so ermittelte Scherfestigkeit  $f_v$  über dem tatsächlichen Schubtragvermögen liegt.

## 1.4.7 Zusammenfassung der in den Normen gegebenen Grenzwerte

Als Übersicht sind in Tab. 1.2 die charakteristischen Schubfestigkeitswerte der in Abschnitt 1.4 angeführten europäischen Normen zusammengefasst. Zu sehen ist der Wertebereich sowie der Wert für die Festigkeitsklasse C24.

| NORMEN                | Wertebereich<br>$f_{v,k}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | C24<br>$f_{v,k}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|-----------------------|---|--|
| ON EN 338 (2009)      | 3,00 - 4,00                                       | 4,00                                     |
| ON EN 338 (2003)      | 1,65 - 3,80                                       | 2,54                                     |
| Eurocode Nr. 5 (1987) | 1,70 - 6,00                                       | 2,30*                                    |
| enBR (2007)           | konst. 2,70                                       | 2,70                                     |
| SIA 265 (2003)        | 2,55 - 2,70                                       | 2,55                                     |
| DIN 1052 (2008)       | konst. 2,00**                                     | 2,00**                                   |

Tab. 1.2 Charakteristische Schubfestigkeitswerte  $f_{v,k}$  aus den europäischen Normen  
\* Festigkeitsklasse C5  
\*\* Mitberücksichtigung von Rissen im Holz

Zu sehen ist, dass für die Festigkeitsklasse C24 die  $f_{v,k}$ -Werte in einem Bereich von 2,0 bis 4,0 N/mm<sup>2</sup> liegen und somit zwischen den einzelnen Normen sehr stark variieren.

Wie in Abschnitt 1.4.1.1 und Abschnitt 1.4.1.2 dargestellt, ist zu sehen, dass die Schubfestigkeitswerte in der ON EN 338 in den letzten Jahren teilweise stark angehoben wurden. Die Abhängigkeit zur Biegefestigkeit (siehe Verhältnis Glg. 1.3 zu Glg. 1.4) wurde in der derzeit gültigen Norm deutlich abgemindert.

## 1.5 Referenzierbare Forschungsarbeiten zum Thema Größeneinfluss und der Abhängigkeit Schubfestigkeit vs. Biegefestigkeit

Wie bereits in Abschnitt 1.3.4 betreffend den Größeneinfluss beschrieben, besitzen die Abmessungen und Spannungsverteilungen einen wesentlichen Einfluss auf die Festigkeiten eines Bauteils. Den abgeminderten Festigkeiten an größeren Bauteilabmessungen wird in den europäischen Normen teilweise mittels Größenfaktoren (z.B.  $k_h$ ,  $k_{size}$ , etc.) entsprochen. Derzeit besteht jedoch lediglich die Möglichkeit, die Biegefestigkeit und die Zugfestigkeit zu korrigieren. Für die Schubfestigkeit von Vollholz sieht die europäische Normung derzeit keine Abhängigkeit von der Bauteilgröße vor.

Die nachfolgenden Forschungsarbeiten zeigen jedoch, dass eine eindeutige Abhängigkeit zwischen den Abmessungen eines Bauteils und dessen Schubfestigkeit besteht.

Zusätzlich sieht, wie in Abschnitt 1.4.7 beschrieben, die ON EN 338 [8] eine Abhängigkeit der Schubfestigkeit von der Biegefestigkeit vor. Diese Abhängigkeit ist jedoch kritisch zu hinterfragen.

### 1.5.1 Sprödbrechtheorie nach Weibull [20] und Seil-Ketten-Modell nach Mistler [17]

Die Sprödbrechtheorie nach Weibull [20] („weakest link theory“) ermöglicht eine Handhabung der Schubfestigkeit in Abhängigkeit der Bauteilgröße und ihrer Spannungsverteilung zu beschreiben.

Ein spröde versagender Werkstoff zeichnet sich, im Gegensatz zu einem plastizierenden (wie z.B. Stahl), dadurch aus, dass er nicht imstande ist, frei werdende Spannungen nach einem Teilversagen umzulagern. Aus diesem Grund geht jeder Bruch von einer Strukturstörung (Fehlstelle) aus und führt unmittelbar zum Versagen des Bauteils. Diese Überlegung stimmt auch mit der „weakest link theory“ nach Weibull überein, die besagt, dass eine Kette unter Zugspannung nur so stark ist wie ihr schwächstes Glied.

Mistler [17] stellte fest, dass die Randbedingungen nach Weibull beim Werkstoff Holz nicht voll erfüllt sind. Daher entwickelte er dessen Modell unter Betrachtung einer zweiachsigen Beanspruchung aus Querzug und Schub weiter. Mistler kombinierte das serielle System Weibull's (Versagen des gesamten Systems bei einem Versagen des schwächsten Teilstückes) mittels nebeneinanderliegender (paralleler) Glieder zum seriell-parallelen Systemverhalten, dem sogenannten Seil-Ketten-Modell nach Mistler [17], weiter. Dieses Modell stellt die Abhängigkeit der Festigkeit bei zunehmendem beanspruchtem Volumen an Holzwerkstoffen wirklichkeitsnäher dar.

## 1.5.2 Größeneinfluss nach Longworth [30] und Gehri [26]

Longworth [30] beschreibt in seinen Untersuchungen zum Thema „Longitudinal Shear Strength of Timber Beams“ den Zusammenhang zwischen der schubbeanspruchten Fläche  $A_s$  und der maximalen Schubspannung  $\tau_{\max}$  (lt. Glg. 1.9).

Die Testergebnisse ergaben, dass die Schubfestigkeit in Faserrichtung an Trägern niedriger liegt, als jene an „shear block“- Versuchen ermittelte. Zusätzlich fand Longworth eine Abhängigkeit zwischen Trägergröße und Schubfestigkeit.

Gehri [26], der Longworth´s Aussagen mittels eigener Untersuchungen bestätigte und dessen Daten auf metrische Werte umformte, stellte den in Glg. 1.10 dargestellten Zusammenhang zwischen der schubbeanspruchten Fläche  $A_{\text{shear}}$  (siehe Abb. 1.7) und der Schubfestigkeit  $f_v$  fest.

$$\tau_{\max} = 2351 - 744 \cdot \log A_s \quad \text{nach Longworth [30]} \quad 1.9$$

$\tau_{\max}$  max. Schubspannung [psi]  
 $A_s$  schubbeanspruchte Fläche [in<sup>2</sup>]

$$f_v = 100 \cdot A_{\text{shear}}^{-0,28} \quad \text{nach Gehri [26]} \quad 1.10$$

$f_v$  Schubfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]  
 $A_{\text{shear}}$  Scherfläche [mm<sup>2</sup>]

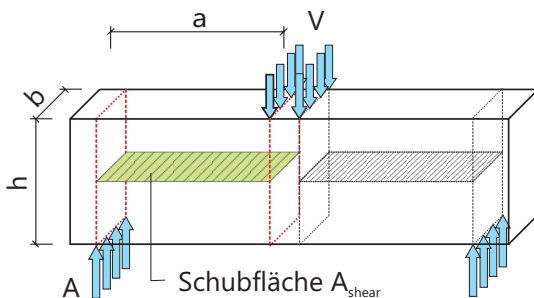


Abb. 1.7 Definition der schubbeanspruchten Fläche  $A_{\text{shear}}$  lt. Gehri [26]

## 1.5.3 Größeneinfluss nach Asselin [21]

Basierend auf den Untersuchungen von Rammer und Soltis [33], welche die Schubfestigkeit an Brettschichtholzträgern mithilfe einer 5-Punkt-Biegeprüfkonfiguration untersuchten, wird seitens Asselin [21] der Größeneffekt an Vollholz (185 Versuche an „spruce-pine-fir“ und 175 Versuche an „southern pine“) unter Verwendung derselben Prüfkonfigurationen wie in [33] betrachtet.

Asselin untersuchte die Schubfestigkeit in Abhängigkeit der Trägerhöhe, der schubbeanspruchten Fläche und des schubbeanspruchten Volumen.

Aufgrund des deutlich höheren Anteils an Schubversagen bei „southern pine“, sind in den nachfolgenden Glg. 1.11, Glg. 1.12 und Glg. 1.13 die Ergebnisse aus dieser Versuchsserie dargestellt.

$$\tau_{\text{mean}} = 3810 \cdot d^{-0,45} \quad , r^2=0,64 \quad 1.11$$

$$\tau_{\text{mean}} = 3400 \cdot A_s^{-0,18} \quad , r^2=0,77 \quad 1.12$$

$$\tau_{\text{mean}} = 3610 \cdot V_s^{-0,13} \quad , r^2=0,72 \quad 1.13$$

|                      |   |
|----------------------|---|
| $\tau_{\text{mean}}$ | mittlere Schubspannung [psi]                  |
| $d$                  | Höhe [in]                                     |
| $A_s$                | schubbeanspruchte Fläche [in <sup>2</sup> ]   |
| $V_s$                | schubbeanspruchtes Volumen [in <sup>3</sup> ] |
| $r^2$                | Korrelationskoeffizient [-]                   |

Asselin [21] kam ebenfalls zu dem Schluss, dass die Schubfestigkeit von der Trägergröße abhängig ist und mit zunehmender Größe abnimmt. Entsprechend seiner Untersuchungen scheint die schubbeanspruchte Fläche  $A_s$  (Glg. 1.12) den Größeneffekt auf Schub am Besten zu beschreiben.

#### 1.5.4 Vertiefende Betrachtung zum Einfluss der Größeneffekte nach Lackner [15]

Nach Lackner [15], welcher den Größeneinfluss auf die Schubfestigkeit von Voll- und Brettschichtholz mittels einer vertiefenden Literaturrecherche untersuchte, ergaben sich die in den nachfolgenden Abbildungen dargestellten Beziehungen. In den Abbildungen sind die Mittelwerte (durchgezogene Linie) sowie in Abb. 1.8 und Abb. 1.9 die 5%- und 95%-Quantilwerte für Vollholz (VH) und Brettschichtholz (BSH) dargestellt.

Die mit rot eingetragenen Prüfgeometrien beziehen sich auf die in den Vorversuchen nach Lackner [15] und in leicht abgeänderter Form in dieser Arbeit (siehe Abschnitt 2.4 Serie T-2 und T-4) geprüften Trägerabmessungen sowie den Geometrien der 4-Punkt-Biegeprüfung lt. ON EN 408 [5] (siehe auch Abb. 2.16 und Abschnitt 2.4.9).

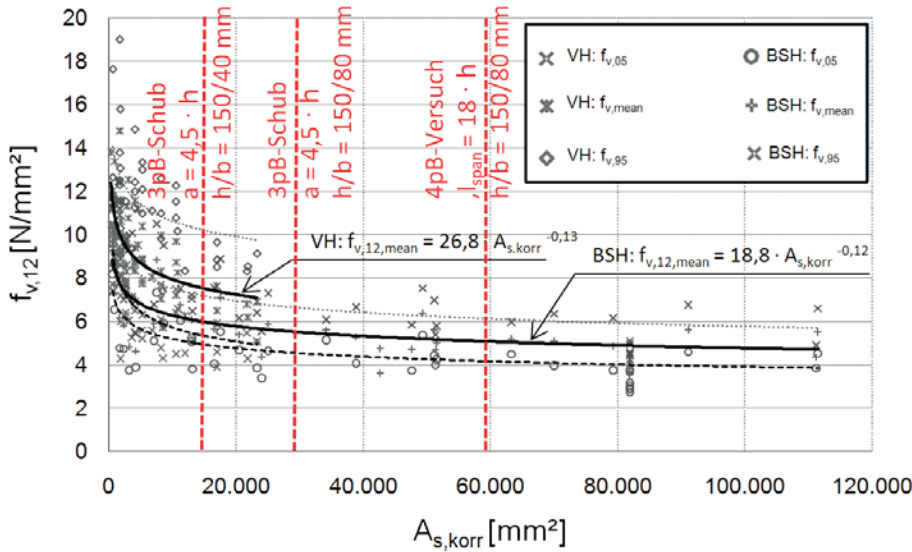


Abb. 1.8 Beziehung Schubfestigkeit  $f_{v,12}$  (12% HF) vs.  $A_{s,korr}$  (korrigierte Schubfläche) lt. [15]

In der Abb. 1.8 ist die Schubfestigkeit  $f_{v,12}$  (auf 12% Holzfeuchte korrigiert) im Verhältnis zur korrigierten Schubfläche  $A_{s,korr}$  (wie in Abschnitt 1.3.8 beschrieben) dargestellt.

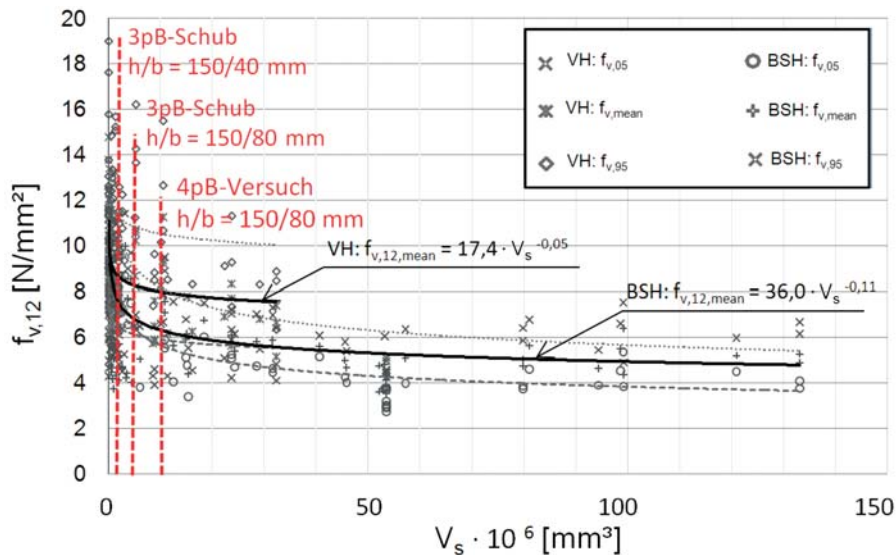


Abb. 1.9 Beziehung Schubfestigkeit  $f_{v,12}$  (12% HF) vs.  $V_s$  (schubbeanspruchtes Volumen) lt. [15]

Die Abb. 1.9 stellt die Schubfestigkeit  $f_{v,12}$  (auf 12% Holzfeuchte korrigiert) im Verhältnis zum schubbeanspruchten Volumen  $V_s$  dar. Für das Volumen  $V_s$  wurde die Schubfläche  $A_s$  mit der Trägerhöhe  $h$  multipliziert.

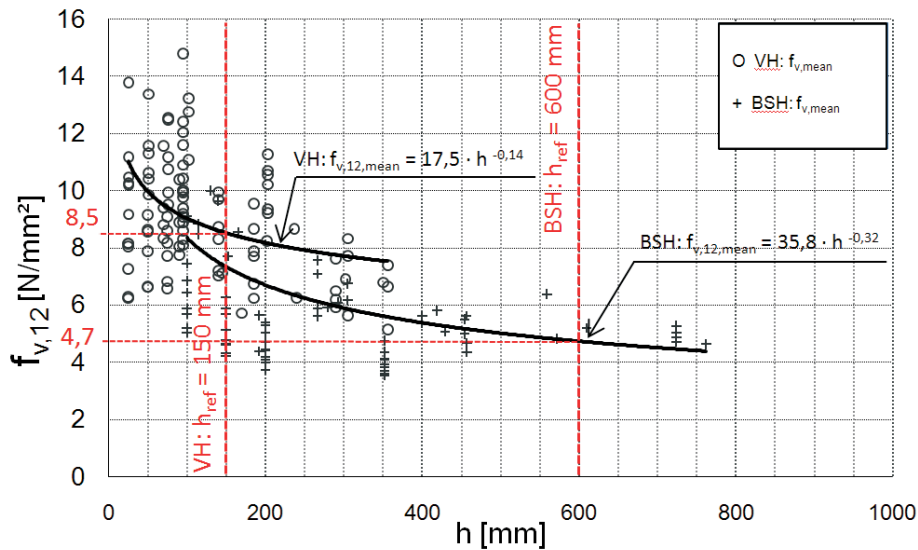


Abb. 1.10 Beziehung Schubfestigkeit  $f_{v,12}$  (12% HF) vs.  $h$  (Prüfrägerhöhe) lt. [15]

Aus der Abb. 1.10 ist das Verhältnis aus Schubfestigkeit  $f_{v,12}$  (auf 12% Holzfeuchte korrigiert) zur Trägerhöhe ersichtlich.

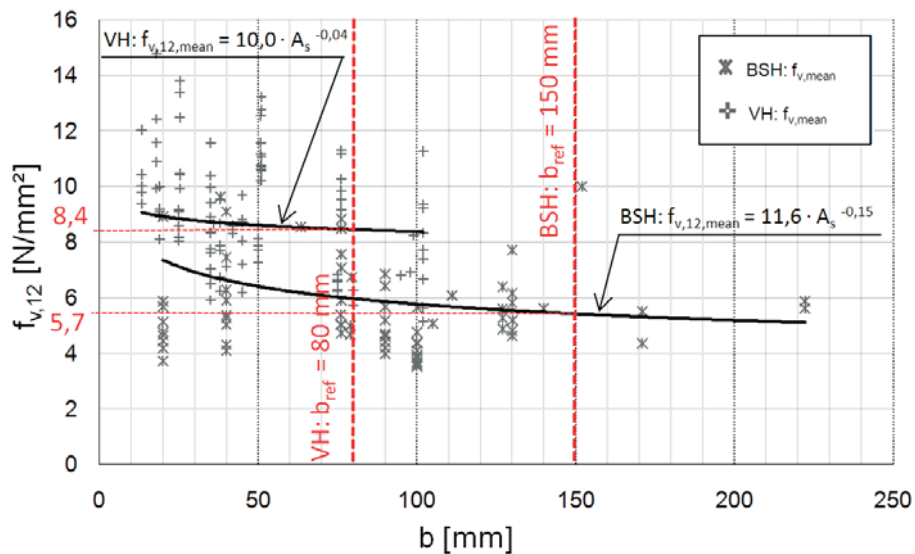


Abb. 1.11 Beziehung Schubfestigkeit  $f_{v,12}$  (12% HF) vs.  $b$  (Prüfrägerbreite) lt. [15]

In der Abb. 1.11 ist die Schubfestigkeit  $f_{v,12}$  (auf 12% Holzfeuchte korrigiert) im Verhältnis zur Prüfrägerbreite dargestellt.

Aus den dargestellten Abb. 1.8, Abb. 1.9 und Abb. 1.10 ist deutlich erkennbar, dass die Schubfestigkeit  $f_v$  in Abhängigkeit zu den Prüfkörpergeometrien steht und diese mit größer werdenden Abmessungen abnimmt. Lediglich die Variation der Breite, wie in Abb. 1.11 dargestellt, scheint einen untergeordneten Einfluss zu besitzen. Zusätzlich ist zu erkennen, dass die Schubfestigkeit der Vollholzträger höher als jene der Brettschichtholzträger zu liegen scheint.

Entsprechend den Untersuchungen nach Lackner [15] gilt die Beziehung der schubbeanspruchten Fläche  $A_S$  (Abb. 1.8) zur Schubfestigkeit als besonders geeignet, um den Größeneffekt abzubilden.

### 1.5.5 Biegefestigkeitsabhängigkeit nach Schickhofer [35]

Nach Schickhofer [35] konnte eine erhöhte Schubfestigkeit an Brettschichtholz zufolge zunehmender Biegefestigkeit bzw. Zugfestigkeit der BSH-Lamellen, entsprechend den europäischen Normen, nicht bestätigt werden. Im Gegensatz dazu wurde ein leichter Anstieg der Schubfestigkeit bei geringeren Biegefestigkeiten bzw. Zugfestigkeiten festgestellt. Dies wurde hauptsächlich auf die folgenden Ursachen zurückgeführt:

- ein Verdübelungseffekt durch das vermehrte Auftreten von Ästen in der Brettware (Verwendung von Holz aus kernnahen Zonen für „niedrige“ Festigkeitsklassen),
- ein vermehrtes Auftreten von widerstandsfähigen Spätholz zonen bei tangential auf Schub beanspruchter Brettware und
- eine vergrößerte Oberfläche der Jahrringe und dadurch eine vergrößerte Schubfläche zwischen Früh- und Spätholz innerhalb eines Jahrringes.

Entgegen der in der ON EN 1194 [10] geltenden Regelung einer mit der BSH-Festigkeitsklasse ansteigenden charakteristischen Schubfestigkeit schlägt Schickhofer daher eine konstante Schubfestigkeit von  $f_{v,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$  für alle Festigkeitsklassen vor.

Aufgrund der hier angeführten Untersuchungen an BSH sind die in Abschnitt 1.4.1.2 beschriebenen Abhängigkeiten (lt. ON EN 338 [8]) für Vollholz ebenfalls kritisch zu hinterfragen.

### 1.5.6 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse bezüglich des Größeneffektes auf die Schubfestigkeit von Voll- und Brettschichtholz

Entsprechend den in diesem Abschnitt 1.5 angeführten Literaturdaten, welche nur einen Überblick über die referenzierbaren Forschungsberichte bieten, kann eine Abhängigkeit der Schubfestigkeit von den Prüfkörperabmessungen als allgemein nachgewiesen angesehen werden. Dabei zeigt sich in den Arbeiten eine deutliche Abnahme der Schubfestigkeit mit größer werdendem schubbeanspruchten Holzvolumen.

Besonders die Beziehung zwischen der schubbeanspruchten Fläche  $A_S$  und der Schubfestigkeit scheint geeignet zu sein, um den Größeneffekt zu beschreiben.

Die hier dargestellten Erkenntnisse werden insbesondere im Kapitel 4 (Diskussion) den in dieser Arbeit getätigten Prüfungen und deren Ergebnissen gegenübergestellt.



## 2 Material und Methoden



In diesem Kapitel wird auf das verwendete Ausgangsmaterial wie auch auf die notwendigen Hilfs- und Bearbeitungsmaterialien eingegangen.

Zusätzlich werden die einzelnen Schritte der Prüfvorbereitung sowie der Prüfdurchführung genau beschrieben.

## 2.1 Material und Prüfkongfiguration

### 2.1.1 Allgemeine Erläuterungen zu den Prüfkongfigurationen

Bauteilbeanspruchungen aus Schub treten meist in Biegeträgern auf. Aus diesem Grund wurden die Schubkennwerte in dieser Arbeit auch anhand von Biegeträgern und nicht mithilfe der üblichen Prüfungen nach ON EN 408 [5] (Abb. 1.6) ermittelt. Des Weiteren war eine Prüfkongfiguration mithilfe von Biegeträgern (in Hinblick auf eine eventuelle Standardisierung der Prüfung) anzustreben, da die Durchführung dieser in den meisten Versuchslaboren möglich ist.

Die verwendete Prüfkörpergeometrie (I-Querschnitt aus einheitlichem Material) beruht auf den Literaturrecherchen, den Vorversuchen sowie den daraus resultierenden Schlussfolgerungen von Lackner [15]. Um ein Biegeversagen der Prüfkörper zu vermeiden, wurden in diesen Vorversuchen die Ober- und Unterseiten des Prüfkörpers verstärkt. Dies geschah mit Kerto-S Holzwerkstoffplatten. Zu Beginn wurden die Verstärkungen mit derselben Breite wie der des Prüfquerschnitts (siehe Abb. 2.1 links) und anschließend mit breiteren Ober- und Untergurten (siehe Abb. 2.1 mittig) ausgeführt. Diese beiden Kongfigurationen führten jedoch nicht zum gewünschten Versagen, nämlich einem Versagen auf Schub im Prüfquerschnitt (Steg), nahe der „neutralen“ Achse.

Infolgedessen kam eine Prüfkongfiguration zum Einsatz, bei der der gesamte I-QS aus demselben Material besteht (siehe Abb. 2.1 rechts). Jedoch wurden die Ober- und Untergurte mittels „proof loading“, wie in Abschnitt 2.1.3 und Abb. 2.3 beschrieben, vorbelastet, wodurch sie eine bestimmte minimale Zugfestigkeit aufweisen und dadurch während der Prüfdurchführung ein Versagen auf Biegezug minimiert wird.



Abb. 2.1 Darstellung des Prüfquerschnitts bei den Vorversuchen nach Lackner [15] (links: Rechteck QS mit Kerto-S, mitte: I-QS mit Kerto-S) sowie der Träger der hier ausgeführten Prüfserie T-2 (rechts: I-QS aus Fichte S10+)

## 2.1.2 Ausgangsmaterial

Die gewählte Holzart für die Prüfserien war Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.), welche aus dem Gebiet der Steiermark (Österreich, Mitteleuropa) stammt und von der Firma „Sägewerk Hans Bichler“ eingeschnitten, getrocknet, gehobelt und geliefert wurde.

Das Ausgangsmaterial (siehe Abb. 2.2) der Schnittware wurde gemäß der Sortierklasse S10+, in Anlehnung an die ON DIN 4074-1 [7], klassiert. Um möglichst geringe Streuungen in den Holzeigenschaften der einzelnen Prüfkörper zu erhalten, war gefordert, dass der Einschnitt in einem Abstand von rund 60 mm zum Mark zu erfolgen hat. Zur Vermeidung von Schwindrissen war zusätzlich eine schonende Holz Trocknung auf rund 12% Holzfeuchtigkeit gefordert.



Abb. 2.2 Angeliefertes Ausgangsmaterial (Fichte, visuell sortiert, S10+, in Anlehnung an ON DIN 4074-1 [7])

## 2.1.3 Voruntersuchungen

Zur genaueren Unterteilung des gelieferten Holzes wurden, wie in Lackner [15] genau beschrieben, die unten angeführten Eigenschaften von jedem Holzbalken am Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz ermittelt.

Diese waren:

- die Bestimmung des Holzfeuchtegehaltes mittels des Feuchtemessgeräts GANN Hydromette M2050 (siehe Abb. 2.24),
- die Bestimmung der Rohdichte aus den ermittelten Massen (mithilfe der Waage Sartorius EA60 EDE-1 siehe Abb. 2.25 links) und den Abmessungen (mittels Schiebelehre und Rollmeter siehe Abb. 2.26) sowie
- die Ermittlung des dynamischen E-Moduls mithilfe des Eigenfrequenzverfahrens, wie in [15] genau beschrieben wird.

Über den ermittelten dynamischen E-Modul, welcher im Zuge der Auswertung der Voruntersuchung [15] bereits auf 12% Holzfeuchte korrigiert wurde, erfolgte mithilfe der Glg. 2.1 eine Abschätzung des statischen E-Modul  $E_{t,0,12,est}$ . Die Formel (Glg. 2.1) sowie deren Konstanten wurden auf Basis von umfangreichen Erfahrungen am Labor des Holzbauinstitutes der TU Graz sowie auf Basis der Untersuchungen von Eiser und Unterwieser [24] ermittelt.

$$E_{t,0,12,est} = \frac{E_{dyn,0,12}}{1,04} \quad \dots \text{Korrektur um 4\%} \quad 2.1$$

Für die Prüfserien T-1, T-2, T-4, T-6 und T-7 wurde keine weitere Klassierung vorgenommen. Gemäß EN 1912 kann somit auf Basis der Sortierklasse S10+ (in Anlehnung an die ON DIN 4074-1 [7]) eine Festigkeitsklasse von C24+ (in Anlehnung an die ON EN 338 [8]) angenommen werden.

Die Probekörper der Serie T-3 und T-5 wurden durch eine Klassierung der Grundmasse nach dessen abgeschätzten statischem E-Modul  $E_{t,0,12,est}$  ausgewählt. Entsprechend der Klassierung nach den E-Modulen weisen die Serien T-3 bzw. T-5 einen mittleren E-Modul  $E_{0,mean}$  entsprechend den Festigkeitsklassen C16 bzw. C40 nach ON EN 338 [8] (siehe Tab. 2.1) auf.

Zusammenfassend weisen die Prüfserien folgende in Tab. 2.1 dargestellten mittlere E-Module  $E_{t,0,12,est,MW}$  und dazugehörige 50%-Quantil Werte für die Dichte  $\rho_{12,50}$  (alle Werte wurden lt. Abschnitt 2.5.2 auf 12% Holzfeuchte korrigiert) auf:

| Serie | $E_{t,0,12,est,MW}$  | $\rho_{12,50}$       | Festigkeitsklasse* |
|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| [--]  | [N/mm <sup>2</sup> ] | [kg/m <sup>3</sup> ] | [--]               |
| T-1   | 11307                | 446                  | C24+               |
| T-2   | 12191                | 449                  |                    |
| T-4   | 11420                | 418                  |                    |
| T-6   | 11708                | 421                  |                    |
| T-7   | 10747                | 429                  |                    |
| T-3   | 8505                 | 391                  | C16**              |
| T-5   | 14247                | 466                  | C40**              |

Tab. 2.1 Abgeschätzte statische mittlere E-Module und dazugehörige 50%-Quantile der Rohdichte der einzelnen Prüfserien sowie die (partielle) Zuordnung zu den Festigkeitsklassen nach ON EN 338 [8]

\* in Anlehnung an die ON EN 338 [8]

\*\* Äquivalenz alleinig in Bezug auf den mittleren E-Modul  $E_{0,mean}$ ; jedoch keine eindeutige Klassenzuordnung gegeben.

Um das Versagen der Untergurte in der Biegezugzone und somit ein Versagen der Träger auf Biegung zu minimieren, wurden alle Gurte einer Vorbelastung, einem

sogenannten „proof loading“, unterzogen. Dazu werden die Hölzer in die Zugmaschine lignum\_z\_850, wie in Abb. 2.3 rechts dargestellt, eingespannt und auf das gewünschte Niveau der Zugtragfähigkeit geprüft.

Für die Herstellung der Prüfträger wurden jene Hölzer verwendet, die im „verwertbaren Bereich“, wie in Abb. 2.3 links dargestellt, lagen. Die übrigen Hölzer wurden aussortiert.

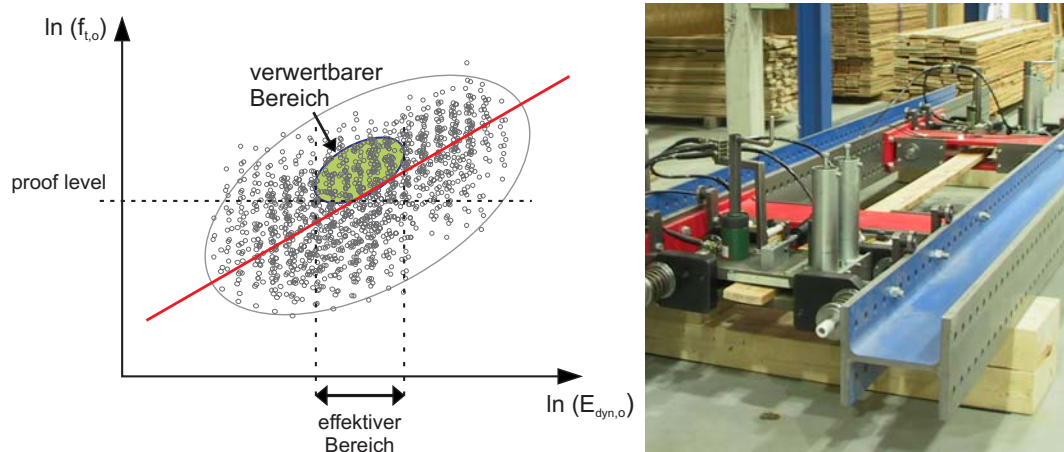


Abb. 2.3 Links: schematische Darstellung der Beziehung Zugfestigkeit vs. E-Modul von den Gurtlamellen und Darstellung des verwertbaren Bereiches für die Fertigung der I-Träger nach Lackner [15]; rechts: verwendete Zugprüfmaschine lignum\_z\_850 des Instituts für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz

#### 2.1.4 Abweichungen der Prüfkongfiguration gegenüber den Vorversuchen nach Lackner [15] und gegenüber der Vordimensionierung lt. Abschnitt 2.2.1

Ausgehend von der Prüfkongfiguration nach Lackner [15] (siehe Abb. 2.4) wurden einige Adaptierungen (siehe Abb. 2.5) durchgeführt. Diese betrafen im Speziellen die nachfolgend angeführten Punkte:

- **Krafteinleitung**

Wie bereits in der Arbeit von Lackner [15] angedacht, wurde anstatt der „pseudo“ 4-Punkt-Biegeprüfung eine 3-Punkt-Biegeprüfung ausgeführt. Hinsichtlich der Krafteinleitung änderte sich lediglich, dass die Krafteinleitungsplatte nicht zweigeteilt mit einer Breite von  $2 \times h/2$  sondern, dass diese aus einem Teil mit einer Breite von  $h$  ausgeführt wurde, wobei  $h$  der gesamten Höhe des I-QS entspricht.

- **Abänderung der Variable  $a$**

Von dem für alle Prüfserien gleich bleibenden Wert  $a = 4,5 \cdot h_{Pr-QS}$  (siehe Abb. 2.4) wurde abgewichen, da dies aufgrund der vertiefenden Literaturrecherche von [15] und den daraus resultierenden höheren erwartbaren

Schubfestigkeiten (entsprechend dem Rechenablauf in Abschnitt 2.2.1), vor allem bei den Prüferien mit geringeren Steifigkeitsklassen (Serie T-3), zu einem vermehrten Auftreten von Biegezugbrüchen geführt hätte. Da eine erneute Aussortierung der Gurte mittels „proof loading“, wie in Abb. 2.3 dargestellt, nicht möglich war, erfolgte eine Variation der Variable  $a$ , welche nun zwischen  $a = 3,0 \cdot h_{Pr-QS}$  (Serie T-3),  $a = 4,0 \cdot h_{Pr-QS}$  (Serie T-2 und T-4) und  $a = 4,5 \cdot h_{Pr-QS}$  (Serie T-1, T-5, T-6 und T-7), wie in Abb. 2.5 dargestellt, liegt.

- Anpassung der Scherfläche**

Die effektive Länge  $l_{ef}$  und die daraus resultierende Scherfläche, wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, musste ebenfalls angepasst werden. Der Ansatz von Lackner [15], wie in Abb. 2.4 dargestellt, dass die Scherfläche, als der Bereich zwischen den ersten Schraubenreihen der Krafteinleitungs- und der Auflagerverstärkung definiert ist, blieb erhalten, jedoch konnten die Vollgewindeschrauben aus fertigungstechnischen Gründen nicht bündig mit den Krafteinleitungsplatten bzw. Auflagerplatten eingedreht werden. Infolgedessen musste  $l_{ef}$  an die tatsächlich Position der ausgeführten Vollgewindeschrauben (wie in Abb. 2.5 dargestellt) angepasst werden.

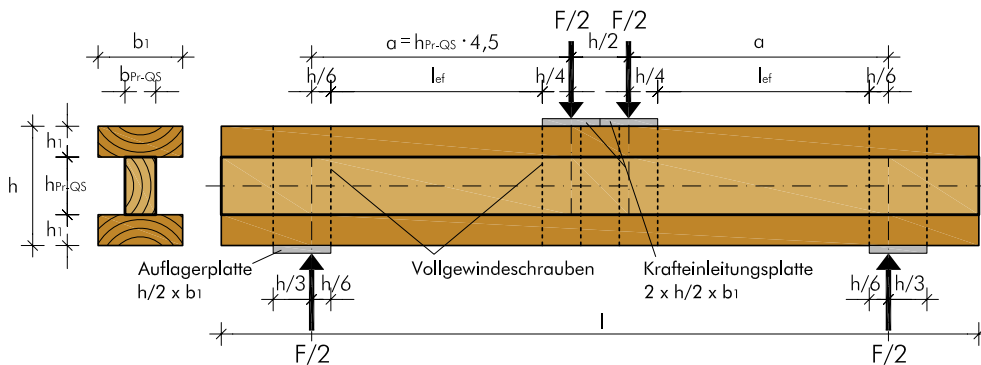


Abb. 2.4 Vorgeschlagene Prüfkongfiguration nach Lackner [15]

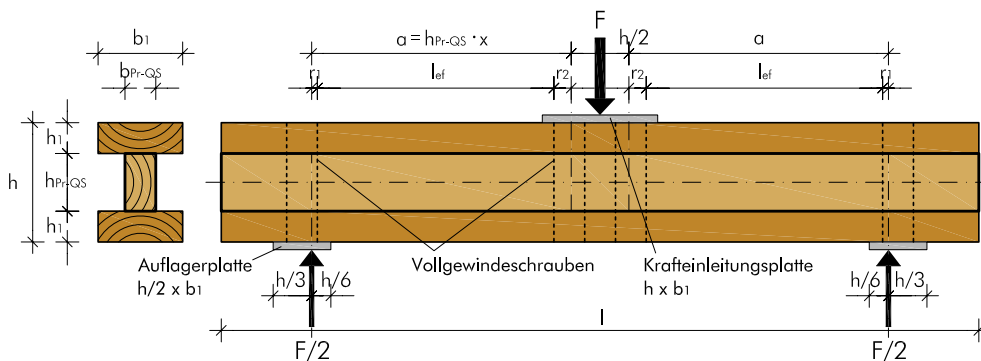


Abb. 2.5 Ausgeführte Prüfkongfiguration der Serie T-1



## 2.1.5 Übersicht über den Prüfumfang

Für die statischen Prüfungen wurden insgesamt acht Serien (sieben Serien mit I-Querschnitt für Schubprüfungen und eine Serie mit Rechteckquerschnitt für die Referenz Biegeprüfungen) mit unterschiedlichen Dimensionen bzw. mit unterschiedlichen Steifigkeitsklassen (wie in Abb. 2.6 dargestellt) hergestellt und geprüft.

Folgende in Tab. 2.2 dargestellten Prüfserien wurden aus den vorsortierten Steg- und Gurtlamellen (siehe Lackner [15]) gefertigt:

| Schub-<br>prüfungen | Serie        | Material     | Anzahl | Höhe<br>gesamt | Steg    | Gurte   | Länge |
|---------------------|--------------|--------------|--------|----------------|---------|---------|-------|
|                     | [--]         | [--]         | [Stk]  | [mm]           | [mm/mm] | [mm/mm] | [mm]  |
|                     | T-1          | Fichte C24+* | 40     | 155            | 40/75   | 110/40  | 985   |
|                     | T-2          | Fichte C24+* | 34     | 305            | 40/145  | 110/80  | 1970  |
|                     | T-3          | Fichte C16** | 11     | 310            | 80/150  | 220/80  | 1970  |
|                     | T-4          | Fichte C24+* | 40     | 310            | 80/150  | 220/80  | 1970  |
|                     | T-5          | Fichte C40** | 40     | 310            | 80/150  | 220/80  | 1970  |
|                     | T-6          | Fichte C24+* | 20     | 620            | 80/300  | 220/160 | 3940  |
| T-7                 | Fichte C24+* | 36           | 240    | 80/80          | 220/80  | 1200    |       |

Tab. 2.2 Übersicht Prüfumfang Schubprüfungen  
\* in Anlehnung an die ON EN 338 [8]  
\*\* Äquivalenz alleinig in Bezug auf den mittleren E-Modul  $E_{0,mean}$ ; jedoch keine eindeutige Klassenzuordnung gegeben.

| Biege-<br>prüfungen | Serie | Material     | Anzahl | Höhe | Breite | Länge |
|---------------------|-------|--------------|--------|------|--------|-------|
|                     | [--]  | [--]         | [Stk]  | [mm] | [mm]   | [mm]  |
|                     | T-8   | Fichte C24+* | 50     | 80   | 150    | 2850  |

Tab. 2.3 Übersicht Prüfumfang Biegeprüfungen  
\* in Anlehnung an die ON EN 338 [8]

Für die Schubprüfungen (Serie T-1 bis T-7) sind die I-Träger hinsichtlich zweier Parameter untersucht worden:

- **Schubkennwerte in Abhängigkeit der Größe des Prüfquerschnittes (Steg) (siehe Abb. 2.6 oben):**

Hier wurde, beginnend mit Serie T-1 (40/75) über Serie T-2 (40/145), Serie T-4 (80/150) bis Serie T-6 (80/300) sowie der Serie T-7 (80/80 mit liegenden Jahrringen), der Prüfquerschnitt geändert. Dies geschah zum Einen in der Höhe und zum Anderen auch in der Breite. Beides verändert die direkt zugeordnete Schubfläche und das schubbeanspruchte Volumen.

- Schubkennwerte in Abhängigkeit der Steifigkeitsklasse (siehe Abb. 2.6 unten):  
 Hierfür sind die Serien T-3 („C16“), die Serie T-4 („C24+“) sowie die Serie T-5 („C40“) geprüft worden.

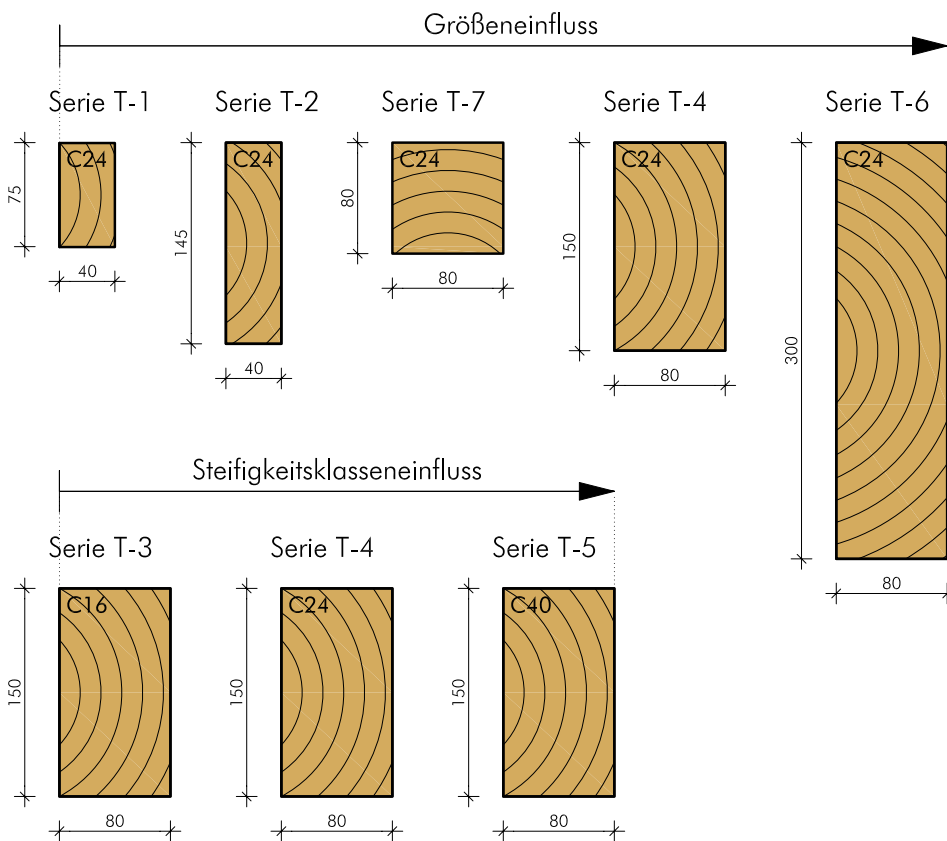


Abb. 2.6 Prüfserien und ihre zu untersuchenden Haupteinflussfaktoren – Größe (oben) und Steifigkeit (unten), unter Angabe der Querschnittsabmessungen und den (partiell) zugeordneten Festigkeitsklassen

Die Biegeprüfungen dienten zur Ermittlung des globalen und lokalen E-Moduls sowie der zugehörigen Biegefestigkeit des verwendeten Holzes (S10+). Die Prüfungen erfolgten mittels der 4-Punkt-Biegeprüfung lt. ON EN 408 [5].

Mithilfe der ermittelten Biegefestigkeiten kann eine Funktion der Schubfestigkeit in Abhängigkeit der Biegefestigkeit ( $f_{v,05}$  vs.  $f_{m,05}$ ) abgeleitet werden. Die ermittelten E-Module dienen zur Überprüfung der in der Prüfvorbereitung ermittelten dynamischen E-Module (siehe Lackner [15]) bzw. zur Verifizierung der Glg. 2.1, welche den  $E_{dyn,12}$  auf den  $E_{t,0,12,est}$  abschätzt.



## 2.2 Vordimensionierung der Prüfserien

Zur Abschätzung der zu erwartenden Schubspannungen war es erforderlich, eine Vorbemessung der einzelnen Prüfserien durchzuführen.

Für die Schubprüfungen wird der Rechenablauf exemplarisch anhand der Serie T-1 im Abschnitt 2.2.1 beschrieben.

Im darauf folgenden Abschnitt 2.2.2 sind die Ergebnisse aller Schubprüfserien tabellarisch zusammengefasst.

Der Abschnitt 2.2.3 erläutert die Herangehensweise bzw. Vorbemessung für die 4-Punkt-Biegeprüfung nach ON EN 408 [5].

### 2.2.1 Rechenablauf für die Vordimensionierung anhand der Serie T-1

Mit den in Tab. 2.4 angegebenen Parametern und den in Abb. 2.7 dargestellten Prüfgeometrien der Serie T-1 wird der Rechenablauf für die Vordimensionierung beschrieben.

Im Wesentlichen basieren die verwendeten Formeln und Annahmen auf Lackner [15] (Kapitel 8). Davon abweichende Bereiche sind gesondert vermerkt.

|  | <b>Steg</b><br>(Prüfkörper) | <b>Gurte</b><br>(Verstärkungslamellen) |
|--|-----------------------------|--|
| Material & Festigkeitsklasse                     | Fichte C24*                 | Fichte C24*                            |
| Höhe $h_{Pr-QS}$ und $h_1$ [mm]                  | 75                          | 40                                     |
| Breite $b_{Pr-QS}$ und $b_1$ [mm]                | 40                          | 110                                    |
| Gesamthöhe $h$ [mm]                              | 155                         |  |
| Länge $l$ [mm]                                   | 986                         |  |
| Länge Schubfläche $l_{ef}$ [mm]                  | 272,9                       |  |
| Länge Variable $a$ [mm]                          | $4,5 \cdot h_1 = 337,5$     |  |
| E-Modul $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *      | 11000                       | 11000                                  |
| Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] * | 14                          | 14                                     |
| Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] * | 24                          | 24                                     |
| Schubfestigkeit $f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] * | 4,0                         | 4,0                                    |

Tab. 2.4 Geometrische und mechanische Parameter der Serie T-1  
\* Werte für C24 lt. ON EN 338 [8]

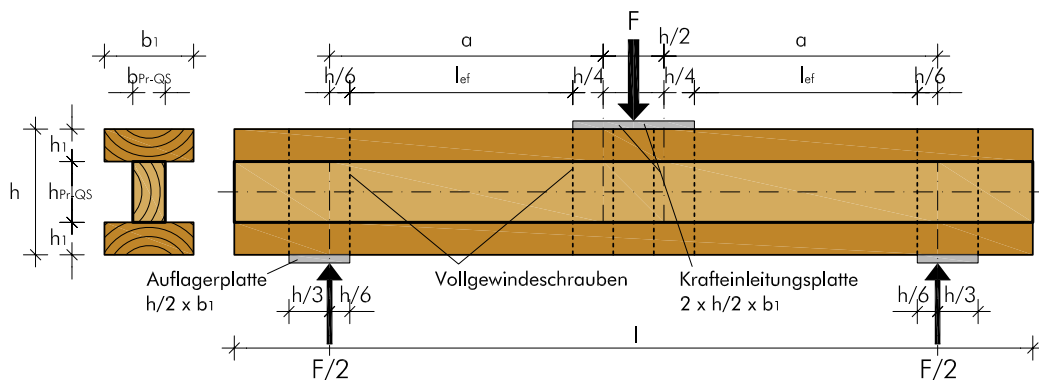


Abb. 2.7 Prüfkörpergeometrie der Serie T-1 entsprechend der Prüfkfiguration nach Lackner [15]

### Rechenablauf zur Bestimmung der zu erwartenden Schubfestigkeit und maximalen Querkraft:

Schubbeanspruchte Fläche (lt. Abschnitt 1.3.8):

Die schubbeanspruchte Fläche wird, wie bereits von Gehri [26] beschrieben, mittels der Querschnittsbreite  $b_{Pr-QS}$  sowie der effektiven Länge der Schubfläche  $l_{ef}$  bestimmt. Dabei wird angenommen, dass die gesamte Kraft über die Vollgewindeschrauben eingeleitet wird. Infolgedessen ist  $l_{ef}$  als der Bereich zwischen den ersten Schraubenreihen der Krafteinleitungs- und der Auflagerverstärkung (wie in Abb. 2.7 dargestellt) definiert. Aufgrund des seriellen Systemverhaltens wird nur eine Seite herangezogen, da der Bruch in jenem Schubfeld mit der geringeren Schubtragfähigkeit bzw. der max. Schubbeanspruchung (weakest link) initiiert wird. Die ermittelte Schubfestigkeit gilt somit für ein serielles System von  $N = 2$  und stellt eine Unterschätzung der Materialschubfestigkeit ( $N = 1$ ) dar.

$$A_S = l_{ef} \cdot b_{Pr-QS} = 272,9 \cdot 40 = 10917 \text{ [mm}^2\text{]} \quad 2.2$$

Bestimmung der mittleren Schubfestigkeit  $f_{v,mean}$ :

Abweichend vom Rechenablauf bei [15] (Kapitel 8) kamen hier Formeln, die auf die vertiefte Literaturrecherche von [15] basieren, zur Verwendung. Damit war eine verbesserte Abschätzung der tatsächlich erwartbaren Schubfestigkeit möglich.

$$f_{v,mean} = 51,59 \cdot A_S^{-0,21} = 51,59 \cdot 10917^{-0,21} = 7,32 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad 2.3$$

Die Varianz der Schubfestigkeit wurde auf Basis eines geschätzten Variationskoeffizienten (COV) von 20% folgendermaßen errechnet:

$$\sigma^2 = (\text{COV} \cdot \mu)^2, \text{ mit der Annahme COV} = 20\% \text{ und } \mu = f_{v,mean} \quad 2.4$$

$$\sigma^2 = (0,2 \cdot 7,32)^2 = 2,1433 \text{ [(N/mm}^2\text{)}^2\text{]}$$

Der Erwartungswert  $\mu_y$  der auf die Normalverteilung transformierten log-normalverteilten Zufallsvariablen  $y$  ergab sich zu:

$$\mu_y = \ln \left[ \frac{f_{v, \text{mean}}^2}{\sqrt{f_{v, \text{mean}}^2 + \sigma^2}} \right] = \ln \left[ \frac{7,32^2}{\sqrt{7,32^2 + 2,1433}} \right] = 1,9711 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad 2.5$$

Die Standardabweichung  $\sigma_y$  der auf die Normalverteilung transformierten log-normalverteilten Zufallsvariablen  $y$  wurde wie folgend errechnet:

$$\sigma_y = \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma^2}{f_{v, \text{mean}}^2} + 1 \right)} = \sqrt{\ln \left( \frac{1,4642}{7,32^2} + 1 \right)} = 0,198 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad 2.6$$

Allgemein lässt sich das Quantil einer Verteilung auf Basis der inversen Verteilungsfunktion ermitteln:

$$F_x(x) = q = \int_{-\infty}^{x_q} f_x(x) dx \rightarrow x_q = F_x(q)^{-1} \quad 2.7$$

Des Weiteren können die 5%- und die 95%-Quantilwerte einer log-normalverteilten Variable ermittelt werden:

$$X_{q, \text{LND}} = \frac{\exp(\mu_y)}{\exp(-\Phi(q)^{-1} \cdot \sigma_y)} \rightarrow X_{95} = f_{v, 95} = 9,94 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad 2.8$$

$$X_{q, \text{LND}} = \frac{\exp(\mu_y)}{\exp(-\Phi(q)^{-1} \cdot \sigma_y)} \rightarrow X_{05} = f_{v, 05} = 5,18 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad 2.9$$

mit  $-\Phi(q)^{-1}$  = Quantilwert der Standardnormalverteilung (5 bzw. 95%)

Zur Ermittlung der Schub- und Biegespannungsverläufe über den Querschnitt wird, ausgehend von der Schubfestigkeit  $f_w$ , auf die Querkraft sowie das Biegemoment rückgerechnet. Hierfür kam das sogenannte n-Ziffernverfahren für starr verbundene Bauteile („Starrer Verbund“ lt. Theiler und Frangi [38]) zur Anwendung.

$$n_i = \frac{E_i}{E_{\text{ref}}} \quad 2.10$$

Die Wertigkeit  $n_i$  ist das Verhältnis vom vorhandenen E-Modul  $E_i$  zu einem beliebig wählbaren Referenz E-Modul  $E_{\text{ref}}$ .

Für die Vorbemessung wurde als Referenz E-Modul jener der Festigkeitsklasse C24 verwendet.

$$n_i = \frac{E_i}{E_{\text{ref}}} = \frac{11000}{11000} = 1,0$$

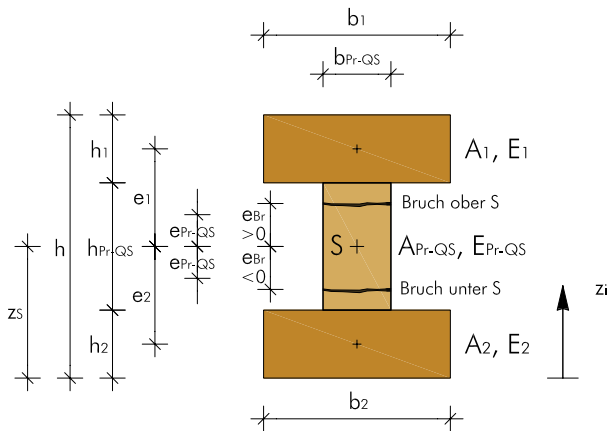


Abb. 2.8 Erläuterung der verwendeten Buchstaben für das n-Ziffernverfahren nach [38]

Der bezüglich der E-Module ( $n$ -Ziffernverfahren) und der Flächen der Einzelquerschnitte  $A_i$  gewichtete Schwerpunktsabstand  $z_s$  und gleichzeitig auch der Nullpunkt der Dehnungsebene bei reiner Biegung ergibt sich zu:

$$z_s = \frac{\sum(n_i \cdot A_i \cdot z_i)}{\sum(n_i \cdot A_i)} \quad 2.11$$

Wobei zur Ermittlungen der Kennwerte bei den geprüften I-Trägern die jeweiligen Geometrien und E-Module der Ober- und Untergurte sowie des Prüfquerschnitts (Steg) verwendet wurden.

Für die Vorbemessung wurden idealisierte Annahmen getroffen ( $E = 11000 \text{ N/mm}^2$  sowie exakte Querschnittsabmessungen).

$$z_s = \frac{h_{Pr-QS}}{2} + h_{UG} = 77,5 \text{ [mm]}$$

Weiters wurden die wirksame Querschnittsfläche  $A_{ef}$ , das effektive Trägheitsmoment  $J_{ef}$  und das effektive statische Moment  $S_{ef}$  bestimmt. Sie ergaben sich zu:

$$A_{ef} = \sum n_i \cdot A_i \quad 2.12$$

$$A_{ef} = 1,0 \cdot 110 \cdot 40 \cdot 2 + 1,0 \cdot 40 \cdot 75 = 11800 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$J_{ef} = \sum n_i \cdot J_i + \sum n_i \cdot A_i \cdot e_i^2 \quad 2.13$$

$$J_{ef} = 1,0 \cdot \frac{110 \cdot 40^3}{12} \cdot 2 + 1,0 \cdot \frac{40 \cdot 75^3}{12} + 2,0 \cdot 110 \cdot 40 \cdot 57,5^2 \approx 3,17 \cdot 10^7 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$S_{ef,e} = \sum n_i \cdot A_i \cdot e_i \quad \dots \text{ eff. statisches Moment in Abhängigkeit vom Bruch } e_{Br} \quad 2.14$$

$$S_{ef,e_{Br} < 0} = n_2 \cdot A_2 \cdot e_2 + n_{Pr-QS} \cdot A_{Pr-QS,rest} \cdot e_{Br} \quad \dots \text{ Bruch unter der Schwerachse } e_{Br} < 0$$

$$S_{\text{ef}, e_{Br} > 0} = n_1 \cdot A_1 \cdot e_1 + n_{\text{Pr-QS}} \cdot A_{\text{Pr-QS, rest}} \cdot e_{Br} \quad \dots \text{ Bruch ober der Schwerachse } e_{Br} > 0$$

Für die Vorbemessung wurde die idealisierte Annahme eines Versagens in der Schwerachse des Steges getroffen.

$$S_{\text{ef, Mitte}} = 1,0 \cdot 40 \cdot 110 \cdot 57,5 + 1,0 \cdot 40 \cdot 37,5 \cdot 18,75 \approx 2,81 \cdot 10^5 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Zur Berechnung von Normal- und Schubspannungen können die folgenden Gleichungen verwendet werden:

$$\sigma_i = \frac{M}{J_{\text{ef}}} \cdot z_s \cdot n_i \quad 2.15$$

$$\tau_i = \frac{V \cdot S_{\text{ef}, i}}{J_{\text{ef}} \cdot b_{\text{Pr-QS}}} \quad 2.16$$

Aus der Glg. 2.16 wird die erwartete maximale Querkraft ( $V$ ) bei Schubversagen ermittelt, indem die Schubspannung mit der zu erwartenden 95%-Quantile der Schubfestigkeit gleichsetzt ( $\tau \equiv f_{v,95}$ ) wird:

$$V = \frac{f_{v,95} \cdot J_{\text{ef}} \cdot b_{\text{Pr-QS}}}{S_{\text{ef, Mitte}}} = \frac{9,94 \cdot 3,17 \cdot 10^7 \cdot 40}{2,81 \cdot 10^5} = 44812 \text{ [N]} \approx 44,8 \text{ [kN]} \quad 2.17$$

$$M = V \cdot \left( a + \frac{h}{4} \right) = 44812 \cdot \left( 337,5 + \frac{155}{4} \right) = 16860500 \text{ [Nmm]} \approx 16,86 \text{ [kNm]} \quad 2.18$$

Mit den Glg. 2.15 und Glg. 2.16 kann jetzt an jeder Stelle des Querschnitts die Schub- sowie die Biegespannung bestimmt werden.

## 2.2.2 Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Vorbemessung

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse aus der Vorbemessung tabellarisch und graphisch zusammengefasst. Die Prüfgeometrie entspricht der Abb. 2.7, wobei die genauen geometrischen und mechanischen Eigenschaften den Tabellen der einzelnen Serien zu entnehmen sind.

### 2.2.2.1 Serie T-1

|  | Steg<br>(Prüfkörper)    | Gurte<br>(Verstärkungslamellen) |
|--|-------------------------|---------------------------------|
| Material & Festigkeitsklasse                         | Fichte C24*             | Fichte C24*                     |
| Höhe $h_{Pr-QS}$ und $h_1$ [mm]                      | 75                      | 40                              |
| Breite $b_{Pr-QS}$ und $b_1$ [mm]                    | 40                      | 110                             |
| Gesamthöhe $h$ [mm]                                  | 155                     |                                 |
| Länge $l$ [mm]                                       | 986                     |                                 |
| Länge Schubfläche $l_{ef}$ [mm]                      | 272,9                   |                                 |
| E-Modul $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *          | 11000                   | 11000                           |
| Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 14                      | 14                              |
| Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 24                      | 24                              |
| Schubfestigkeit $f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 4,0                     | 4,0                             |
| Länge Variable $a$ [mm] **                           | $4,5 \cdot h_1 = 337,5$ |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,05}$ [N/mm <sup>2</sup> ] **   | <b>5,18</b>             |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ] ** | <b>7,32</b>             |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,95}$ [N/mm <sup>2</sup> ] **   | <b>9,94</b>             |                                 |
| Max. Querkraft $V$ [kN] **                           | <b>44,81</b>            |                                 |

Tab. 2.5 Geometrische und mechanische Eigenschaften der Serie T-1  
 \* Werte aus ON EN 338 [8]  
 \*\* Ergebnisse aus Vorbemessung lt. Rechnungsablauf, Abschnitt 2.2.1

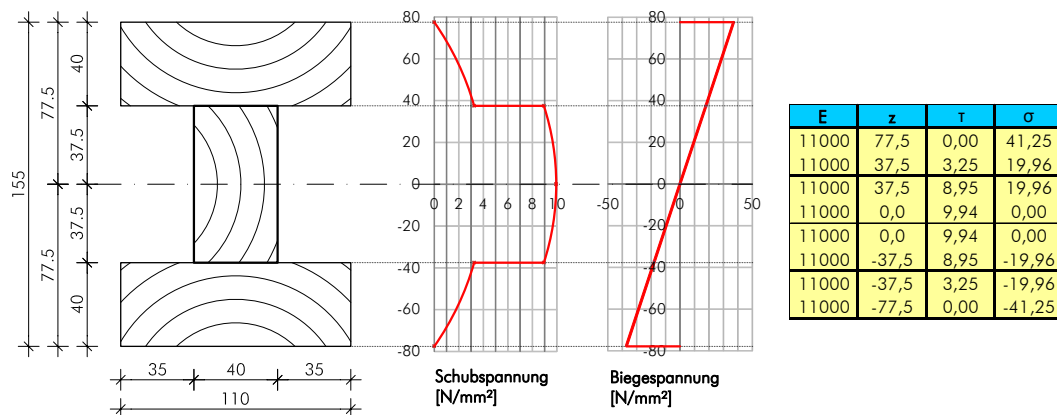


Abb. 2.9 Serie T-1: Biege- und Schubspannungsverteilung lt. Vorbemessung

2.2.2.2 Serie T-2

|  | Steg<br>(Prüfkörper)    | Gurte<br>(Verstärkungslamellen) |
|--|-------------------------|---------------------------------|
| Material & Festigkeitsklasse                         | Fichte C24*             | Fichte C24*                     |
| Höhe $h_{Pr-QS}$ und $h_1$ [mm]                      | 145                     | 80                              |
| Breite $b_{Pr-QS}$ und $b_1$ [mm]                    | 40                      | 110                             |
| Gesamthöhe $h$ [mm]                                  | 305                     |                                 |
| Länge $l$ [mm]                                       | 1970                    |                                 |
| Länge Schubfläche $l_{ef}$ [mm]                      | 452,9                   |                                 |
| E-Modul $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *          | 11000                   | 11000                           |
| Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 14                      | 14                              |
| Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 24                      | 24                              |
| Schubfestigkeit $f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 4,0                     | 4,0                             |
| Länge Variable $a$ [mm] **                           | $4,0 \cdot h_1 = 580,0$ |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,05}$ [N/mm <sup>2</sup> ] **   | <b>4,66</b>             |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ] ** | <b>6,58</b>             |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,95}$ [N/mm <sup>2</sup> ] **   | <b>8,94</b>             |                                 |
| Max. Querkraft $V$ [kN] **                           | <b>79,12</b>            |                                 |

Tab. 2.6 Geometrische und mechanische Eigenschaften der Serie T-2  
\* Werte aus ON EN 338 [8]  
\*\* Ergebnisse aus Vorbemessung lt. Rechnungsablauf, Abschnitt 2.2.1

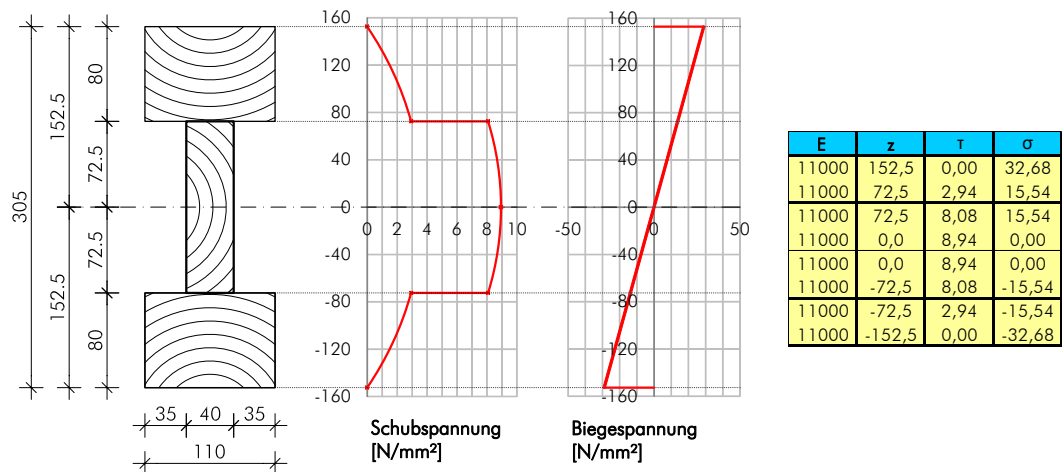


Abb. 2.10 Serie T-2: Biege- und Schubspannungsverteilung lt. Vorbemessung

2.2.2.3 Serie T-3

|  | Steg<br>(Prüfkörper) | Gurte<br>(Verstärkungslamellen) |
|--|----------------------|---------------------------------|
| Material & Festigkeitsklasse                         | Fichte C16*          | Fichte C16*                     |
| Höhe $h_{Pr-QS}$ und $h_1$ [mm]                      | 150                  | 80                              |
| Breite $b_{Pr-QS}$ und $b_1$ [mm]                    | 80                   | 220                             |
| Gesamthöhe $h$ [mm]                                  | 310                  |                                 |
| Länge $l$ [mm]                                       | 1970                 |                                 |
| Länge Schubfläche $l_{ef}$ [mm]                      | 320,83               |                                 |
| E-Modul $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *          | 8000                 | 8000                            |
| Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 10                   | 10                              |
| Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 16                   | 16                              |
| Schubfestigkeit $f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 3,2                  | 3,2                             |
| Länge Variable $a$ [mm] **                           | 3,0 * $h_1 = 450$    |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,05}$ [N/mm <sup>2</sup> ] **   | <b>4,33</b>          |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ] ** | <b>6,12</b>          |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,95}$ [N/mm <sup>2</sup> ] **   | <b>8,31</b>          |                                 |
| Max. Querkraft $V$ [kN] **                           | <b>149,79</b>        |                                 |

Tab. 2.7 Geometrische und mechanische Eigenschaften der Serie T-3  
 \* Werte aus ON EN 338 [8]  
 \*\* Ergebnisse aus Vorbemessung lt. Rechnungsablauf, Abschnitt 2.2.1

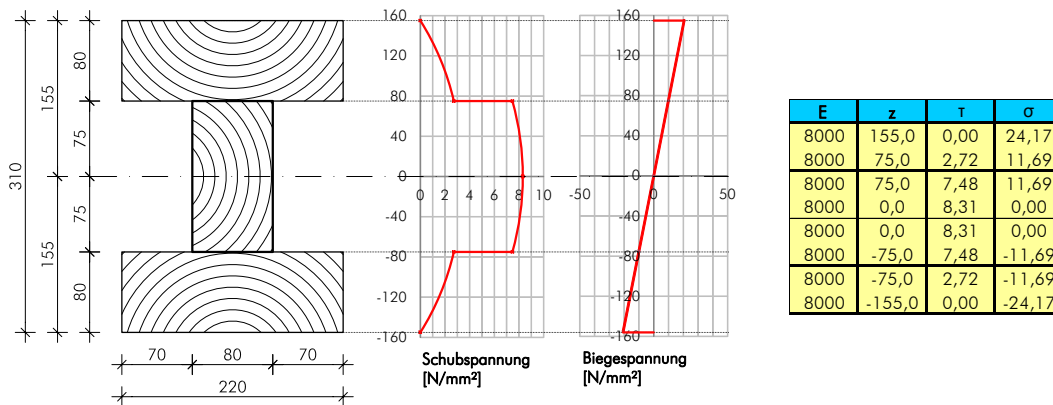


Abb. 2.11 Serie T-3: Biege- und Schubspannungsverteilung lt. Vorbemessung



2.2.2.4 Serie T-4

|  | Steg<br>(Prüfkörper)  | Gurte<br>(Verstärkungslamellen) |
|--|-----------------------|---------------------------------|
| Material & Festigkeitsklasse                         | Fichte C24*           | Fichte C24*                     |
| Höhe $h_{Pr-QS}$ und $h_1$ [mm]                      | 150                   | 80                              |
| Breite $b_{Pr-QS}$ und $b_1$ [mm]                    | 80                    | 220                             |
| Gesamthöhe $h$ [mm]                                  | 310                   |                                 |
| Länge $l$ [mm]                                       | 1970                  |                                 |
| Länge Schubfläche $l_{ef}$ [mm]                      | 470,8                 |                                 |
| E-Modul $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *          | 11000                 | 11000                           |
| Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 14                    | 14                              |
| Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 24                    | 24                              |
| Schubfestigkeit $f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 4,0                   | 4,0                             |
| Länge Variable $a$ [mm] **                           | $4,0 \cdot h_1 = 600$ |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,05}$ [N/mm <sup>2</sup> ] **   | <b>4,00</b>           |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ] ** | <b>5,64</b>           |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,95}$ [N/mm <sup>2</sup> ] **   | <b>7,67</b>           |                                 |
| Max. Querkraft $V$ [kN] **                           | <b>138,20</b>         |                                 |

Tab. 2.8 Geometrische und mechanische Eigenschaften der Serie T-4  
\* Werte aus ON EN 338 [8]  
\*\* Ergebnisse aus Vorbemessung lt. Rechnungsablauf, Abschnitt 2.2.1

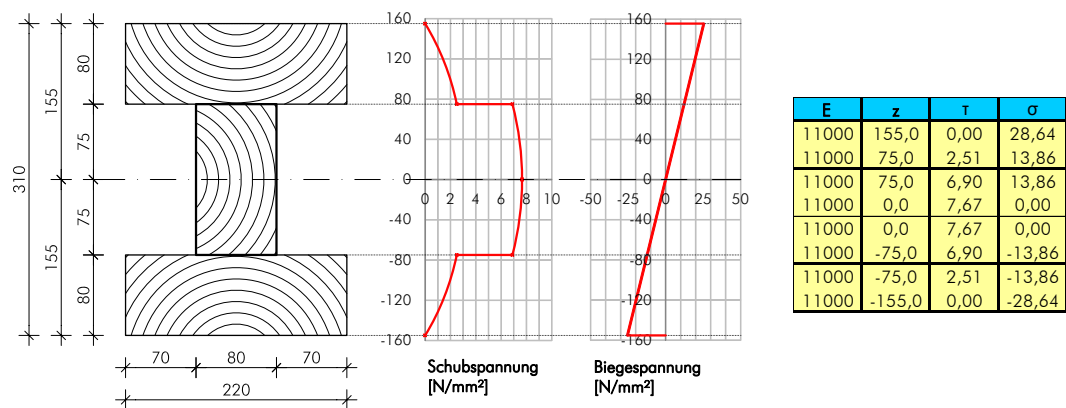


Abb. 2.12 Serie T-4: Biege- und Schubspannungsverteilung lt. Vorbemessung

2.2.2.5 Serie T-5

|  | Steg<br>(Prüfkörper) | Gurte<br>(Verstärkungslamellen) |
|--|----------------------|---------------------------------|
| Material & Festigkeitsklasse                         | Fichte C40*          | Fichte C40*                     |
| Höhe $h_{Pr-QS}$ und $h_1$ [mm]                      | 150                  | 80                              |
| Breite $b_{Pr-QS}$ und $b_1$ [mm]                    | 80                   | 220                             |
| Gesamthöhe $h$ [mm]                                  | 310                  |                                 |
| Länge $l$ [mm]                                       | 1970                 |                                 |
| Länge Schubfläche $l_{ef}$ [mm]                      | 545,8                |                                 |
| E-Modul $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *          | 14000                | 14000                           |
| Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 24                   | 24                              |
| Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 40                   | 40                              |
| Schubfestigkeit $f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 4,0                  | 4,0                             |
| Länge Variable $a$ [mm] **                           | 4,5 * $h_1 = 675$    |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,05}$ [N/mm <sup>2</sup> ] **   | <b>3,87</b>          |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ] ** | <b>5,47</b>          |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,95}$ [N/mm <sup>2</sup> ] **   | <b>7,43</b>          |                                 |
| Max. Querkraft $V$ [kN] **                           | <b>133,97</b>        |                                 |

Tab. 2.9 Geometrische und mechanische Eigenschaften der Serie T-5  
 \* Werte aus ON EN 338 [8]  
 \*\* Ergebnisse aus Vorbemessung lt. Rechnungsablauf, Abschnitt 2.2.1

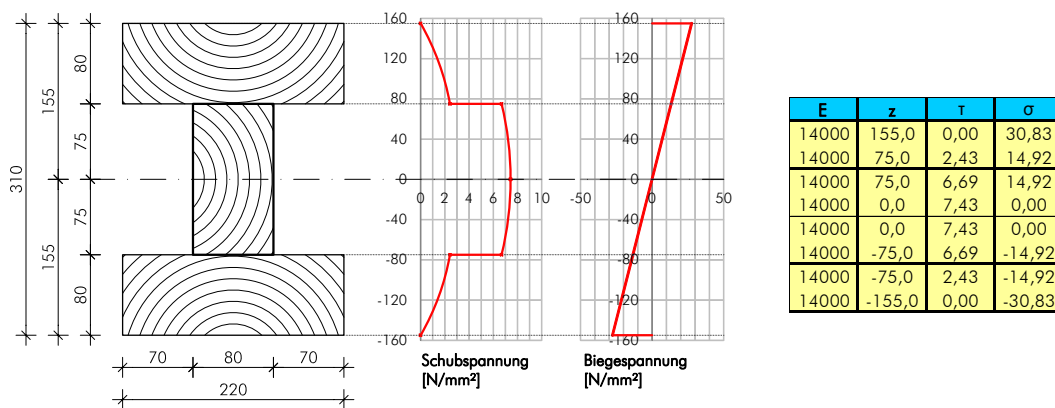


Abb. 2.13 Serie T-5: Biege- und Schubspannungsverteilung lt. Vorbemessung

2.2.2.6 Serie T-6

|  | Steg<br>(Prüfkörper)   | Gurte<br>(Verstärkungslamellen) |
|--|------------------------|---------------------------------|
| Material & Festigkeitsklasse                         | Fichte C24*            | Fichte C24*                     |
| Höhe $h_{Pr-QS}$ und $h_1$ [mm]                      | 300                    | 160                             |
| Breite $b_{Pr-QS}$ und $b_1$ [mm]                    | 80                     | 220                             |
| Gesamthöhe $h$ [mm]                                  | 620                    |                                 |
| Länge $l$ [mm]                                       | 3940                   |                                 |
| Länge Schubfläche $l_{ef}$ [mm]                      | 1091,7                 |                                 |
| E-Modul $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *          | 11000                  | 11000                           |
| Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 14                     | 14                              |
| Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 24                     | 24                              |
| Schubfestigkeit $f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 4,0                    | 4,0                             |
| Länge Variable $a$ [mm] **                           | $4,5 \cdot h_1 = 1350$ |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,05}$ [N/mm <sup>2</sup> ] **   | <b>3,34</b>            |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ] ** | <b>4,72</b>            |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,95}$ [N/mm <sup>2</sup> ] **   | <b>6,41</b>            |                                 |
| Max. Querkraft $V$ [kN] **                           | <b>231,28</b>          |                                 |

Tab. 2.10 Geometrische und mechanische Eigenschaften der Serie T-6  
\* Werte aus ON EN 338 [8]  
\*\* Ergebnisse aus Vorbemessung lt. Rechnungsablauf, Abschnitt 2.2.1

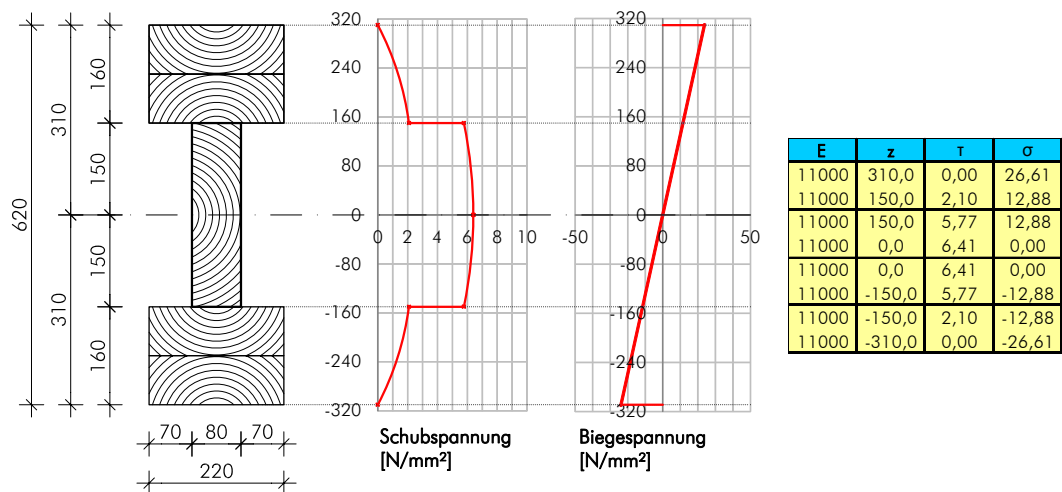


Abb. 2.14 Serie T-6: Biege- und Schubspannungsverteilung lt. Vorbemessung

2.2.2.7 Serie T-7

|  | Steg<br>(Prüfkörper) | Gurte<br>(Verstärkungslamellen) |
|--|----------------------|---------------------------------|
| Material & Festigkeitsklasse                         | Fichte C24*          | Fichte C24*                     |
| Höhe $h_{Pr-QS}$ und $h_1$ [mm]                      | 80                   | 80                              |
| Breite $b_{Pr-QS}$ und $b_1$ [mm]                    | 80                   | 220                             |
| Gesamthöhe $h$ [mm]                                  | 240                  |                                 |
| Länge $l$ [mm]                                       | 1200                 |                                 |
| Länge Schubfläche $l_{ef}$ [mm]                      | 260,0                |                                 |
| E-Modul $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *          | 11000                | 11000                           |
| Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 14                   | 14                              |
| Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 24                   | 24                              |
| Schubfestigkeit $f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 4,0                  | 4,0                             |
| Länge Variable $a$ [mm] **                           | 4,5 * $h_1 = 360$    |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,05}$ [N/mm <sup>2</sup> ] **   | <b>4,53</b>          |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ] ** | <b>6,39</b>          |                                 |
| Schubfestigkeit $f_{v,95}$ [N/mm <sup>2</sup> ] **   | <b>8,68</b>          |                                 |
| Max. Querkraft $V$ [kN] **                           | <b>116,80</b>        |                                 |

Tab. 2.11 Geometrische und mechanische Eigenschaften der Serie T-7  
 \* Werte aus ON EN 338 [8]  
 \*\* Ergebnisse aus Vorbemessung lt. Rechnungsablauf, Abschnitt 2.2.1

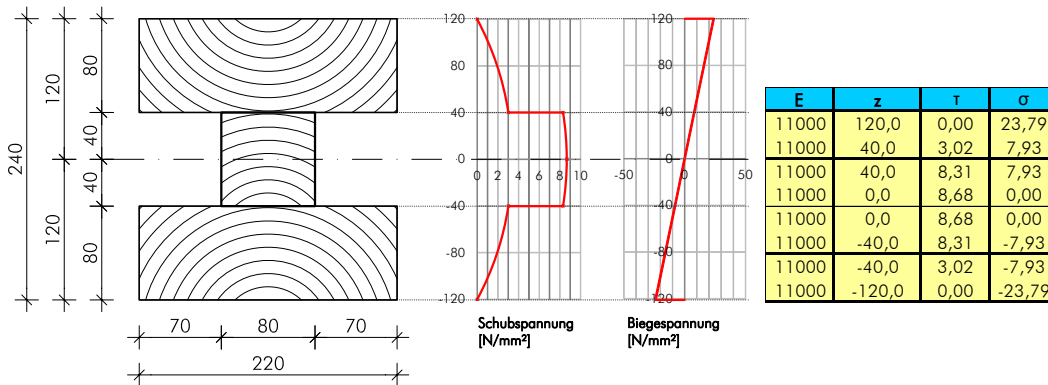


Abb. 2.15 Serie T-7: Biege- und Schubspannungsverteilung lt. Vorbemessung

### 2.2.3 Vordimensionierung der Biegeprüfserie T-8

Für die Durchführung der 4-Punkt-Biegeprüfungen nach ON EN 408 [5] wurden ebenfalls Vorbemessungen durchgeführt. Dies war notwendig, um die Festigkeiten auf Mittelwert- und 95%-Niveau und die erwartbare maximale Bruchlasten ermitteln zu können.

In Tab. 2.12 sind die geometrischen und mechanischen Eigenschaften sowie die Prüfgeometrie des Prüfquerschnitts gegeben. Des Weiteren sind die, aus der nachfolgenden Vorbemessung ermittelten Spannungen sowie die erwartbare maximale Bruchkraft, angeführt.

| Spannweite  | Prüfkörper   |
|---|--------------|
| Material & Festigkeitsklasse                                | Fichte C24*  |
| Höhe h [mm]   | 150          |
| Breite b [mm]   | 80           |
| Gesamtlänge l <sub>ges</sub> [mm]                           | 2850         |
| freie Spannweite global l [mm]                              | 2700         |
| freie Spannweite lokal l <sub>1</sub> [mm]                  | 750          |
| Spannweite a <sub>1</sub> [mm]                              | 900          |
| Spannweite a <sub>2</sub> [mm]                              | 900          |
| E-Modul E <sub>0,mean</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] *          | 11000        |
| Zugfestigkeit f <sub>t,0,k</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 14           |
| Biegefestigkeit f <sub>m,k</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 24           |
| Schubfestigkeit f <sub>v,k</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] *     | 4,0          |
| Biegefestigkeit f <sub>m,mean</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] ** | <b>37,09</b> |
| Biegefestigkeit f <sub>m,95</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] **   | <b>53,95</b> |
| max. Bruchlast F [kN] **                                    | <b>35,97</b> |

Tab. 2.12 Geometrische und mechanische Eigenschaften der Biegeserie T-8

\* Werte aus ÖNORM EN 338 [8]

\*\* Ergebnisse aus Vorbemessung lt. Rechnungsablauf, Abschnitt 2.2.3

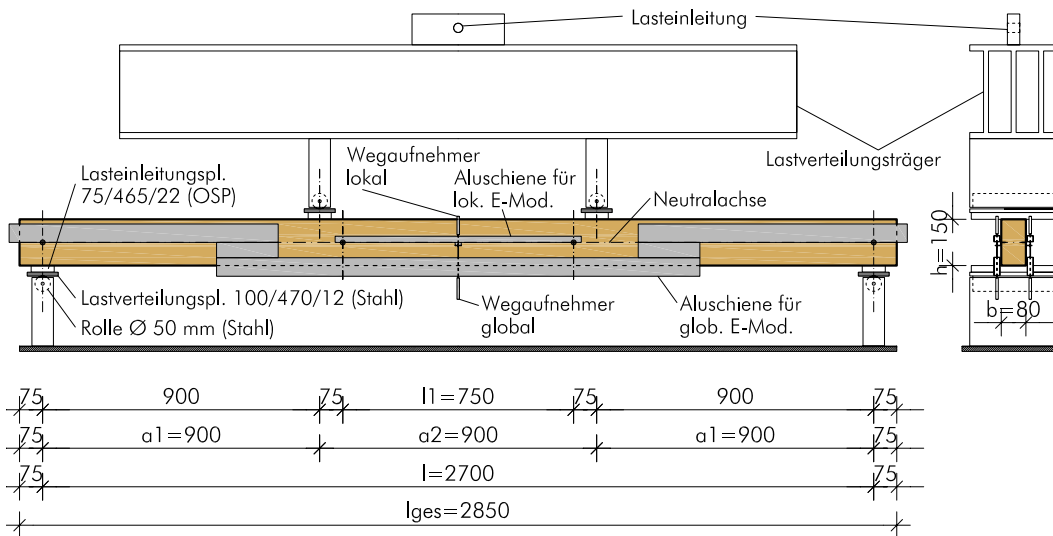


Abb. 2.16 Prüfgeometrie der 4-Punkt-Biegeprüfungen lt. ON EN 408 [5] der Serie T-8 (lges... Gesamtlänge; l... freie Spannweite global; l1... freie Spannweite lokal; a1... Spannweite; a2... Spannweite)

### Rechenablauf für die Vorbemessung der Biegeprüfserie T-8:

Die Ermittlung der zu erwartenden mittleren Biegefestigkeit  $f_{m,mean}$  erfolgte unter der Annahme einer log-normalverteilten Biegefestigkeit mit einem Variationskoeffizient (COV) von 25% und unter Verwendung der charakteristischen Biegefestigkeit  $f_{m,k}$  (lt. ON EN 338 [8]), welche als 5%-Quantilwert angenommen wurde.

$$f_{m,mean} = f_{m,k} \cdot e^{1,645 \sqrt{\ln(\text{COV}^2 + 1)}} \cdot \sqrt{\text{COV}^2 + 1} = \quad 2.19$$

mit  $\text{COV} = 25\%$  und  $f_{m,k} = 24,0 \text{ N/mm}^2$

$$f_{m,mean} = 24,00 \cdot e^{1,645 \sqrt{\ln(0,25^2 + 1)}} \cdot \sqrt{0,25^2 + 1} = 37,09 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Die Varianz ergab sich zu:

$$\sigma^2 = (\text{COV} \cdot f_{m,mean})^2 = (0,25 \cdot 37,09)^2 = 85,9882 \text{ [(N/mm}^2\text{)}^2\text{]} \quad 2.20$$

Gemäß dem Berechnungsablauf zur Quantilsberechnung der log-normalverteilten Kenngrößen in Abschnitt 2.2.1 (Glg. 2.5 bis Glg. 2.9) wurde die 95%-Quantile  $f_{m,95}$  der Biegefestigkeit ermittelt.

Diese ergab sich zu:

$$f_{m,95} = 53,95 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Aus den ermittelten Biegespannungen können nachfolgend mithilfe der Glg. 2.21 und Glg. 2.22 die 5%- und 95%-Quantile sowie der zu erwartende Mittelwert der Bruchkräfte errechnet werden.

$$\sigma_i = \frac{M}{W} = \sigma_i = \frac{F \cdot a_1}{W} \rightarrow F_{\max} = \frac{\sigma_i \cdot W}{a_1} \cdot 2 \quad 2.21$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{80 \cdot 150^2}{6} = 300000 \text{ [mm}^3\text{]} \quad 2.22$$

$$F_{m,05} = \frac{f_{m,k} \cdot W}{a_1} \cdot 2 = \frac{24,00 \cdot 300000}{900} \cdot 2 = 16000 \text{ [N]} \approx 16,00 \text{ [kN]} \quad 2.23$$

$$F_{m,\text{mean}} = \frac{f_{m,\text{mean}} \cdot W}{a_1} \cdot 2 = \frac{37,09 \cdot 300000}{900} \cdot 2 = 24728 \text{ [N]} \approx 24,73 \text{ [kN]} \quad 2.24$$

$$F_{m,95} = \frac{f_{m,95} \cdot W}{a_1} \cdot 2 = \frac{53,95 \cdot 300000}{900} \cdot 2 = 35967 \text{ [N]} \approx 36,00 \text{ [kN]} \quad 2.25$$

Nachfolgend werden mithilfe der Glg. 2.26 die 5%- und 95%-Quantile sowie der Mittelwert der erwartbaren globalen Durchbiegung ermittelt.

Hierzu werden zuerst die zugehörigen Elastizitätsmodule bestimmt. Der Berechnungsablauf zur Ermittlung der 5%- und 95%-Quantile des E-Moduls erfolgte gemäß der log-Normalverteilung und den Formeln in Abschnitt 2.2.1 (Glg. 2.5 bis Glg. 2.9) auf Basis der Annahmen, dass  $\mu = E_{0,\text{mean}} = 11000 \text{ N/mm}^2$  und  $\text{COV}(E_{0,\text{mean}}) = 20\%$  entsprechen.

$$E_{0,95} = 14940 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$E_{0,05} = 7787 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Hier ist ersichtlich, dass der errechnete  $E_{0,05}$  und die 5%-Quantile des E-Moduls gemäß ON EN 338 [8] mit  $E_{0,05} = 7400 \text{ N/mm}^2$  lediglich geringfügig voneinander abweichen. Dies bestätigt die Plausibilität der verwendeten Formeln.

Für die Ermittlung der Durchbiegung wird der Schubanteil nicht mitberücksichtigt, da dieser lediglich rund 6% der Gesamtdurchbiegung ausmacht und die ermittelte Durchbiegung nur für die erste Abschätzung der Prüfgeschwindigkeit bei der Prüfdurchführung benötigt wurde.

$$w_i = \frac{F_i}{E_i \cdot J_{\text{ef}}} \cdot \frac{a_1}{48} \cdot 8 \cdot a_1^2 + 12 \cdot a_1 \cdot a_1 + 3 \cdot a_1^2 \quad 2.26$$

Mithilfe des Trägheitsmomentes  $J_{ef}$  lt. Glg. 2.27

$$J_{ef} = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{80 \cdot 150^3}{12} = 22500000 = 2,25 \cdot 10^7 \text{ [mm}^4\text{]} \quad 2.27$$

können die Durchbiegungen nach Glg. 2.26 ermittelt werden.

$$w_{min} = \frac{F_{m,05}}{E_{0,95} \cdot J_{ef}} \cdot \frac{a_1}{48} \cdot 8 \cdot a1^2 + 12 \cdot a1 \cdot a1 + 3 \cdot a1^2$$

$$w_{min} = \frac{16000}{14940 \cdot 22500000} \cdot \frac{900}{48} \cdot 8 \cdot 900^2 + 12 \cdot 900 \cdot 900 + 3 \cdot 900^2 = 16,63 \text{ [mm]}$$

$$w_{mean} = \frac{F_{m,mean}}{E_{0,mean} \cdot J_{ef}} \cdot \frac{a_1}{48} \cdot 8 \cdot a1^2 + 12 \cdot a1 \cdot a1 + 3 \cdot a1^2$$

$$w_{mean} = \frac{24728}{11000 \cdot 22500000} \cdot \frac{900}{48} \cdot 8 \cdot 900^2 + 12 \cdot 900 \cdot 900 + 3 \cdot 900^2 = 34,90 \text{ [mm]}$$

$$w_{max} = \frac{F_{m,95}}{E_{0,05} \cdot J_{ef}} \cdot \frac{a_1}{48} \cdot 8 \cdot a1^2 + 12 \cdot a1 \cdot a1 + 3 \cdot a1^2$$

$$w_{max} = \frac{35968}{7787 \cdot 22500000} \cdot \frac{900}{48} \cdot 8 \cdot 900^2 + 12 \cdot 900 \cdot 900 + 3 \cdot 900^2 = 71,71 \text{ [mm]}$$

## 2.2.4 Verwendung der Daten aus der Vordimensionierung

Die ermittelten Maximalkräfte aus der Vordimensionierung dienen alleinig der Prüfvorbereitung. Sie beeinflussen vor allem die Wahl der Prüfmaschinen, wobei die nachfolgenden zwei Prüfmaschinen, siehe auch Abschnitt 2.3.1.3, zur Auswahl standen.

- Die Universalprüfmaschine BETA\_1000 des Labors für konstruktiven Ingenieurbau (LKI) der TU Graz (Abb. 2.27), welche einen maximalen Belastungsbereich von  $\pm 1000$  kN aufweist sowie die
- Universalprüfmaschine ZWICK des Lignum Test Centers der TU Graz (Abb. 2.28), welche einen maximalen Belastungsbereich von  $\pm 275$  kN aufweist.

Die ermittelten Werte der zu erwartenden Durchbiegungen wurden für die Abschätzung der Prüfgeschwindigkeit herangezogen. In Anlehnung an die ON EN 408 [5] ist bei Biegeprüfungen ein Versagen in  $300 \pm 120$  Sekunden herbeizuführen.

Des Weiteren wurden die hier ermittelten Maximalkräfte für die Dimensionierung der Auflagerverstärkungen, wie in Abschnitt 2.3.2.2 genauer beschrieben, herangezogen.



## 2.3 Prüfvorbereitung

### 2.3.1 Verwendete Bearbeitungs-, Mess- und Prüfgeräte sowie Hilfsmaterialien

Die in diesem Kapitel beschriebenen Geräte und Materialien kamen zur Herstellung der Prüfkörper sowie zu deren Prüfung zur Anwendung.

#### 2.3.1.1 Bearbeitungsgeräte

- Tischkreissäge Altendorf F45

Mit der in Abb. 2.17 dargestellten Tischkreissäge erfolgte der Zuschnitt der vom Sägewerk gelieferten Hobelware sowie der Materialien zur Herstellung von Schablonen, Lasteinleitungsplatten, etc.



Abb. 2.17 Tischkreissäge Altendorf F45

- Hobelmaschine Panhans 445-A

Zur Herstellung der planen Oberflächen für die Verklebung kam die in Abb. 2.18 dargestellte Hobelmaschine der Firma Panhans zur Anwendung.



Abb. 2.18 Hobelmaschine Panhans 445-A

- Holzplattenpresse LangzaunerPresse LZT 160-SF

Diese wurde für die Verklebung der Gurte mit dem Steg sowie der zweiteiligen Gurte (Ober- sowie Untergurt) der Serie T-6 (siehe Abb. 2.19) herangezogen. Die Presse kann einen Pressdruck von bis zu 42 [N/cm<sup>2</sup>] auf einer Fläche von bis zu 3,9 [m<sup>2</sup>] aufbringen.



Abb. 2.19 Holzplattenpresse LangzaunerPresse LZT 160-SF, Verleimung der Gurte der Serie T-6

- Band-, Ketten- und Kappsäge

Zur Herstellung der Darrproben, wie in Abschnitt 2.4.1.1 beschrieben, waren, abhängig von den Prüfrägerabmessungen, die Bandsäge der Firma Panhans, die Kettensäge der Firma Stihl bzw. die Kappsäge der Firma DEWALT, wie in Abb. 2.20 dargestellt, in Verwendung.



Abb. 2.20 Bandsäge der Fa. Panhans (links), Kettensäge der Fa. Stihl (mitte) und Kappsäge der Fa. DEWALT (rechts)

- Bohrmaschinen und Akkuschauber

Diese wurden für die Herstellung der Auflagerverstärkungen sowie zum Anbringen der DD1–Wegaufnehmer verwendet.



Abb. 2.21 Bohrmachine (links) und Akkuschauber (rechts)

- Stahlmasse zu je 1 Tonne

Da die Abmessungen der Träger der Serie T-6 zu groß für die Holzplattenpresse (Abb. 2.19) waren, kamen, wie in Abb. 2.22 zu sehen, für deren Verpressung drei 1-Tonnen Massen zur Anwendung.

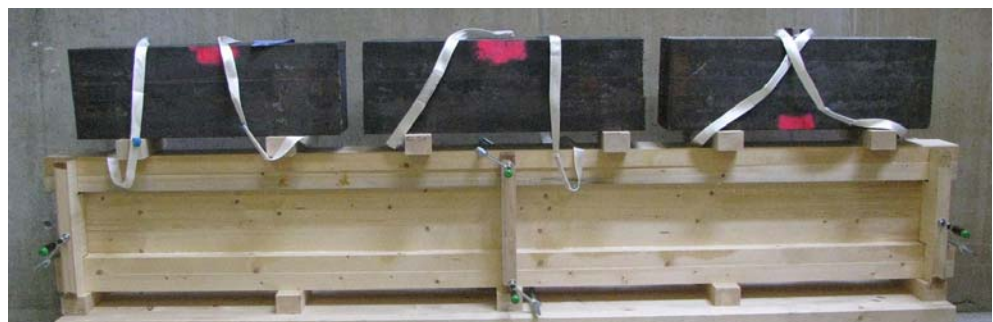


Abb. 2.22 3 Stahlmassen zu je 1 t, an einem Prüfkörper der Serie T-6

- Portalkran, Stapler und Hubwagen

Für den Transport innerhalb der Prüfhalle sowie für die Zubringung und die Verfuhr der Prüfquerschnitte als auch des Ausgangsmaterials wurden die in Abb. 2.23 dargestellten Hebeegeräte verwendet.



Abb. 2.23 Portalkran (links), Stapler (mitte) und Hubwagen (rechts)

### 2.3.1.2 Messgeräte

- Feuchtemessgerät GANN Hydromette M2050

Dieses in Abb. 2.24 dargestellte Messgerät kam, zusammen mit den Rammelektroden M 18 mit isoliertem Schaft, zur Bestimmung der Holzfeuchte zur Anwendung. Es ermittelt den Feuchtegehalt über den elektrischen Widerstand des Holzes. Das Gerät misst in einem Prüfbereich von 6-18% des Holzfeuchtegehaltes.



Abb. 2.24 Feuchtemessgerät GANN Hydromette M2050

- Waagen

Zur Ermittlung der Masse des Ausgangsmaterials wurde die Waage Sartorius EA60 EDE-1 (Abb. 2.25; links), mit einer Genauigkeit von 1/100 g, eingesetzt.

Für die Massenbestimmung der für die Ermittlung der Holzfeuchtigkeit entnommenen Darrproben kam die Waage Sartorius GPA 3202-OCE (Abb. 2.25; rechts), mit einer Genauigkeit von 1/100 g, zur Anwendung.

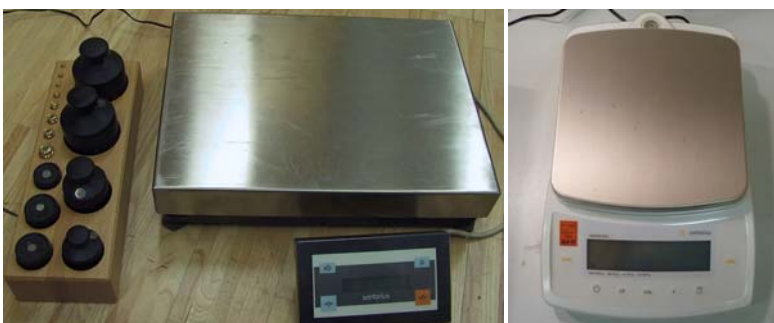


Abb. 2.25 Waagen Sartorius EA60 EDE-1 (links) und Sartorius GPA 3202-OCE (rechts)

- Digitale Messschieber und Rollmeter

Die Abmessungen (Höhen und Breiten) der Probekörper wurden mit den digitalen Messschiebern der Firma Mitoya (16 EX dig. 150 mm und 16 EX dig. 300 mm),



wie in Abb. 2.26 links und mitte dargestellt, bestimmt. Sie besitzen eine Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm.

Zur Bestimmung der Längen sowie zum Anzeichnen der Position von Verstärkungen und Ähnlichem kamen Rollmeter, wie in Abb. 2.26 rechts dargestellt, zum Einsatz.



Abb. 2.26 Digitale Messschieber, Mitoya 16 EX 150 (links), Mitoya 16 EX 300 (mitte) und Rollmeter (rechts)

- Winkel

Stahl- und Holzwinkel zum Anzeichnen der Position der Auflagerverstärkungen sowie der Kraffein- und Ausleitungsplatten.

### 2.3.1.3 Prüfgeräte

- Universalprüfmaschine BETA\_1000 des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI) der TU Graz

Diese kam beim Großteil der 3-Punkt-Biegeprüfungen zur Ermittlung der Schubfestigkeit zum Einsatz. Das Gerät, wie in Abb. 2.27 dargestellt, besitzt einen Belastungsbereich von 0 bis  $\pm 1000$  kN.



Abb. 2.27 Universalprüfmaschine BETA\_1000 des LKI der TU Graz

- Universalprüfmaschine ZWICK Z 250 des Lignum Test Centers des Institutes für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz

Für die Durchführung der 4-Punkt-Biegeprüfungen sowie für eine Teil der 3-Punkt-Biegeprüfungen wurde die Universalprüfmaschine Z 250 der Firma ZWICK mit dem Prüfgerüst lignum\_uni\_275 (siehe Abb. 2.28) verwendet. Sie ermöglicht die Durchführung von Biege-, Schub-, Druck- und Zugprüfungen und weist einen Belastungsbereich von 0 bis  $\pm 275$  kN auf. Die Datenaufnahme und eine erste Auswertung erfolgte mithilfe des PC-Programmes CatmanEasy-AP.



Abb. 2.28 Universalprüfmaschine ZWICK Z 250 des Lignum Test Centers des Institutes für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz.

- Prüfgerüst für die 4-Punkt-Biegeprüfung

Mithilfe der in Abb. 2.29 dargestellten 4-Punkt-Biegeprüfkonfiguration lt. ON EN 408 [5] wurden die globalen und lokalen Referenz E-Module sowie die Biegefestigkeit für das verwendete Holz (S10+) ermittelt.



Abb. 2.29 Prüfgerüst für die 4-Punkt-Biegeprüfung laut ON EN 408 [5] an der Universalprüfmaschine ZWICK Z 275 des Lignum Test Centers des Institutes für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz

- DD1–Wegaufnehmer zur Bestimmung des Schubmoduls

Zur Bestimmung des Schubmoduls bei der Serie T-6 kamen die in Abb. 2.30 dargestellten Wegaufnehmer, die Verformungen im Schubfeld mit einer Genauigkeit von  $\pm 1/1000$  mm messen, zur Anwendung.

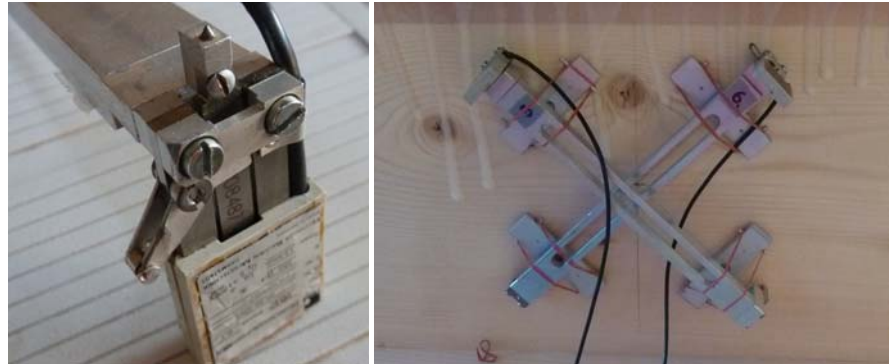


Abb. 2.30 DD1–Wegaufnehmer zur Bestimmung des Schubmoduls bei Serie T-6; links: Messkopf der DD1; rechts: montierte Messbasen mit den DD1 im Schubfeld der Serie T-6

- Signalverstärker DMCplus und Messcomputer des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI) der TU Graz

Zur Erfassung der von den 8 DD1–Wegaufnehmern gelieferten Daten sowie zu dessen Verstärkung wurde der Signalverstärker DMCplus verwendet. Die eingelangten Daten, sowohl aus der Prüfmaschine als auch von den Wegaufnehmern, wurden mithilfe des Programmes „BEAM DMC+“ erfasst, grafisch dargestellt und als Text-file gespeichert.

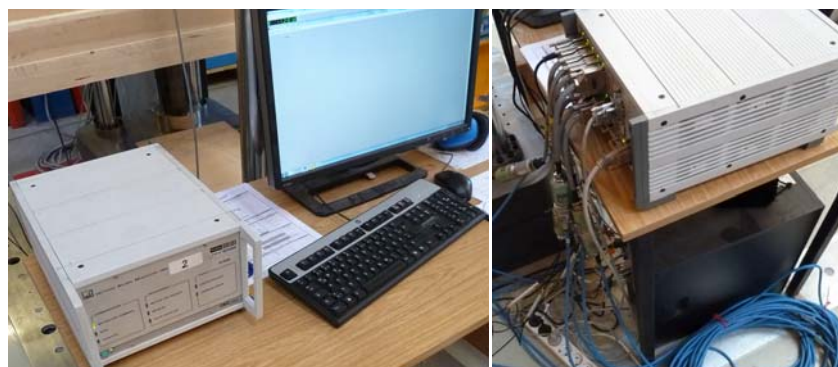


Abb. 2.31 Signalverstärker DMCplus und Messcomputer des LKI der TU Graz

#### 2.3.1.4 Hilfsmaterialien

- Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoff

Zur Verklebung der Gurte mit dem Steg sowie zur Verklebung der zweiteiligen Gurte der Serie T-6 wurden flüssige Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoffe der Firma Jowat (Jowapur<sup>®</sup> [39]) und der Firma Purbond (PURBOND<sup>®</sup> HB 110 [40]) verwendet.



Abb. 2.32 Klebegasse des Lignum Test Centers des Institutes für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz mit Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoff

- Vollgewindesenkkopfschrauben mit Außengewindedurchmesser 8 mm

Für die Verstärkung des Krafteinleitungs- sowie des Auflagerbereiches der Prüfräger zur Ermittlung der Schubfestigkeit kamen die in Abb. 2.33 dargestellten Vollgewindesenkkopfschrauben zum Einsatz. Verwendet wurden Schrauben der Firma Schmid, der Type Star Drive [41] sowie der Firma SPAX, der Type SPAX<sup>®</sup>-S [42].



Abb. 2.33 Verwendete Vollgewindesenkkopfschrauben  $\varnothing$  8 mm, der Firma Schmid, Star Drive [41] (1. von oben 8x200, 2. von oben 8x240 und 4. von oben 8x460) und der Firma SPAX, SPAX<sup>®</sup>-S [42] (3. von oben 8x400)

- Hochdruck-Schichtstoffplatten der Firma FunderMax [43]

Zur besseren Lastverteilung im Lasteinleitungs- sowie Auflagerbereich wurden Hochdruck-Schichtstoffplatten der Firma FunderMax [43] verwendet. Je nach Erfordernis kamen „Max Compact Platten“ (weiß, Abb. 2.34 links) mit einer Stärke von 10 mm oder „Max Alucompact42 Platten“ (grün, Abb. 2.34 rechts) mit einer Stärke von 20 mm zur Anwendung.





Abb. 2.34 Hochdruck-Schichtstoffplatten der Firma FunderMax [43], Max Compact Platten (links), Max Alucompact42 Platten (rechts)

## 2.3.2 Prüfrägerherstellung

Für die Prüfdurchführung wurde das vom Sägewerk gelieferte Holz am Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz weiter bearbeitet bzw. verstärkt. Die dazu notwendigen Maßnahmen werden nachfolgend genauer beschrieben.

### 2.3.2.1 Verklebung

Zur Herstellung einer möglichst planen und für den Kleber reaktiven Oberfläche wurden alle zu verklebenden Seiten der Gurte und Stege mit der Hobelmaschine (siehe Abb. 2.18) bearbeitet.

Für die Verklebung wurden flüssige Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoffe verwendet, welche mit der Holz- und Luftfeuchte reagieren und zu einem wasserunlöslichen Harz aushärten. Zur Verwendung kamen ein Produkt der Firma Jowat (siehe Jowapur® 686.60 [39]) und aufgrund der zu geringen Verfügbarkeit dieses Klebers ein äquivalentes Produkt der Firma Purbond (siehe PURBOND® HB 110 [40]).

- Serie T-1, T-2, T-3, T-4, T-5 und T-7:

Um bei der Verklebung eine möglichst hohe Passgenauigkeit in der Lage des Steges zum Gurt zu erreichen, wurden alle Hölzer dieser Serien, wie in Abb. 2.35 dargestellt, eingeschlitzt und mit einer fremden Feder verstärkt. Die Feder bestand aus Fichtenholz mit ähnlichen Materialeigenschaften wie das zu verklebende Holz. Die notwendige Presskraft für die Verklebung konnte mithilfe der Holzplattenpresse (siehe Abb. 2.19) erreicht werden.

Aufgrund der ähnlichen Materialeigenschaften und den geringen Abmessungen der Feder wird davon ausgegangen, dass diese keinen Einfluss auf die in den Prüfungen zu ermittelnde Schubfestigkeit besitzt.

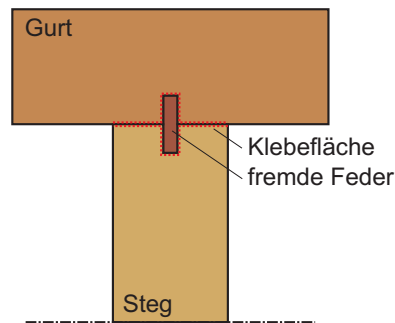
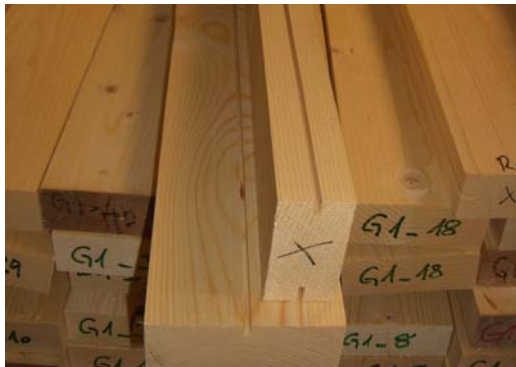


Abb. 2.35 Plan gehobelte und eingeschlitzte Hölzer (links); Skizze Nut- und Feder Verbindung (Lackner [15], rechts)

- Serie T-6

Aus fertigungstechnischen Gründen wurden bei dieser Serie nur die zweiteiligen Ober- und Untergurte der Träger mithilfe der Holzplattenpresse (siehe Abb. 2.19) verklebt. Für die Verklebung der Gurte mit dem Steg kamen die drei 1-Tonnen Massen, wie in Abb. 2.22 und Abb. 2.36 dargestellt, zur Anwendung. Obwohl diese lediglich einen Pressdruck von rund  $9,5 \text{ N/cm}^2$  erreichten, wurde dies aufgrund der ebenen (gehobelten) Oberflächen und den geringen Verwerfungen der Hölzer für den verwendeten Kleber als ausreichend befunden. Die Passgenauigkeit der Lage des Steges zum Gurt wird hier mithilfe von Schablonen erreicht.



Abb. 2.36 Schablonen zum Einrichten (links) sowie Verklebung der Serie T-6 (rechts)

### 2.3.2.2 Konditionierung der Prüfträger

Die Prüfungen erfolgten in Anlehnung an die ON EN 408 [5]. Es wurde daher darauf geachtet, dass die Prüfträger eine Holzfeuchte von  $12\% (\pm 1\%)$  zum Zeitpunkt ihrer Prüfung aufwiesen. Dies konnte durch eine mindestens zwei-wöchige Konditionierung der Träger in der Klimakammer des Lignum Test Centers des Institutes für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz sichergestellt werden.



Abb. 2.37 Konditionierung der Prüfträger in der Klimakammer

### 2.3.2.3 Krafteinleitungs- und Auflagerverstärkung

Um im Bereich der Krafteinleitung und der Auflager ein Überdrücken des Schubfeldes zu vermeiden, wurden die Bereiche unter den Krafteinleitungs- und Auflagerplatten, wie in Abb. 2.38 links dargestellt, mit Vollgewindeschrauben verstärkt. Damit sollte sichergestellt werden, dass die Kraft rein über die Schrauben und nicht direkt über das Holz eingeleitet wird. Die Schraubenlöcher wurden mittels Schablonen vorgebohrt und anschließend mithilfe einer Bohrmaschine eingedreht (siehe Abb. 2.38 rechts). Um einen bündigen Abschluss der Schrauben mit der Holzoberfläche sicherzustellen, erfolgte das Eindrehen der letzten ca. 3mm per Hand.

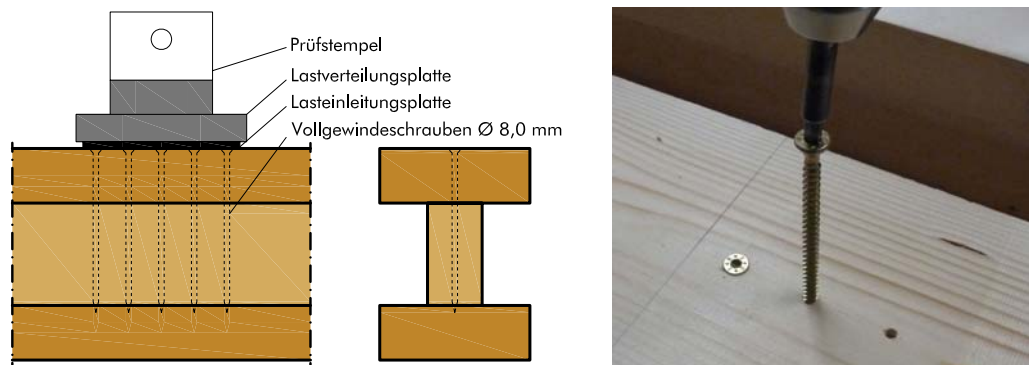


Abb. 2.38 Skizze der Verstärkung mit Vollgewindeschrauben der Firma Schmid (Star Drive) und der Firma SPAX (SPAX®-S) (links) und deren Herstellung (rechts)

#### 2.3.2.3.1 Nachweis der Verstärkung

Abhängig von den einzelnen Prüferien und deren Eigenheiten (unterschiedliche Steifigkeitsklassen, Abmessungen sowie der zu erwartenden aufzunehmenden Kraft) konnten für jede Serie die notwendige Schraubenanzahl sowie deren Ausnutzungsgrad ermittelt werden.

Für die Ausnutzungsgrade wurden die ermittelten maximalen Kräfte aus der Vordimensionierung (siehe Abschnitt 2.2.2) den tatsächlich aufgetretenen maximalen Kräften aus

den Prüfungen gegenübergestellt. Auf der Widerstandsseite wurden die Mittelwerte verwendet, um einen für die Prüftätigkeit realistischen Ausnutzungsgrad zu ermitteln.

Als Referenzberechnung wird ein Träger der Serie T-6 genauer betrachtet. Die Bemessung erfolgt nach den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen (Fa. Schmid der Type Star Drive [41] und Fa. SPAX der Type SPAX<sup>®</sup>-S [42]) bzw. nach den Vorgaben der enBR (siehe Schickhofer [36]) für Auflagerverstärkungen.

- Holzeigenschaften:

|   | Prüfkörper (Steg) | Gurtlamelle |
|---|-------------------|-------------|
| Material  | Fichte C24        | Fichte C24  |
| Höhe $h$ [mm]   | 300               | 160         |
| Breite $b$ [mm]   | 80                | 220         |
| Länge $l$ [mm]  | 3940              |             |
| Dichte $\rho_{\text{mean}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]            | 420               |             |
| Druckfestigkeit $f_{c,90,\text{mean}}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | 3,2**             |             |
| Teilsicherheitsbeiwert (Holz) $\gamma_m$ [--]               | 1,0*              |             |
| Modifikationsbeiwert (Holz) $k_{\text{mod}}$ [--]           | 1,0*              |             |
| Beiwert $k_{c,90}$ [--]                                     | 1,5               |             |

Tab. 2.13 Materialkennwerte für die Vordimensionierung der Serie T-6  
\* für Prüftätigkeiten mit 1,0 gewählt  
\*\* lt. Brandner et al. [23]

- Schraubeneigenschaften:

|  | Vollgewindeschrauben |
|--|----------------------|
| Material   | Stahl                |
| Schraubenlänge $l_{\text{ef}}$ [mm]                          | 460                  |
| Schraubendurchmesser $d$ [mm]                                | 8,0                  |
| Schraubenkerndurchmesser $d_k$ [mm]                          | 5,3                  |
| charakt. Wert der Fließgrenze $f_{y,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | 1000                 |
| Teilsicherheitsbeiwert (Stahl) $\gamma_{m,St}$ [--]          | 1,0*                 |
| Schraubenanzahl $n$ [Stk]                                    | 6                    |
| kleinste Verzweigungslast $N_{ki,G,\text{mean}}$ [N]         | 34700                |

Tab. 2.14 Materialkennwerte der Vollgewindeschrauben Schmid Star Drive  
\* für Prüftätigkeiten mit 1,0 gewählt

Mittlerer Wert der Fließgrenze  $f_{y,\text{mean}}$  [N/mm<sup>2</sup>]:

Vereinfachend wurde mit einer Normalverteilungshypothese auf den Erwartungswert zurückgerechnet, wobei der Standardnormalverteilungsoperator  $\Phi^{-1}_{[05\%]}$  1,645 [-] beträgt

und der Variationskoeffizient (COV) zu 5% angenommen worden ist. Zudem wurde angenommen, dass der charakteristische Wert  $f_{y,k}$  dem 5%-Quantil  $f_{y,05}$  entspricht.

$$X_{\text{mean}} = \frac{X_{05}}{1 - (\Phi_{[05\%]}^{-1} \cdot \text{COV}[X])} \rightarrow f_{y,\text{mean}} = \frac{f_{y,k}}{1 - (\Phi_{[05\%]}^{-1} \cdot \text{COV}[05])} \quad 2.28$$

$$f_{y,\text{mean}} = \frac{1000}{1 - (1,645 \cdot 0,05)} = 1090 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad 2.29$$

Der mittlere Wert der Ausziehparameters  $f_{1,\text{mean}}$  [N/mm<sup>2</sup>] ergibt sich nach Pirnbacher [32] zu:

$$f_{1,\text{mean}} = (0,01353 \cdot \rho_{\text{mean}} - 0,28147 \cdot (2,44 \cdot d^{0,572}) + 2,18888) \cdot \pi \quad 2.30$$

$$f_{1,\text{mean}} = (0,01353 \cdot 420 - 0,28147 \cdot (2,44 \cdot 8^{0,572}) + 2,18888) \cdot \pi = 17,6 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Die Einpressfläche  $A_0$  entspricht der Fläche der Kraffeinleitungsplatte ( $l = 600 \text{ mm}$ ):

$$A_0 = l_{\text{Kraffeinleitungsplatte}} \cdot b_{\text{Gurt}} = 600 \cdot 220 = 132000 \text{ [mm}^2\text{]} \quad 2.31$$

Die Einpressfläche  $A_1$  an der Schraubenspitze errechnet sich wie folgt:

$$A_1 = (2 \cdot l_{\text{ef}} + (n - 1) \cdot a_1) \cdot b_{\text{Stieg}} = (2 \cdot 460 + (6 - 1) \cdot 108) \cdot 80 = 116800 \text{ [mm}^2\text{]} \quad 2.32$$

Der Mittelwert der Normalkraft im vollplastischen Zustand bezogen auf den Schraubenkern errechnet sich zu:

$$N_{\text{pl,mean}} = A_{\text{ef}} \cdot f_{y,\text{mean}} = \left(\frac{5,3^2 \cdot \pi}{4}\right) \cdot 1090 = 24039 \text{ [N]} \quad 2.33$$

Nun folgt die Ermittlung des bezogenen Schlankheitsgrades und des Knickabminderungsfaktors:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{\text{pl,mean}}}{N_{\text{ki,G,k}}}} = \sqrt{\frac{24039}{34700}} = 0,83 \Rightarrow k_{c,s} = 0,67 \text{ [-]}$$

Der Bemessungswert der axialen Tragfähigkeit errechnet sich wie folgt:

$$R_{s,d} = \min \left[ \frac{d \cdot l_{\text{ef}} \cdot f_{1,\text{mean}} \cdot \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_m}}{\frac{k_{c,s} \cdot N_{\text{pl,mean}}}{\gamma_{m,\text{Stahl}}}} \right] \quad 2.34$$

$$R_{s,d} = \min \left[ \frac{8 \cdot 460 \cdot 17,6 \cdot \frac{1,0}{1,0}}{\frac{0,67 \cdot 24039}{1,0}} \right] = \min \begin{bmatrix} 64918 \\ 16106 \end{bmatrix} = 16106 \text{ [N]}$$

Schließlich kann der Bemessungswert der Tragfähigkeit ermittelt werden:

$$R_{90,d} = \min \begin{bmatrix} k_{c,90,d} \cdot f_{c,90,mean} \cdot A_0 + n \cdot R_{s,d} \\ k_{c,90,d} \cdot f_{c,90,mean} \cdot A_1 \end{bmatrix} \quad 2.35$$

$$R_{90,d} = \min \begin{bmatrix} 1,5 \cdot 3,2 \cdot 132000 + 6 \cdot 16106 \\ 1,5 \cdot 3,2 \cdot 116800 \end{bmatrix} = \min \begin{bmatrix} 730237 \\ 560640 \end{bmatrix} = 560640 \text{ [N]}$$

Als Beispiel wird der Nachweis mit der maximalen Kraft aus der Vorbemessung  $F_{max} = 462600 \text{ N}$  geführt:

$$\frac{F_{max}}{R_{90,d}} \leq 1,0 \quad \Rightarrow \quad \frac{462600}{560640} = 0,83 \text{ [-]} \quad 2.36$$

Daraus folgt ein Ausnutzungsgrad der Auflagerverstärkung von 83%. Eine Zusammenfassung der Ausnutzungsgrade erfolgt in Tab. 2.15.

- Mindestabstände

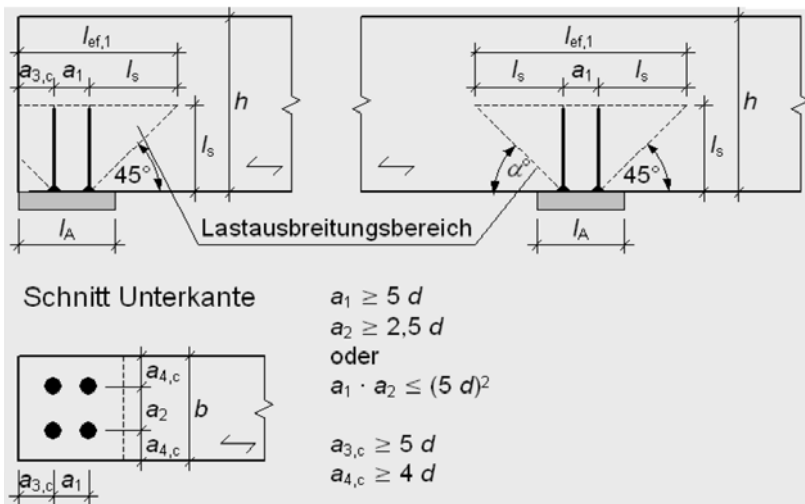


Abb. 2.39 Mindestabstände der Verstärkungsmittel (Vollgewindeschrauben) nach Schickhofer [36].

- $a_{1,min} = 5 \cdot d = 40 \text{ mm}$
- $a_{2,min} = \text{keine zweite Schraubenreihe vorhanden}$
- $a_{3,min} = 5 \cdot d = 40 \text{ mm}$
- $a_{4,min} = 4 \cdot d = 32 \text{ mm}$

Die Mindestabstände für den Schraubendurchmesser 8 mm sind bei den Serien T-3 bis T-7 durchgehend eingehalten, lediglich bei den Serien T-1 und T-2 wird der Randabstand  $a_4$ , aufgrund der Breite des Steges von 40 mm, unterschritten.

### 2.3.2.3.2 Zusammenfassung der gewählten Verstärkungsmaßnahmen

In der nachfolgenden Tab. 2.15 sind für die einzelnen Serien die verwendete Schraubentypen, deren Anzahl, der Abstand der Schrauben untereinander sowie die Ausnutzungsgrade für die Krafteinleitungs- und für die Auflagerbereiche zusammengefasst. Die Berechnung erfolgte entsprechend dem Abschnitt 2.3.2.3.1.

| Serie     | Krafteinleitung      |        |               |                       |                         | Auflager             |        |               |                       |                         |
|-----------|----------------------|--------|---------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|--------|---------------|-----------------------|-------------------------|
|           | Verwendete Schrauben |        |               | Ausnutzungsgrad       |                         | Verwendete Schrauben |        |               | Ausnutzungsgrad       |                         |
|           | Schraubentypen       | Anzahl | Abstand $a_1$ | $F_{max}$ aus Vorbem. | $F_{max}$ aus Versuchen | Schraubentypen       | Anzahl | Abstand $a_1$ | $F_{max}$ aus Vorbem. | $F_{max}$ aus Versuchen |
|           | [-]                  | [Stk]  | [mm]          | [%]                   | [%]                     | [-]                  | [Stk]  | [mm]          | [%]                   | [%]                     |
| Serie T-1 | SCHMID 8,0 x 140     | 4      | 40            | 117%                  | <b>113%</b>             | SCHMID 8,0 x 140     | 2      | 40            | 73%                   | <b>70%</b>              |
| Serie T-2 | SCHMID 8,0 x 240     | 6      | 48            | 114%                  | <b>118%</b>             | SCHMID 8,0 x 240     | 2      | 70            | 75%                   | <b>77%</b>              |
| Serie T-3 | SCHMID 8,0 x 240     | 6      | 48            | 108%                  | <b>104%</b>             | SCHMID 8,0 x 240     | 3      | 48            | 72%                   | <b>70%</b>              |
| Serie T-4 | SCHMID 8,0 x 240     | 6      | 48            | 100%                  | <b>112%</b>             | SCHMID 8,0 x 240     | 3      | 48            | 67%                   | <b>75%</b>              |
| Serie T-5 | SCHMID 8,0 x 240     | 6      | 48            | 97%                   | <b>112%</b>             | SCHMID 8,0 x 240     | 3      | 48            | 65%                   | <b>75%</b>              |
| Serie T-6 | SCHMID 8,0 x 460     | 6      | 108           | 83%                   | <b>88%</b>              | SPAX 8,0 x 400       | 3      | 112           | 65%                   | <b>69%</b>              |
| Serie T-7 | SCHMID 8,0 x 200     | 5      | 48            | 98%                   | <b>107%</b>             | SCHMID 8,0 x 200     | 3      | 37            | 66%                   | <b>72%</b>              |

Tab. 2.15 Übersicht der Auflagerverstärkungen der einzelnen Serien mit den verwendeten Schrauben und dem Vergleich der Ausnutzung zufolge  $F_{max}$  aus der Vorbemessung und  $F_{max}$  aus den Prüfungen

Die Überschreitung der Auflagerverstärkung im Bereich der Krafteinleitungen war aufgrund der Länge der Krafteinleitungsplatte und der Tatsache, dass nur eine Schraubenreihe verwendet werden konnte, nicht vermeidbar. Da bei der Prüfdurchführung jedoch kaum Eindrückungen am Prüfträger und keine Verformungen (Ausknicken) der Schrauben beobachtet wurden, deutet dies darauf hin, dass der Nachweis der Querkraftverstärkung auf der sicheren Seite liegt.

## 2.4 Prüfdurchführung

Im nachfolgenden Abschnitt wird vertiefender auf die Prüfdurchführung und deren Konfigurationen eingegangen. Als Übersicht sind in Abb. 2.40 und Abb. 2.41 die Abmessungen der Prüfträger der einzelnen Serien dargestellt.

Geprüft wurden die Träger mittels einer 3-Punkt-Biegeprüfung mit einem, über die Trägerhöhe definierten Lasteinleitungs- und Auflagerbereich.

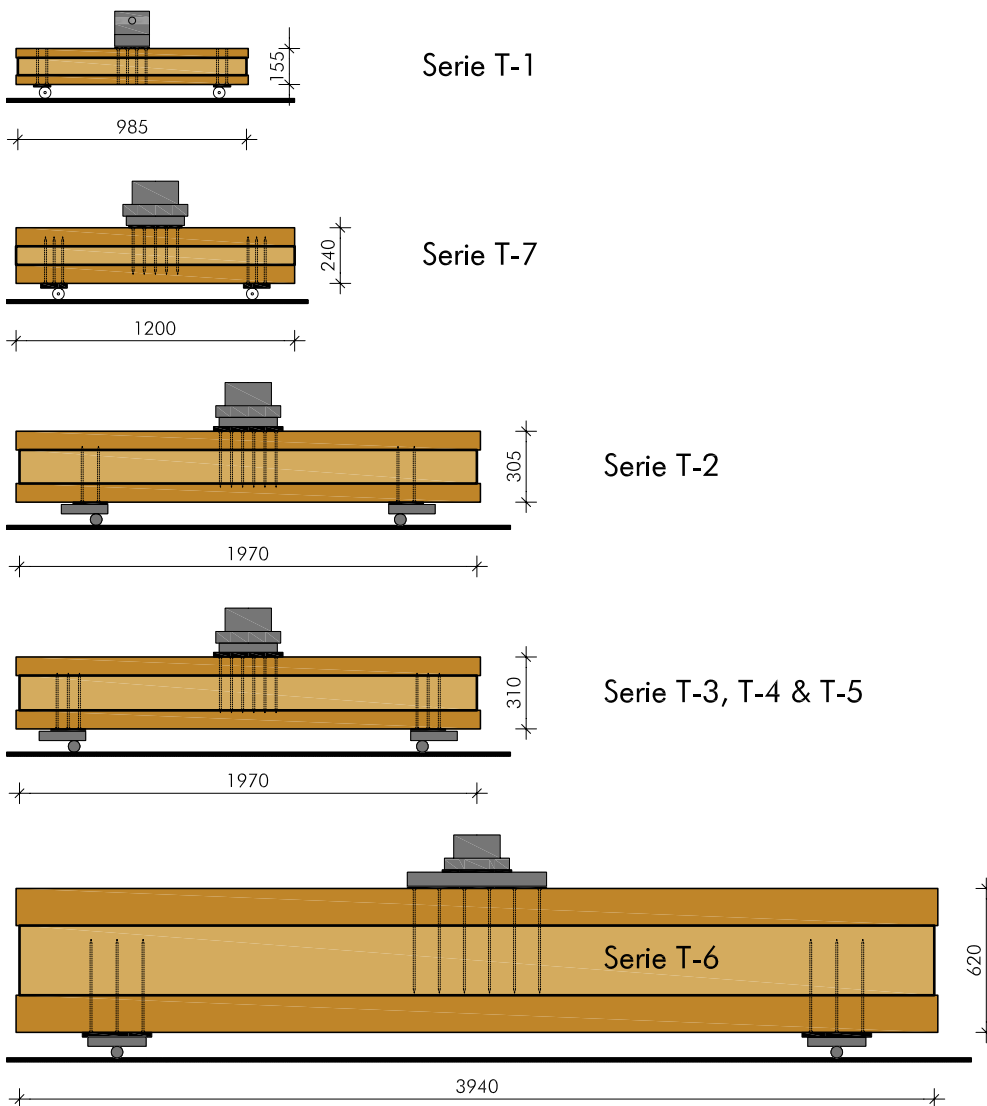


Abb. 2.40 Längsschnitte mit den Abmessungen der untersuchten Prüfträger



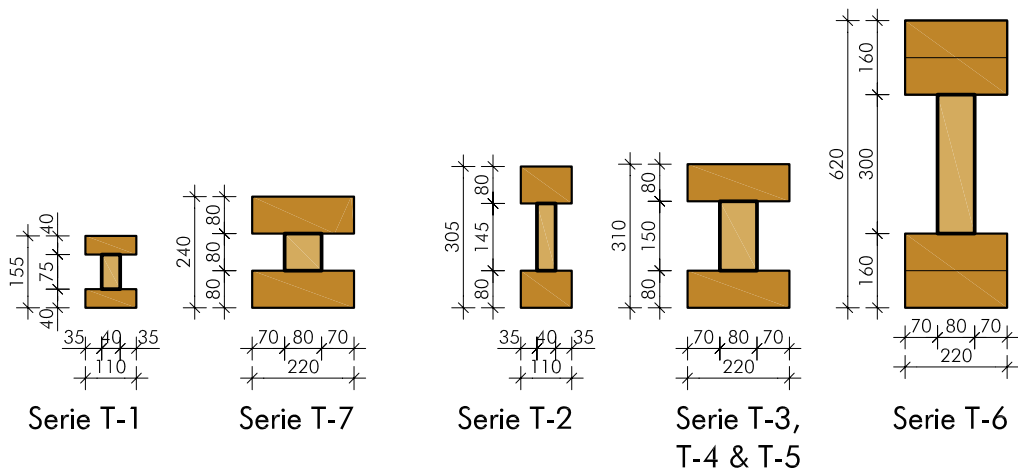


Abb. 2.41 Querschnitte mit den Abmessungen der untersuchten Prüfräger

## 2.4.1 Allgemeine Beschreibung zu den Prüfungen

Die Prüfkörper der Serien T-1 bis T-7 wie auch die 4-Punkt-Biegeprüfkörper der Serie T-8 wurden auf einer der beiden in Abschnitt 2.3.1.3 beschriebenen Universalprüfmaschinen geprüft. Durch ein Variieren der Prüfgeschwindigkeit (welche zwischen 1,8 und 3,6 mm/min, bei den Prüfserien T-1 bis T-7 lag) war eine möglichst gute Annäherung an die Sollprüfzeit von  $300 \pm 120$  Sekunden (in Annäherung an ON EN 408 [5]) möglich.

### 2.4.1.1 Bestimmung des Holzfeuchtegehalts

Da die Holzfeuchte starken Einfluss auf die Festigkeiten des Holzes besitzt, wurde im Anschluss an die Prüfungen von jedem Träger der Feuchtegehalt möglichst genau bestimmt.

Dies geschah für alle Schubprüfungen (außer Serie T-6) als auch für die 4-Punkt-Biegeprüfkörper der Serie T-8 entsprechend den Vorgaben der ON EN 13183-1 [11]. Dazu wird, mithilfe einer der in Abb. 2.20 dargestellten Sägen, eine mindestens 20 mm breite (in Faserlängsrichtung gemessen) „Darrprobe“ aus dem Versagensbereich des Prüfkörpers entnommen (siehe Abb. 2.42 links) und im direkten Anschluss an die Entnahme gewogen. Anschließend wird die „Darrprobe“ im Umlufttrockenschrank (siehe Abb. 2.42 rechts) bei einer Temperatur von  $103 (\pm 2) ^\circ\text{C}$  bis zur Massekonstanz getrocknet und im trockenen Zustand erneut gewogen. Aus den zwei ermittelten Massen wird nach der folgenden Glg. 2.37 der Feuchtegehalt der „Darrprobe“ bestimmt.

$$u = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100$$

2.37

- $m_1$  ... die Masse, in Gramm, des Prüfkörpers vor dem Trocknen;
- $m_0$  ... die Masse, in Gramm, des Prüfkörpers im darrtrockenen Zustand;
- $u$  ... der Feuchtegehalt in Prozent



Abb. 2.42 Herstellung der Darrprobe (links); Umlufttrockenschrank mit Darrproben (rechts)

Für die Serie T-6 wurden, da dies aufgrund der Trägerabmessungen nur sehr schwer möglich gewesen wäre, keine Darrproben aus den Prüfträgern entnommen. Um den Feuchtegehalt der Prüfkörper dennoch möglichst genau zu bestimmen, wurde mithilfe des elektronischen Holzfeuchtemessgerätes (siehe Abb. 2.24) der Feuchtegehalt über den Mittelwert aus drei Messungen, welche im Bereich des Bruches durchgeführt wurden, ermittelt.

Im Anschluss an die Prüfdurchführung wurden alle Prüfkörper bis zu deren Auswertung zwischengelagert, um diese für den Fall, dass Unklarheiten bei der Auswertung auftreten, nochmals genauer untersuchen zu können.

## 2.4.2 Serie T-1

Für die Serie T-1 wurden 40 Prüfräger entsprechend der in Abb. 2.43 dargestellten Prüfgeometrie gefertigt und mit der Universalprüfmaschine lignum\_uni\_275 (siehe Abb. 2.44) geprüft.

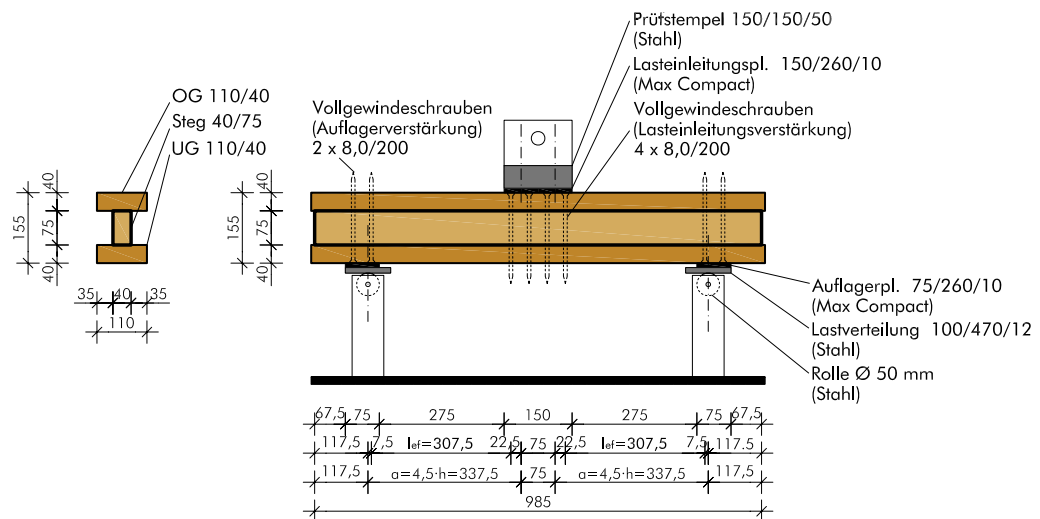


Abb. 2.43 Abmessungen sowie ausgeführte Verstärkungen der Serie T-1

### Allgemeine Anmerkungen zur Prüfungsdurchführung

Die Prüfgeschwindigkeit wurde mit 1,8 mm/min festgelegt, was der gewünschten Prüfzeit von  $300 \pm 120$  Sekunden entsprach. Die Auswertung und grafische Darstellung erfolgte mithilfe des PC-Programms CatmanEasy-AP.



Abb. 2.44 Schubversagen im Steg Serie T1\_18

### 2.4.3 Serie T-2

Für die Serie T-2 wurden 34 Prüfräger entsprechend der in Abb. 2.45 dargestellten Prüfgeometrie gefertigt und mit der Universalprüfmaschine BETA\_1000 des LKI (siehe Abb. 2.46) geprüft.

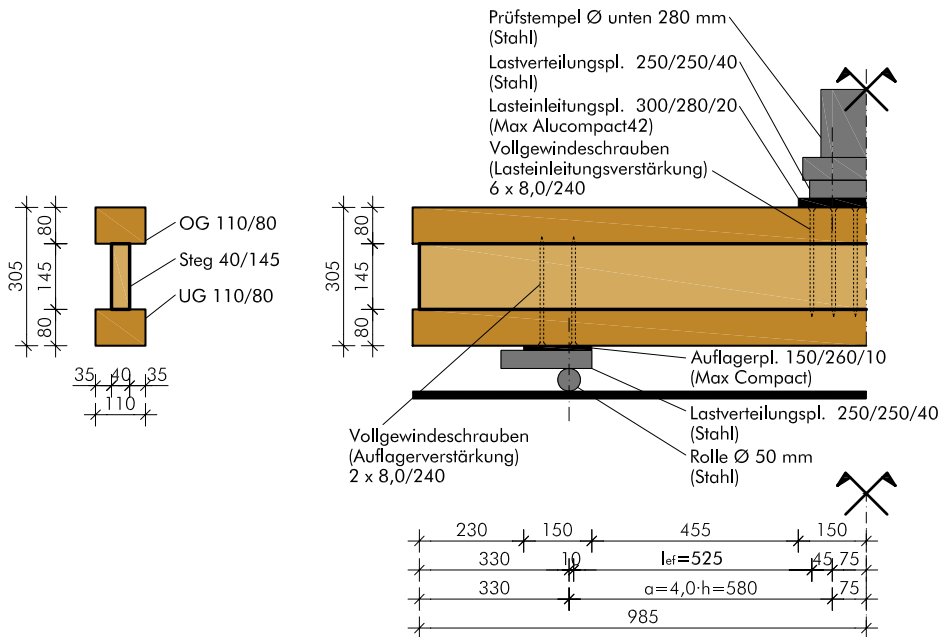


Abb. 2.45 Abmessungen sowie ausgeführte Verstärkungen der Serie T-2

#### Allgemeine Anmerkungen zur Prüfungsdurchführung

Die Prüfgeschwindigkeit wurde zu Beginn der Prüfung mit 2,0 mm/min festgelegt und nach den ersten Prüfungen auf 2,2 mm/min erhöht. Dies ermöglichte die Einhaltung der gewünschten Prüfzeit von  $300 \pm 120$  Sekunden.



Abb. 2.46 Schubversagen im Steg Serie T2\_06

## 2.4.4 Serie T-3

Für die Serie T-3 wurden 11 Prüfräger entsprechend der in Abb. 2.47 dargestellten Prüfgeometrie gefertigt und mit der Universalprüfmaschine BETA\_1000 des LKI (siehe Abb. 2.48) geprüft.

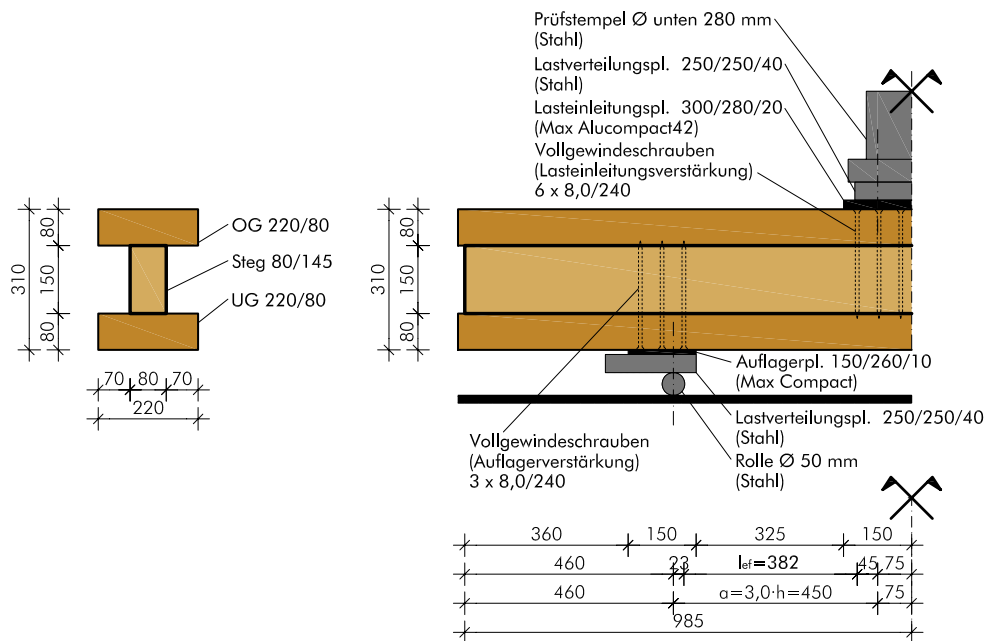


Abb. 2.47 Abmessungen sowie ausgeführte Verstärkungen der Serie T-3

### Allgemeine Anmerkungen zur Prüfungsdurchführung

Die Prüfgeschwindigkeit wurde zu Beginn der Prüfung mit 2,0 mm/min festgelegt und nach den ersten Prüfungen auf 1,8 mm/min verringert. Dies ermöglichte die Einhaltung der gewünschten Prüfzeit von  $300 \pm 120$  Sekunden.



Abb. 2.48 Schubversagen im Steg Serie T3\_02

### 2.4.5 Serie T-4

Für die Serie T-4 wurden 40 Prüfträger entsprechend der in Abb. 2.49 dargestellten Prüfgeometrie gefertigt und mit der Universalprüfmaschine BETA\_1000 des LKI (siehe Abb. 2.50) geprüft.

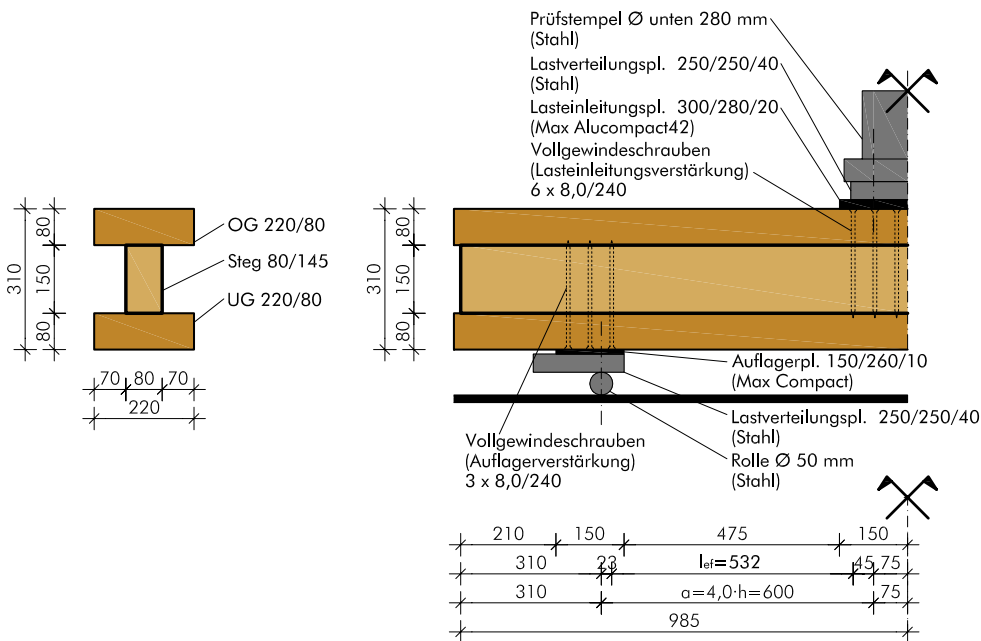


Abb. 2.49 Abmessungen sowie ausgeführte Verstärkungen der Serie T-4

#### Allgemeine Anmerkungen zur Prüfungsdurchführung

Die Prüfgeschwindigkeit wurde zu Beginn mit 2,0 mm/min festgelegt, jedoch im Verlauf der Prüfung auf 2,4 mm/min erhöht. Dies ermöglichte die Einhaltung der gewünschten Prüfzeit von  $300 \pm 120$  Sekunden.



Abb. 2.50 Schubversagen im Steg Serie T4\_29



## 2.4.6 Serie T-5

Für die Serie T-5 wurden 40 Prüfräger entsprechend der in Abb. 2.51 dargestellten Prüfgeometrie gefertigt und mit der Universalprüfmaschine BETA\_1000 des LKI (siehe Abb. 2.52) geprüft.

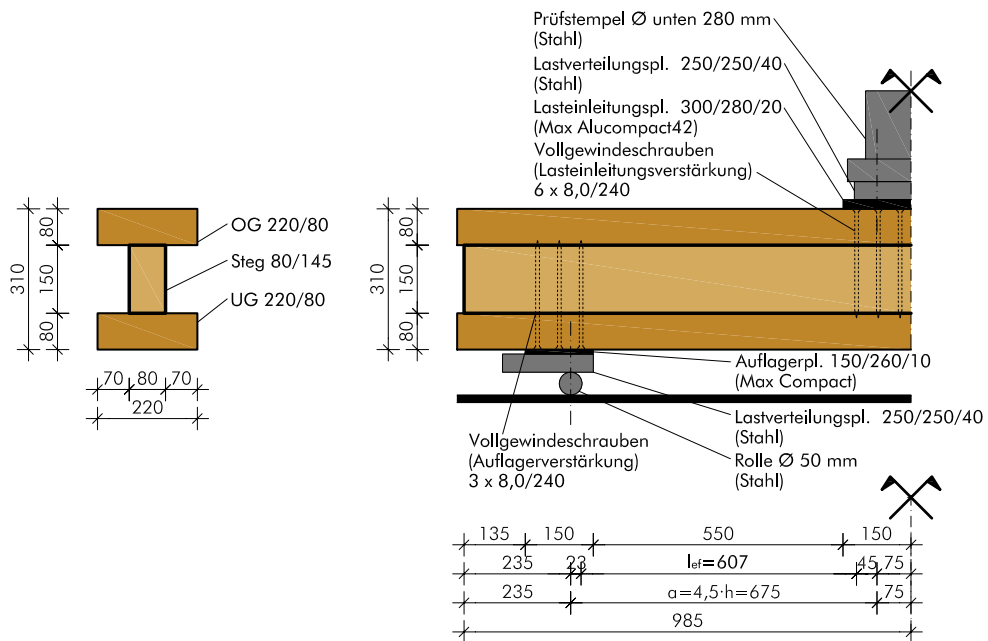


Abb. 2.51 Abmessungen sowie ausgeführte Verstärkungen der Serie T-5

### Allgemeine Anmerkungen zur Prüfungsdurchführung

Die Prüfgeschwindigkeit wurde zu Beginn mit 2,4 mm/min festgelegt, jedoch im Verlauf der Prüfung auf 2,6 mm/min erhöht. Dies ermöglichte die Einhaltung der gewünschten Prüfzeit von  $300 \pm 120$  Sekunden.



Abb. 2.52 Schubversagen im Steg Serie T5\_36

### 2.4.7 Serie T-6

Für die Serie T-6 wurden 20 Prüfträger entsprechend der in Abb. 2.53 dargestellten Prüfgeometrie gefertigt und mit der Universalprüfmaschine BETA\_1000 des LKI (siehe Abb. 2.54) geprüft. Mittels der Wegaufnehmer DD1 (siehe Abb. 2.30) war es zusätzlich möglich den Schubmodul, wie unter Abschnitt 2.4.7.1 beschrieben, zu bestimmen.

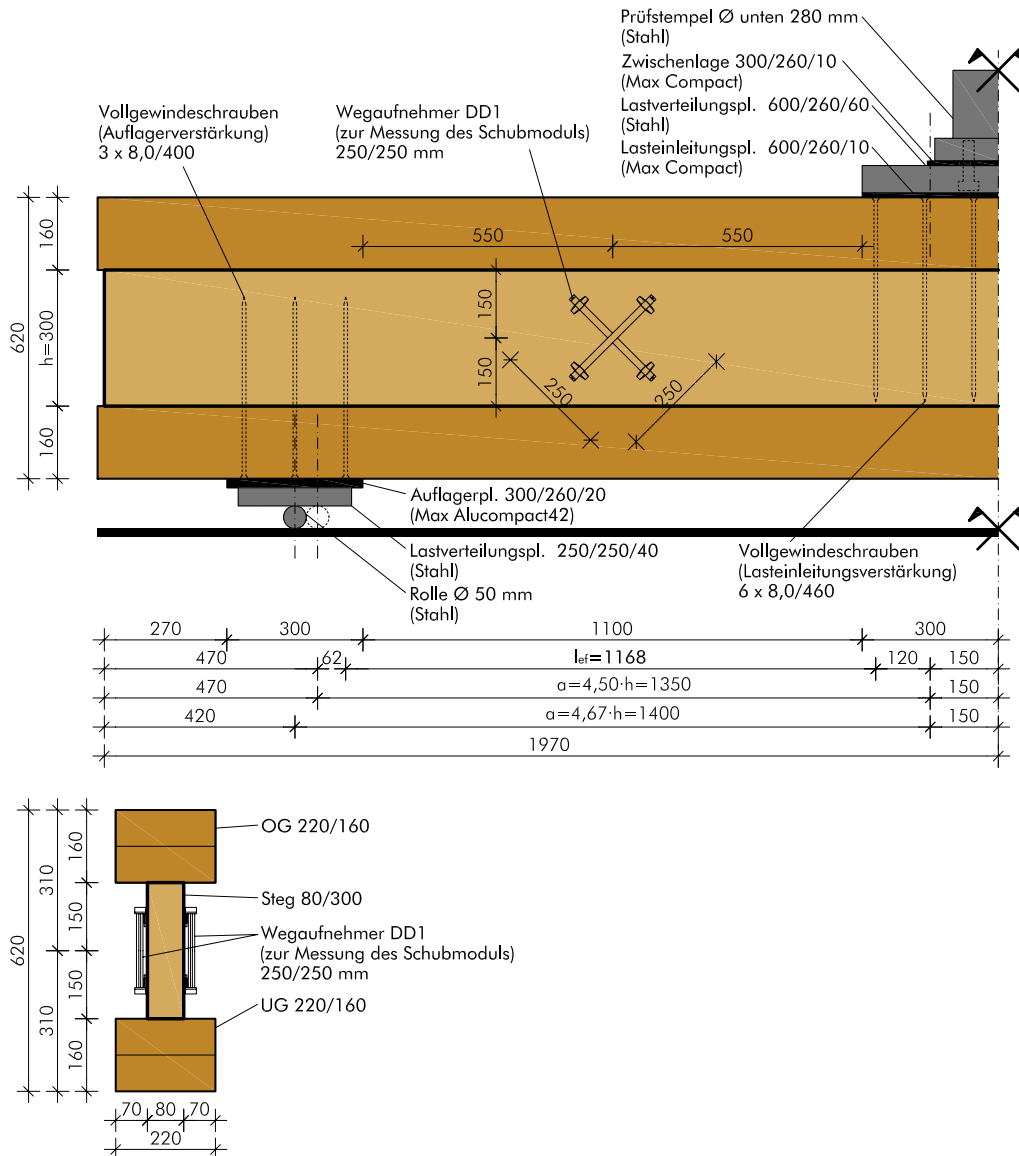


Abb. 2.53 Abmessungen sowie ausgeführte Verstärkungen der Serie T-6

#### Allgemeine Anmerkungen zur Prüfungsdurchführung

Die Prüfgeschwindigkeit wurde zu Beginn mit 3,0 mm/min festgelegt, jedoch im Verlauf der Prüfung auf 3,5 mm/min erhöht. Dies ermöglichte die Einhaltung der gewünschten Prüfzeit von  $300 \pm 120$  Sekunden.



### 2.4.7.1 Bestimmung des Schubmoduls

An 10 der insgesamt 20 Träger der Serie T-6 wurde mithilfe von DD1-Wegaufnehmern (siehe Abb. 2.30) der Schubmodul bestimmt.

Dazu sind in der Mitte des Schubereiches (wie in Abb. 2.53, Abb. 2.54 und Abb. 2.55 dargestellt) vier Kreuze mit je zwei DD1-Wegaufnehmern, welche eine Messgenauigkeit von 1/1000 mm besitzen, angebracht worden. Die Diagonallänge der Messbasen inklusive der Wegaufnehmer betrug 250 mm.



Abb. 2.54 Darstellung eines Prüfkörpers der Serie T-6 mit in den Schubfeldern angebrachten DD1-Wegaufnehmern

Mithilfe der unten angeführten Formeln nach Brandner [22], welche für den I-Querschnitt der Prüfträger abgeändert wurden, konnten die Schubmodule auf Basis der ermittelten Schubverzerrungen berechnet werden.

Zu Beginn erfolgt die Ermittlung des Faktors  $\alpha$ , welcher ein einfaches Verhältnis aus der Schubspannungsverteilung über die gesamte Trägerhöhe  $\tau_{\text{mean,I-beam}}$  zur Schubspannungsverteilung im Schubfeld  $\tau_{\text{mean,SF}}$ , wie in Abb. 2.55 dargestellt, beschreibt.

$$\alpha = \frac{\tau_{\text{mean,SF}}}{\tau_{\text{mean,I-beam}}} \quad 2.38$$

$$\alpha = \frac{(4 \cdot b \cdot a^2 - 4 \cdot b \cdot h \cdot a + h^2 \cdot b + 12 \cdot B \cdot H^2 + 12 \cdot B \cdot h \cdot H) \cdot (h + 2 \cdot H)}{2 \cdot (8 \cdot b \cdot H^3 + 6 \cdot b \cdot H^2 \cdot h + b \cdot h^3 + 6 \cdot B \cdot h \cdot H^2 + 6 \cdot B \cdot h^2 \cdot H)} \quad 2.39$$

$\tau_{\text{mean,I-beam}}$  entspricht der gemittelten Schubspannungsverteilung über die gesamte Trägerhöhe.

$$\tau_{\text{mean,I-beam}} = \frac{Q \cdot (8 \cdot b \cdot H^3 + 6 \cdot b \cdot H^2 \cdot h + b \cdot h^3 + 6 \cdot B \cdot H^2 \cdot h + 6 \cdot B \cdot H \cdot h^2)}{(b \cdot h^3 + 8 \cdot B \cdot H^3 + 12 \cdot B \cdot H^2 \cdot h + 6 \cdot B \cdot H \cdot h^2) \cdot b \cdot (2 \cdot H + h)} \quad 2.40$$

Die Querkraftsdifferenz  $\Delta Q$  im Prüfbereich entspricht der halben Last, welche mittig in den Träger eingeleitet wird.

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = \frac{F_2 - F_1}{2} \quad 2.41$$

Die mittlere Schubverzerrung  $\gamma$  wird folgendermaßen über die gemessenen Verformungen der DD1-Wegaufnehmer in den einzelnen Schubfeldern (in den Grenzen der Querkraftsdifferenz  $\Delta Q$ ) ermittelt:

$$\gamma = \frac{dL}{L} = \frac{|dL1| + |dL2|}{L} \quad 2.42$$

Der Schubmodul  $G_{090,SF}$  für das untersuchte Schubfeld ergibt sich zu:

$$G_{090,SF} = \alpha \cdot \frac{\tau_{\text{mean,I-beam}}}{\gamma} \quad 2.43$$

Anhand der Abmessungen des Referenzträgers (siehe Abb. 2.53) und den ermittelten Verformungen durch die DD1-Wegaufnehmer beim Träger T6\_20 Seite 1\_V wird der oben angeführte Rechenablauf nachvollzogen.

Abmessungen des Referenzträgers entsprechend Abb. 2.53 und Abb. 2.55:

|       |            |       |          |
|-------|------------|-------|----------|
| B ... | 220,0 [mm] | H ... | 160 [mm] |
| b ... | 80,0 [mm]  | h ... | 300 [mm] |
| a ... | 61,6 [mm]  |       |          |

Länge der Messbasis mit den DD1-Wegaufnehmern:

|       |          |
|-------|----------|
| L ... | 250 [mm] |
|-------|----------|

Querkraft Step 1 und 2 und die dazugehörigen Schubverzerrungen in den Diagonalen (T6\_20 Seite 1\_V):

| Step | F [N]  | dL [mm] |
|------|--------|---------|
| 1    | 40000  | 0,4516  |
| 2    | 145000 | -0,1568 |

Tab. 2.16 Step 1 und 2 der Querkräfte mit dazugehörigen Schubverzerrungen

$$\alpha = \frac{(4 \cdot 80 \cdot 61,6^2 - 4 \cdot 80 \cdot 300 \cdot 61,6 + 300^2 \cdot 80 + 12 \cdot 220 \cdot 160^2 + 12 \cdot 220 \cdot 300 \cdot 160)}{2 \cdot (8 \cdot 80 \cdot 160^3 + 6 \cdot 80 \cdot 160^2 \cdot 300 + 80 \cdot 300^3 + 6 \cdot 220 \cdot 300 \cdot 160^2 + 6 \cdot 220 \cdot 300^2 \cdot 160)} \cdot \left( \frac{300 + 2 \cdot 160}{1} \right) = 1,622 [-]$$

$$\Delta Q = \frac{145000 - 40000}{2} = 52500 \text{ [N]}$$

$$\tau_{\text{mean, I-beam}} = \frac{(8 \cdot 80 \cdot 160^3 + 6 \cdot 80 \cdot 160^2 \cdot 300 + 80 \cdot 300^3 + 6 \cdot 220 \cdot 160^2 \cdot 300 + 6 \cdot 220 \cdot 160 \cdot 300^2)}{(80 \cdot 300^3 + 8 \cdot 220 \cdot 160^3 + 12 \cdot 220 \cdot 160^2 \cdot 300 + 6 \cdot 220 \cdot 160 \cdot 300^2)} \cdot \left( \frac{52500}{2 \cdot 160 + 300} \right) = 0,8183 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\gamma = \frac{|0,4516| + |0,1568|}{250} = 0,002434 \text{ [-]}$$

$$G_{090, \text{SF}, \text{S1}_V} = 1,622 \cdot \frac{0,8183}{0,002434} = 545 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

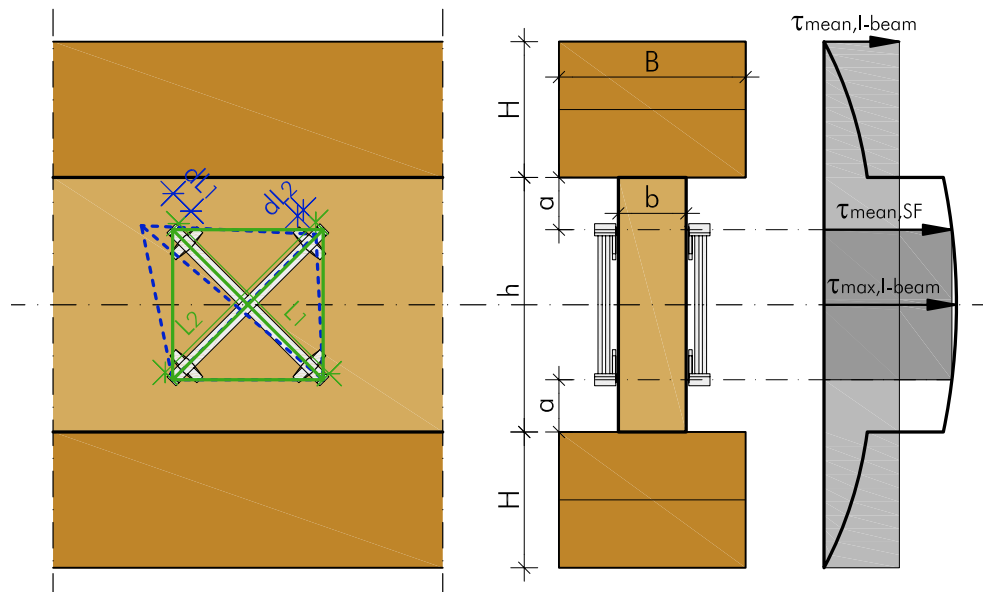


Abb. 2.55 Ermittlung des Schubmoduls der Serie T-6 mithilfe von DD1-Wegaufnehmern; links: Ansicht Prüfträger mit der Darstellung der Verschiebung der DD1; mitte: Prüfquerschnitt; rechts: Schubspannungsverteilung am Prüfquerschnitt

Aus den vier ermittelten Schubmodulen ( $G_{090, \text{SF}, \text{S1}_V}$ ,  $G_{090, \text{SF}, \text{S1}_H}$ ,  $G_{090, \text{SF}, \text{S2}_V}$  und  $G_{090, \text{SF}, \text{S2}_H}$ ) je Prüfträger wurde der Mittelwert ( $G_{090, \text{SF}}$ ) gebildet. Dessen lt. Glg. 2.47 auf 12% Holzfeuchte korrigierter Wert ( $G_{090, 12, \text{SF}}$ ) wird im Kapitel 3 (Ergebnisse) sowie im Kapitel 4 (Diskussion), verwendet.

### 2.4.8 Serie T-7

Für die Serie T-7 wurden 36 Prüfträger entsprechend der in Abb. 2.56 dargestellten Prüfgeometrie gefertigt, wobei der Prüfquerschnitt (Steg) mit liegenden Jahrringen eingebaut wurde. Die Prüfungen erfolgten sowohl auf der Universalprüfmaschine BETA\_1000 des LKI (siehe Abb. 2.27) als auch auf der Universalprüfmaschine lignum\_uni\_275 (siehe Abb. 2.28).

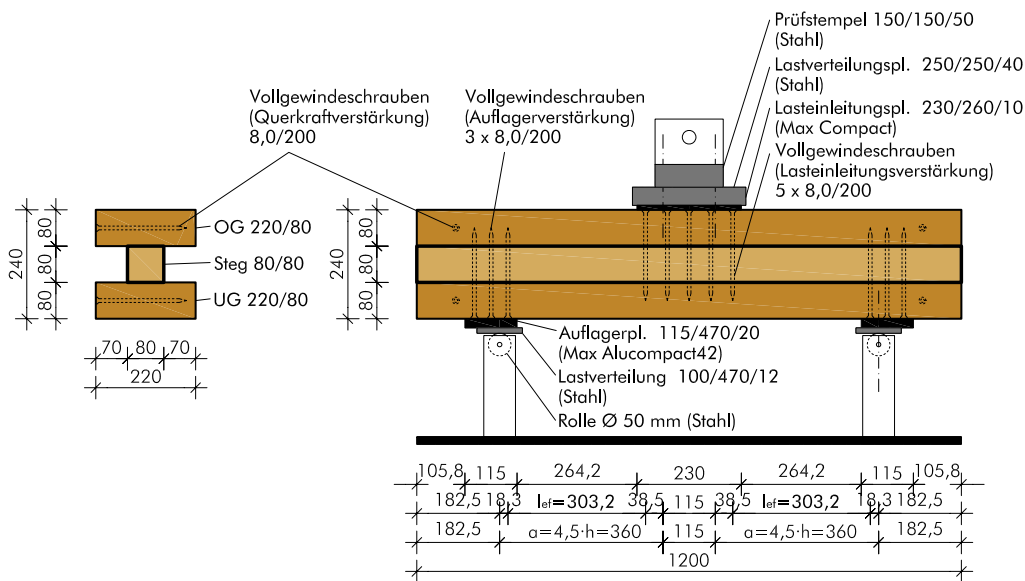


Abb. 2.56 Abmessungen sowie ausgeführte Verstärkungen der Serie T-7

#### Allgemeine Anmerkungen zur Prüfdurchführung

Die Prüfgeschwindigkeit wurde mit 1,8 mm/min festgelegt, was der gewünschte Prüfzeit von  $300 \pm 120$  Sekunden entsprach. Aufgrund des häufigen Auftretens von Längsbrüchen (Aufspalten) des Ober- und Untergurt wurden diese nach 19 Prüfungen mittels Vollgewindeschrauben verstärkt.



Abb. 2.57 Schubversagen im Steg Serie T7\_05

## 2.4.9 Serie T-8 (4-Punkt-Biegeprüfungen)

50 Prüfkörper wurden entsprechend der ON EN 408 [5] einer 4-Punkt-Biegeprüfung unterzogen und entsprechend der Prüfgeometrie lt. Abb. 2.16 geprüft. Über die ermittelten Verformungen, welche mithilfe der angebrachten Wegaufnehmer gemessen wurden, konnten im Anschluss an die Prüfdurchführung der lokale und globale Elastizitätsmodul entsprechend den Vorgaben und Formeln der ON EN 408 [5] Kapitel 9 ermittelt werden.

Als Prüfmaschine kam die Universalprüfmaschine lignum\_uni\_275 (siehe Abb. 2.28) mit dem dazugehörigen Prüfgerüst für 4-Punkt-Biegeprüfungen (siehe Abb. 2.29) zur Anwendung.

### Allgemeine Erkenntnisse und Anmerkungen

Die Prüfgeschwindigkeit wurde zu Beginn mit 18,0 mm/min festgelegt, jedoch im Verlauf der Prüfdurchführung auf 10,8 mm/min und kurz darauf auf 7,2 mm/min verringert. Dies ermöglichte die Einhaltung der gewünschten Prüfzeit von  $300 \pm 120$  Sekunden.



Abb. 2.58 Biegeversagen im Bereich des maximalen Momentes; Serie T8\_12

## 2.5 Übersicht der Bezeichnungen und verwendeten Formeln sowie notwendige Anpassungen für die Prüfergebnisse

Nachfolgend sind die Bezeichnungen für die in den folgenden Kapiteln verwendeten Prüfergebnisse bzw. Auswertungen dargestellt. Zusätzlich erfolgt eine Erläuterung wie die notwendigen Korrekturen aufgrund des Holzfeuchteinflusses und der Abweichungen zwischen Stab- und Scheibentheorie berücksichtigt wurden.

### 2.5.1 Bezeichnungen der verwendete Formeln

Zur Ermittlung der in Folge der Prüfdurchführung und Prüfauswertung wichtigen Kennwerte wurden größtenteils die in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Formeln verwendet. Die ermittelten Kennwerte und eventuelle Abweichungen zu den Formeln im Abschnitt 2.2.1 sind nachfolgend beschrieben:

|                       |   |
|-----------------------|---|
| $E_{\text{dyn},0,12}$ | dynamischer E-Modul lt. Abschnitt 2.1.3 bzw. [15] auf 12% Holzfeuchte korrigiert;   |
| $\rho_{12}$           | Rohdichte des Prüfquerschnittes (Steg) lt. Glg. 2.45 auf 12% Holzfeuchte korrigiert;  |
| $h_{\text{Pr-QS}}$    | Höhe des Prüfquerschnitts entsprechend Abb. 2.7;  |
| $b_{\text{Pr-QS}}$    | Breite des Prüfquerschnitts entsprechend Abb. 2.7;  |
| $A_{\text{Pr-QS}}$    | Fläche des Prüfquerschnitts entsprechend Abb. 2.7<br>$A_{\text{Pr-QS}} = h_{\text{Pr-QS}} \cdot b_{\text{Pr-QS}} \text{ [mm}^2\text{]};$            |
| $l_{\text{ef}}$       | Länge der schubbeanspruchten Fläche entsprechend den Abb. 2.43, Abb. 2.45, Abb. 2.47, Abb. 2.49, Abb. 2.51, Abb. 2.53 und Abb. 2.56;                |
| $A_S$                 | schubbeanspruchte Fläche entsprechend Glg. 2.2;   |
| $V_S$                 | schubbeanspruchtes Volumen $V_S = A_S \cdot h_{\text{Pr-QS}} \text{ [mm}^3\text{]};$  |
| $u$                   | Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Prüfdurchführung lt. Glg. 2.37;   |
| $z_S$                 | Schwerpunktastand lt. Abb. 2.8 und Glg. 2.11;   |
| $e_{\text{Br}}$       | Abstand des Schubbruches zur Schwerachse S (siehe Abb. 2.8) mit $e_{\text{Br}} < 0$ (Bruch unterhalb S) und $e_{\text{Br}} > 0$ (Bruch oberhalb S); |
| $J_{\text{ef}}$       | effektives Trägheitsmoment, ermittelt lt. Glg. 2.13;  |
| $S_{\text{ef,e}}$     | effektives statisches Moment, welches bezüglich des Versagensortes $e_{\text{Br}}$ und entsprechend Glg. 2.14 ermittelt wurde;                      |
| $F$                   | Prüfkraft entsprechend dem Ausgabeprotokoll der Prüfmaschine;   |
| $V$                   | Querkraft ( $V = F/2 \text{ [kN]}$ ) welche auf die Scherfläche einwirkt;   |
| $M$                   | Biegemoment zufolge der Prüfkraft $F$ ;   |
| $\sigma_i$            | Normalspannung innerhalb der Querschnittes lt. Glg. 2.15 und  |
| $\tau_i$              | Schubspannung am Ort des Versagens $e_{\text{Br}}$ lt. Glg. 2.16.   |

## 2.5.2 Anpassung der Prüfergebnisse an die Referenzholzfeuchte von 12%

Entsprechend der ON EN 408 [5] sind alle Prüfungen an Prüfkörpern, die im Normklima bei  $(20 \pm 2)$  °C und  $(65 \pm 5)\%$  relativer Luftfeuchte klimatisiert wurden, durchzuführen. Für die meisten Nadelhölzer, wie auch Fichte, entspricht diese Klimatisierung einer Referenzholzfeuchte von 12%.

Nach der ON EN 384 [4] sind für den Fall, dass die Proben nicht die Referenzholzfeuchte von 12% aufweisen, jedoch zwischen 8% und 18% liegen, die Prüfwerte wie nachfolgend beschrieben, auf 12% umzurechnen:

- Für die Biege- und die Zugfestigkeit sind entsprechend ON EN 384 [4] keine Umrechnungen erforderlich.
- Für den Elastizitätsmodul ist eine Änderung um 2% je Prozentpunkt Holzfeuchteunterschied entsprechend ON EN 384 [4] erforderlich, siehe Glg. 2.44.

$$E_{12} = [((u - 12) \cdot 0,02) + 1] \cdot E_u \quad 2.44$$

- Die Rohdichte ist, entsprechend ON EN 384 [4], falls diese bei einer höheren Holzfeuchte als 12% ermittelt wurde, je Prozentpunkt Holzfeuchte um 0,5% zu erhöhen und bei einer geringeren Holzfeuchte als 12%, um 0,5% je Prozentpunkt Holzfeuchteunterschied zu verringern, siehe Glg. 2.45.

$$\rho_{12} = [((12 - u) \cdot 0,005) + 1] \cdot \rho_u \quad 2.45$$

- Die verwendeten dynamischen E-Module wurden von Lackner [15] ermittelt und auf die geforderten 12% Holzfeuchte korrigiert.
- Die ermittelten Schubspannungen  $\tau$  sowie Schubfestigkeiten  $f_v$  sind entsprechend den Literaturrecherchen von Lackner [15] um 3% je Prozentpunkt Holzfeuchteunterschied umzurechnen, siehe Glg. 2.46.

$$\tau_{12} = [((12 - u) \cdot 0,03) + 1] \cdot \tau_u \quad 2.46$$

- Für den Schubmodul wurde eine Änderung um 2% je Prozentpunkt Holzfeuchteunterschied entsprechend den Angaben für die Anpassung des Elastizitätsmoduls in der ON EN 384 [4] angenommen, siehe Glg. 2.47.

$$G_{12} = [((u - 12) \cdot 0,02) + 1] \cdot G_u \quad 2.47$$

Bei der Ermittlung der Prüfergebnisse kamen die hier dargestellten Umrechnungen zur Anwendung. Die auf 12% Holzfeuchte korrigierten Daten sind in den nachfolgenden Kapiteln mit dem Index **12** gekennzeichnet.

### 2.5.3 Abweichungen zwischen Stab- und Scheibentheorie

Wie bei Gattermig [25] beschrieben, unterliegen die nach Stabtheorie („Starrer Verbund“ lt. Theiler und Frangi [38]) ermittelten Prüfergebnisse einem Fehler aufgrund des geringen L/h-Verhältnisses.

Diesbezüglich wurde in [25] eine Finite-Elemente-Studie durchgeführt, mittels welcher eine Abschätzung des erwartbaren Fehlers nach Stabtheorie möglich ist. Daraus war erkennbar, dass die, für die Stabtheorie verwendeten Gleichungen zur Ermittlung der Schubfestigkeit grundsätzlich erst ab einem L/h-Verhältnis von rund 10 zu befriedigenden Ergebnissen (geringen Abweichungen zwischen Stab- und Scheibentheorie) führen.

Für die Diskussion in Kapitel 4 wurden bei einem Teil der Prüfergebnisse zusätzlich die korrigierten Daten, wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben, mitberücksichtigt, um eine bessere Abschätzung über die tatsächlich einsetzbaren Schubfestigkeiten zu erhalten.



## 3 Ergebnisse



In diesem Kapitel sind die Prüfergebnisse der einzelnen Serien übersichtsmäßig dargestellt. Hierfür erfolgt eine tabellarische Auflistung der physikalischen und mechanischen Kenngrößen sowie eine grafische Darstellung der Verteilung der Versagensursachen sowie der empirischen Häufigkeitsverteilung der untersuchten Kenngrößen.

## 3.1 Übersicht

### 3.1.1 Bezeichnungsbeschreibung der Ergebnisübersichten

Zum besseren Verständnis folgt eine kurze Übersicht über die Abkürzungen, welche in diesem Kapitel verwendet wurden.

- Auflistung der Abkürzungen der Versagensorte (OG, UG, ST oder UB), welche bei den Prüfungen auftraten, gemeinsam mit den zugewiesenen kausalen Beanspruchungsarten (Schub- bzw. Biegezugversagen):

|             |  |
|-------------|--|
| <b>S_OG</b> | Schubversagen im Obergurt;   |
| <b>S_UG</b> | Schubversagen im Untergurt;  |
| <b>S_UB</b> | Schubversagen im Übergangsbereich zwischen Gurt und Steg;  |
| <b>S_ST</b> | Schubversagen im Steg (Prüfquerschnitt);   |
| <b>S_VS</b> | Schubversagen im Steg (Prüfquerschnitt) durch eine vorhandene Vorschädigung (Trockenrisse, Rindeneinschluss etc.); |
| <b>B_UG</b> | Biegezugversagen Untergurt;  |
| <b>B_ST</b> | Biegezugversagen Steg;   |
| <b>SONS</b> | sonstige Versagen.   |

Ergänzend zur Versagensart „S\_UB“ ist zu erwähnen, dass hier kein Klebstoffversagen festgestellt werden konnte. Dies wurde durch eine sorgfältige Herstellung der Prüfträger sowie der Einhaltung der Herstellerangaben entsprechend den Datenblättern [39] und [40] sichergestellt.

- Bezeichnungen in den Übersichtstabellen über die physikalischen und mechanischen Kenngrößen:

Als 1. Teilversagen ( $T_v$ ) bei der Prüfdurchführung wurde jener Wert herangezogen, bei dem der erste markante Lastabfall im Kraft-Weg-Diagramm festgestellt wurde. Das 2.  $T_v$  bzw. 3.  $T_v$  wurde im Fall einer weiteren Laststeigerung über jene Last des 1.  $T_v$  hinaus mitberücksichtigt.

Entsprechend der ON EN 384 [4] sind die Prüfergebnisse auf 12% Holzfeuchte zu korrigieren. Die Vorgehensweise und die Formeln sind im Abschnitt 2.5.2 genauer beschrieben.

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| <b>u</b>                           | Holzfeuchtegehalt zum Zeitpunkt der Prüfdurchführung;   |
| <b><math>A_{Pr-QS}</math></b>      | Querschnittsfläche des Prüfkörpers (Steg);  |
| <b><math>\rho_{12}</math></b>      | Rohdichte auf 12% Holzfeuchte korrigiert (siehe Glg. 2.45);   |
| <b><math>E_{t,0,12,est}</math></b> | statischer E-Modul, welcher Mithilfe der Glg. 2.1 aus dem auf 12% Holzfeuchte korrigierten dynamischen E-Modul abgeschätzt wurde; |

|                 |   |
|-----------------|---|
| $G_{090,12,SF}$ | Schubmodul, entsprechend Abschnitt 2.4.7.1 in den Schubfeldern (SF) der Serie T-6 ermittelt und gemäß Glg. 2.47 auf 12% Holzf. korr.; |
| $\tau_{1,12}$   | Schubspannung zum Zeitpunkt des 1. Teilversagen lt. Glg. 2.46 auf 12% Holzf. korr.;   |
| $\tau_{2,12}$   | Schubspannung zum Zeitpunkt des 2. Teilversagen lt. Glg. 2.46 auf 12% Holzf. korr.;   |
| $\tau_{3,12}$   | Schubspannung zum Zeitpunkt des 3. Teilversagen lt. Glg. 2.46 auf 12% Holzf. korr.;   |
| $f_{v,1,12}$    | Schubfestigkeit jener Prüfkörper, welche auf Schub im Steg (S_ST) versagten, lt. Glg. 2.46 auf 12% Holzf. korr..                      |

**Anzahl** Anzahl der für die jeweiligen Kenngrößen berücksichtigten Prüfkörper;

**Min** minimaler Wert aus den empirischen Daten;

**MW** Mittelwert aus den empirischen Daten;

**median** 50%-Quantilwert, geschätzt aus den empirischen Daten;

**Max** maximaler Wert aus den empirischen Daten;

**COV** Variationskoeffizient der empirischen Daten;

$X_{05,empD}$  5%-Quantilwert der empirischen Daten;

$X_{05,DM}$  5%-Quantilwert, der unter den untersuchten Modellen repräsentativsten Verteilungsfunktion („distribution modell“ DM);

$X_{50,DM}$  50%-Quantilwert, der unter den untersuchten Modellen repräsentativsten Verteilungsfunktion („distribution modell“ DM);

$X_{k,EN 14358}$  charakteristischer Wert des 5%-Quantils lt. ON EN 14358 [12] (bezogen auf die untere Konfidenzgrenze von  $(1-\alpha)=75\%$ ).

- Beschreibung der Abkürzungen der verwendeten Verteilungsmodelle („distribution modell“ DM):

**empD** empirische Häufigkeitsverteilung, welche mittels der Glg. 3.1 ermittelt wurde; die darin enthaltenen Stetigkeitskorrekturen werden bevorzugt für die Anpassung an eine Weibullverteilung verwendet; N entspricht der Anzahl der untersuchten Prüfungen und i dem Rang der Einzelprüfung ( $x_{(i)}$ , mit  $x_{(1)} = \min[x_{(i)}]$ ,  $x_{(N)} = \max[x_{(i)}]$ );

$$\text{empD} = \frac{i - 0,3}{N + 0,4} \quad \text{mit } i = 1, 2, \dots, N \quad 3.1$$

**ND** Normalverteilung;

**2pLND** zwei-parametrische Lognormalverteilung;

**2pWB** zwei-parametrische Weibullverteilung.

Die Festlegung, eines dieser theoretischen Verteilungsmodelle als repräsentativ für die jeweils untersuchten Kenngrößen der einzelnen Serien, erfolgte primär nach qualitativen Gesichtspunkten mithilfe von QQ-Plots und einer Analyse der Residuen.

### 3.1.2 Versagensarten und deren Häufigkeiten

Wie bereits in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, versagten die Träger bei den Schubprüfungen an unterschiedlichen Orten und aufgrund von unterschiedlichen kausalen Beanspruchungsarten. Die häufigsten Ursachen sind in den nachfolgenden Abb. 3.1 bis Abb. 3.4 anhand der Serie T-1 kurz beschrieben.

Von den insgesamt 221 geprüften Trägern versagten 101 auf Schub im Prüfquerschnitt S\_ST (siehe Abb. 3.1), 63 auf Schub im Übergangsbereich zwischen Prüfquerschnitt und Gurt S\_UB (siehe Abb. 3.2), 13 auf Schub aufgrund von Vorschädigungen S\_VS (siehe Abb. 3.3), 26 auf Biegezug im Untergurt B\_UG (siehe Abb. 3.4) und 18 aus sonstigen Gründen (S\_OG, S\_UG, B\_ST oder SONS).

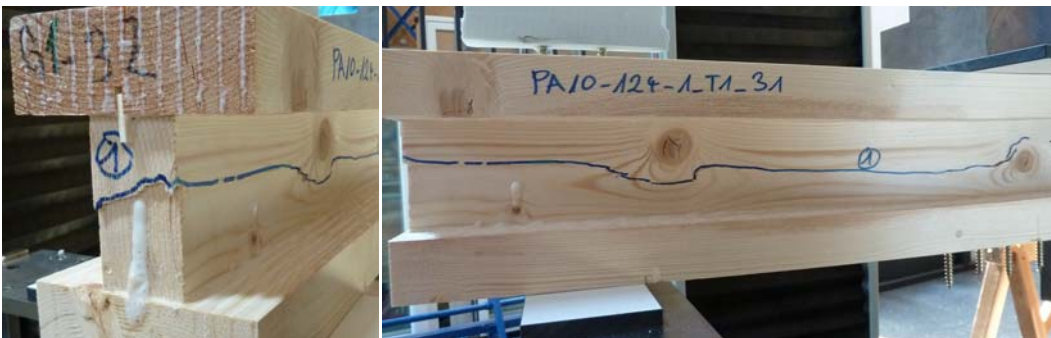


Abb. 3.1 Versagen des Trägers T1\_31 auf Schub im Prüfquerschnitt S\_ST



Abb. 3.2 Versagen des Trägers T1\_39 auf Schub im Übergangsbereich S\_UB



Abb. 3.3 Versagen des Trägers T1\_15 aufgrund von Vorschädigung S\_VS (Trockenrisse)



Abb. 3.4 Versagen des Trägers T1\_25 auf Biegezug im Untergurt B\_UG

Für die einzelnen Serien sind die Versagenhäufigkeiten in den nachfolgenden Abschnitten separat nochmals genauer dargestellt.

### 3.1.3 Übersicht der empirischen Häufigkeitsverteilungen (empD) der einzelnen Serien

In der nachfolgenden Abb. 3.5 sind die empirischen Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Serien zusammengefasst.

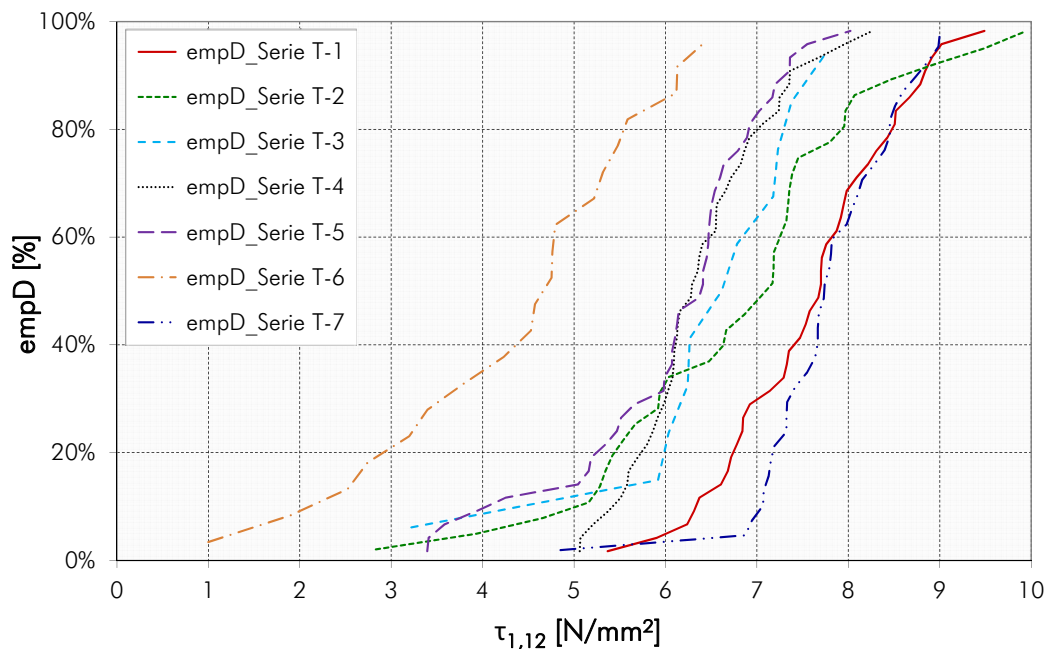


Abb. 3.5 Übersicht der empirischen Häufigkeitsverteilungen der Schubspannungen  $\tau_{1,12}$  (Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1)

In den folgenden Darstellungen und Übersichtstabellen werden die Ergebnisse aus den Prüfungen für jede Prüferserie einzeln dargestellt.

Aufgrund des Auftretens von Schubversagen außerhalb des Prüfquerschnittes (Steg) bzw. Biegezugversagen handelt es sich hier hinsichtlich der Schubfestigkeits- bzw. Schubspannungswerte um zensierte Daten.

Durch die Berücksichtigung einer Korrektur mithilfe der „Maximum Likelihood Estimation“ (Abschnitt 4.2.2), welche es prinzipiell ermöglicht, die Zensur der Daten in der Auswertung zu berücksichtigen, würden allerdings Informationen bezüglich der Einzelprüfungen verloren gehen. Deshalb werden in diesem Abschnitt die reinen Prüfergebnisse dargestellt und weitgehend unkommentiert belassen. Im nachfolgenden Kapitel 4 (Diskussionen) werden vertiefende Analysen zur Ermittlung repräsentativer Schubfestigkeitsverteilungen mittels der Ergebnisse aus diesem Kapitel durchgeführt.

## 3.2 Ergebnisübersicht Serie T-1

In der nachfolgenden Tab. 3.1 sind die physikalischen und mechanischen Kenngrößen aus den Prüfungen der Serie T-1 aufgelistet.

| Serie T-1        | u [%]         | $A_{Pr-GS}$ [mm <sup>2</sup> ] | $\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $E_{t,0,12,est}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $\tau_{1,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $\tau_{2,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $\tau_{3,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{v,1,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |
|------------------|---------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Anzahl           | 40            | 40                             | 40                               | 40                                    | 40                                 | 6                                  | 0                                  | 10                                |
| Min              | 12,4 %        | 2918                           | 361                              | 8567                                  | 5,4                                | 6,2                                | --                                 | 6,6                               |
| <b>MW</b>        | <b>12,9 %</b> | <b>2933</b>                    | <b>447</b>                       | <b>11307</b>                          | <b>7,6</b>                         | <b>7,0</b>                         | --                                 | <b>7,9</b>                        |
| median           | 12,8 %        | 2933                           | 445                              | 11102                                 | 7,7                                | 6,3                                |                                    | 7,9                               |
| Max              | 13,6 %        | 2969                           | 537                              | 14848                                 | 9,5                                | 9,1                                | --                                 | 8,9                               |
| <b>COV</b>       | <b>2,2 %</b>  | <b>0,3 %</b>                   | <b>7,1 %</b>                     | <b>13,2 %</b>                         | <b>12,2 %</b>                      | <b>16,2 %</b>                      | --                                 | <b>9,1 %</b>                      |
| $X_{05,empD}$    | --            | --                             | 405                              | --                                    | --                                 | --                                 | --                                 | --                                |
| $X_{05,DM}$      | --            | --                             | 397                              | 9037                                  | 6,1                                | 5,4                                | --                                 | 6,7                               |
| DM               |               |                                | (2pLND)                          | (2pLND)                               | (ND)                               | (2pLND)                            |                                    | (2pLND)                           |
| $X_{50,DM}$      | --            | --                             | 446                              | 11212                                 | 7,6                                | 6,9                                | --                                 | 7,8                               |
| DM               |               |                                | (2pLND)                          | (2pLND)                               | (ND)                               | (2pLND)                            |                                    | (2pLND)                           |
| $X_{k,EN 14358}$ | --            | --                             | --                               | --                                    | --                                 | --                                 | --                                 | 6,5                               |

Tab. 3.1 Übersicht über die physikalischen und mechanischen Kenngrößen der 3-Punkt-Biegeprüfungen der Serie T-1

In der folgenden Abb. 3.6 sind die Versagensorte, die zugewiesenen kausalen Beanspruchungsarten sowie deren Häufigkeit beim 1. Teilversagen aufgelistet.

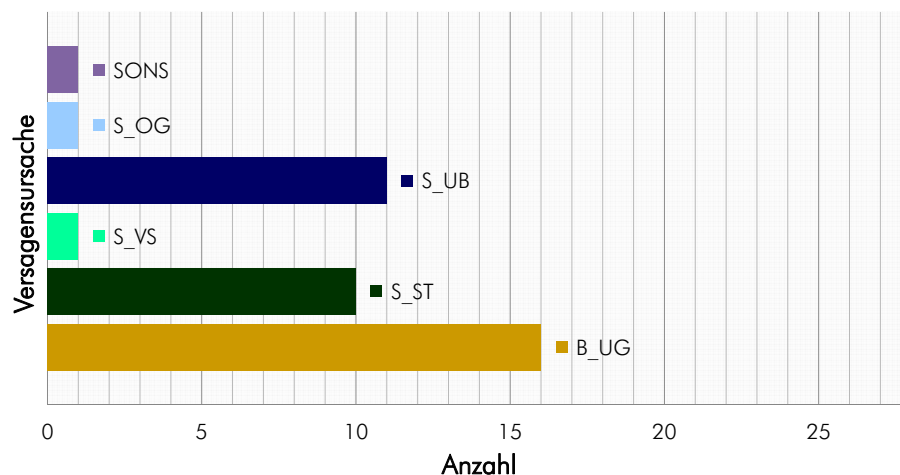


Abb. 3.6 Übersicht über Art und Häufigkeit des Versagensortes und der zugewiesenen kausalen Beanspruchungsart der Serie T-1 (Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1)

In der Abb. 3.7 ist die empirische Summenhäufigkeitsfunktion (empD) der ermittelten Schubspannungen  $\tau_{1,12}$  zum Zeitpunkt des 1. Teilversagens und die Lage der einzelnen Prüfungen mit den dazugehörigen Versagensursachen dargestellt.



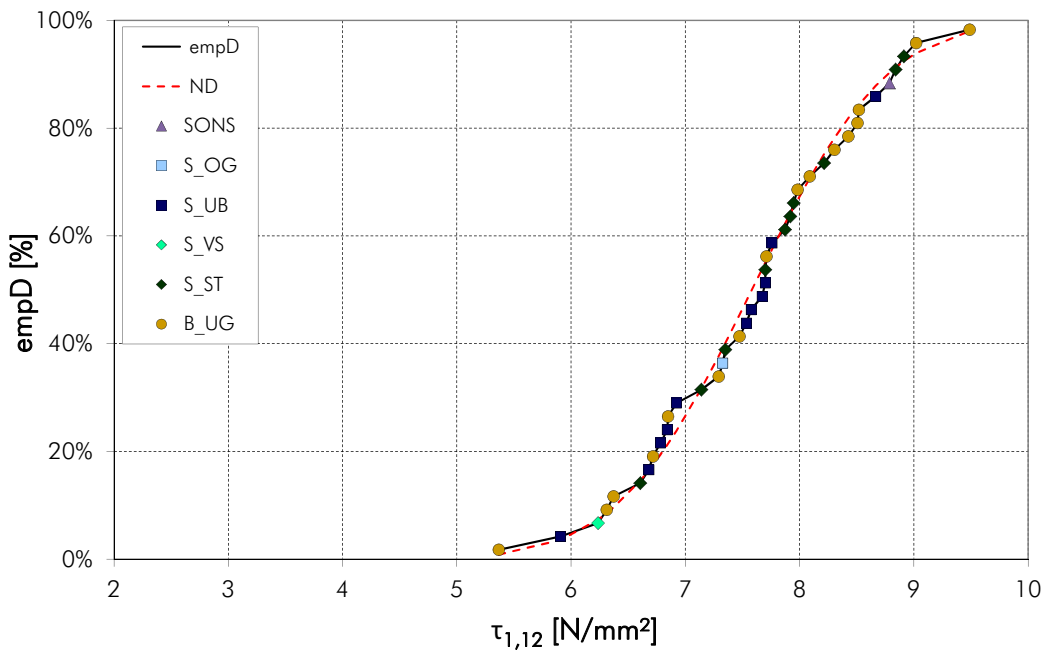


Abb. 3.7 Empirische Häufigkeitsverteilung der Schubspannungen  $\tau_{1,12}$  der Serie T-1, ergänzt durch das für die Serie am besten angepasste Verteilungsmodell (DM) und Darstellung der Versagensarten (Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1)

Wie in Abb. 3.7 ersichtlich, wird die empirische Häufigkeitsverteilung (empD) der Serie T-1 am besten durch eine Normalverteilung (ND) repräsentiert. Die ND weicht dabei lediglich in wenigen Bereichen leicht von der empD ab. Zusätzlich ist zu sehen, dass sich die Versagensarten S<sub>ST</sub> und B<sub>UG</sub> regelmäßig über den gesamten Bereich der empD verteilen, wohingegen die Versagensart S<sub>UB</sub> tendenziell eher in der unteren Hälfte der Verteilung zu finden ist. Über die übrigen Versagensarten lassen sich, aufgrund ihrer geringen Anzahl, keine Aussagen treffen.



### 3.3 Ergebnisübersicht Serie T-2

In der nachfolgenden Tab. 3.2 sind die physikalischen und mechanischen Kenngrößen aus den Prüfungen der Serie T-2 aufgelistet.

| Serie T-2        | u [%]         | $A_{Pr-GS}$ [mm <sup>2</sup> ] | $\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $E_{t,0,12,est}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $\tau_{1,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $\tau_{2,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $\tau_{3,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{v,1,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |
|------------------|---------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Anzahl           | 34            | 34                             | 34                               | 34                                    | 34                                 | 4                                  | 1                                  | 21                                |
| Min              | 10,7 %        | 5707                           | 392                              | 9541                                  | 2,8                                | 4,0                                | --                                 | 3,9                               |
| <b>MW</b>        | <b>11,1 %</b> | <b>5747</b>                    | <b>449</b>                       | <b>12191</b>                          | <b>6,8</b>                         | <b>5,8</b>                         | <b>4,7</b>                         | <b>6,7</b>                        |
| median           | 11,0 %        | 5740                           | 448                              | 11846                                 | 7,0                                | --                                 | --                                 | 7,0                               |
| Max              | 11,4 %        | 5805                           | 523                              | 14244                                 | 9,9                                | 7,4                                | --                                 | 9,5                               |
| <b>COV</b>       | <b>1,7 %</b>  | <b>0,4 %</b>                   | <b>6,0 %</b>                     | <b>11,9 %</b>                         | <b>22,3 %</b>                      | <b>24,0 %</b>                      | --                                 | <b>19,2 %</b>                     |
| $X_{05,empD}$    | --            | --                             | 398                              | --                                    | --                                 | --                                 | --                                 | 4,2                               |
| $X_{05,DM}$      | --            | --                             | 405<br>(ND)                      | 9926<br>(2pLND)                       | 4,3<br>(ND)                        | 3,0<br>(2pWD)                      | --                                 | 4,6<br>(ND)                       |
| $X_{50,DM}$      | --            | --                             | 449<br>(ND)                      | 12106<br>(2pLND)                      | 6,8<br>(ND)                        | 5,8<br>(2pWD)                      | --                                 | 6,7<br>(ND)                       |
| $X_{k,EN 14358}$ | --            | --                             | --                               | --                                    | --                                 | --                                 | --                                 | 4,5                               |

Tab. 3.2 Übersicht über die physikalischen und mechanischen Kenngrößen der 3-Punkt-Biegeprüfungen der Serie T-2

In der folgenden Abb. 3.8 sind die Versagensorte, die zugewiesenen kausalen Beanspruchungsarten sowie deren Häufigkeit beim 1. Teilversagen aufgelistet.

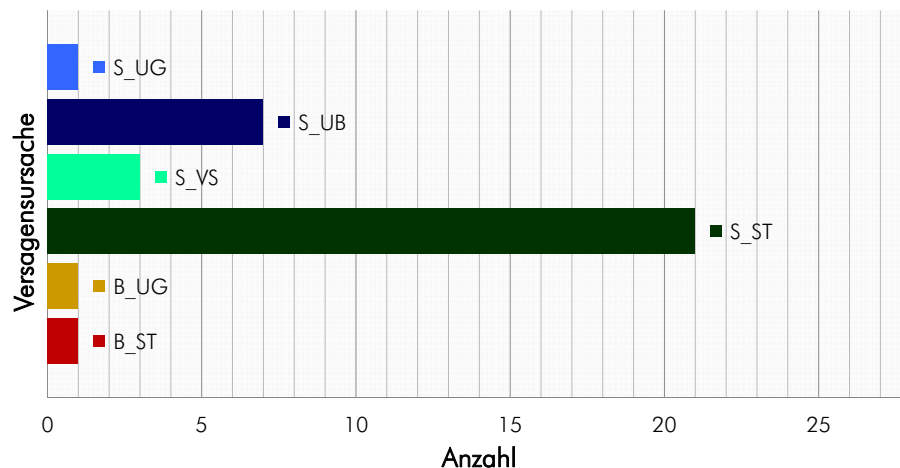


Abb. 3.8 Übersicht über Art und Häufigkeit des Versagensortes und der zugewiesenen kausalen Beanspruchungsart der Serie T-2 (Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1)

In der Abb. 3.9 ist die empirische Summenhäufigkeitsfunktion (empD) der ermittelten Schubspannungen  $\tau_{1,12}$  zum Zeitpunkt des 1. Teilversagens und die Lage der einzelnen Prüfungen mit den dazugehörigen Versagensursachen dargestellt.

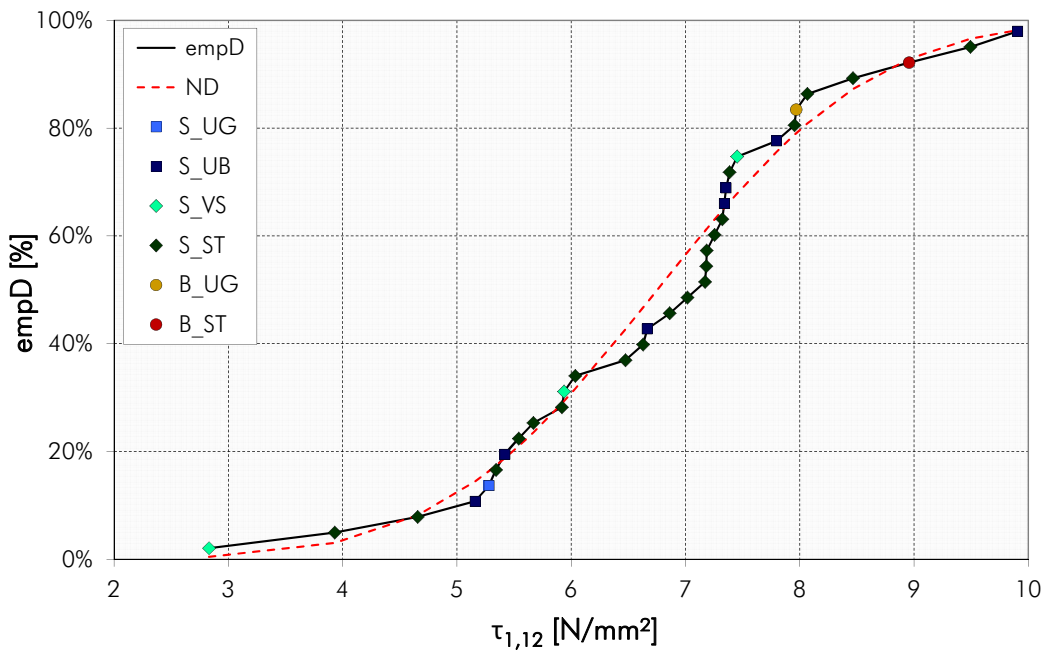


Abb. 3.9 Empirische Häufigkeitsverteilung der Schubspannungen  $\tau_{1,12}$  der Serie T-2, ergänzt durch das für die Serie am besten angepasste Verteilungsmodell (DM) und Darstellung der Versagensarten (Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1)

Unter Berücksichtigung aller Prüfergebnisse lässt sich die in Abb. 3.9 dargestellte empirische Häufigkeitsverteilung (empD) der Serie T-2 am besten durch eine Normalverteilung (ND) repräsentieren. Aufgrund der Miterfassung von Prüfträgern mit Vorschädigungen (VS) liegen einige Prüfwerte tendenziell zu niedrig, wodurch die ND teilweise stark von der empD abweicht. Zusätzlich ist zu sehen, dass sich die Versagensarten S<sub>ST</sub> und S<sub>UB</sub> regelmäßig über die gesamte empD verteilen, wohingegen die vorgeschädigten Träger (S<sub>VS</sub>) tendenziell im unteren Bereich liegen. Über die übrigen Versagensarten lassen sich, aufgrund ihrer geringen Anzahl, keine Aussagen treffen.

### 3.4 Ergebnisübersicht Serie T-3

In der nachfolgenden Tab. 3.3 sind die physikalischen und mechanischen Kenngrößen aus den Prüfungen der Serie T-3 aufgelistet.

| Serie T-3               | u [%]         | A <sub>pr-GS</sub> [mm <sup>2</sup> ] | ρ <sub>12</sub> [kg/m <sup>3</sup> ] | E <sub>t,0,12,est</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | τ <sub>1,12</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | τ <sub>2,12</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | τ <sub>3,12</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | f <sub>v,1,12</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] |
|-------------------------|---------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|--|--|
| Anzahl                  | 11            | 11                                    | 11                                   | 11   | 11                                     | 3                                      | 1                                      | 7  |
| Min                     | 9,9 %         | 11843                                 | 355                                  | 7375   | 3,2                                    | 4,7                                    | --                                     | 5,9                                      |
| <b>MW</b>               | <b>10,3 %</b> | <b>11891</b>                          | <b>389</b>                           | <b>8505</b>                                  | <b>6,4</b>                             | <b>6,3</b>                             | <b>7,5</b>                             | <b>6,4</b>                               |
| median                  | 10,3 %        | 11891                                 | 390                                  | 8513   | 6,6                                    | --                                     | --                                     | 6,3                                      |
| Max                     | 10,7 %        | 11926                                 | 408                                  | 9390   | 7,7                                    | 8,1                                    | --                                     | 7,2                                      |
| <b>COV</b>              | <b>2,9 %</b>  | <b>0,2 %</b>                          | <b>3,7 %</b>                         | <b>8,7 %</b>                                 | <b>18,9 %</b>                          | <b>26,8 %</b>                          | --                                     | <b>7,0 %</b>                             |
| X <sub>05,empD</sub>    | --            | --                                    | --                                   | --   | --                                     | --                                     | --                                     | --                                       |
| X <sub>05,DM</sub>      | --            | --                                    | 357                                  | 7342   | 4,4                                    | 3,0                                    | --                                     | 5,7                                      |
| DM                      |               |                                       | (2pWD)                               | (2pLND)                                      | (ND)                                   | (2pWD)                                 |  | (2pLND)                                  |
| X <sub>50,DM</sub>      | --            | --                                    | 391                                  | 8476   | 6,4                                    | 6,4                                    | --                                     | 6,4                                      |
| DM                      |               |                                       | (2pWD)                               | (2pLND)                                      | (ND)                                   | (2pWD)                                 |  | (2pLND)                                  |
| X <sub>k,EN 14358</sub> | --            | --                                    | --                                   | --   | --                                     | --                                     | --                                     | 5,5                                      |

Tab. 3.3 Übersicht über die physikalischen und mechanischen Kenngrößen der 3-Punkt-Biegeprüfungen der Serie T-3

In der folgenden Abb. 3.10 sind die Versagensorte, die zugewiesenen kausalen Beanspruchungsarten sowie deren Häufigkeit beim 1. Teilversagen aufgelistet.

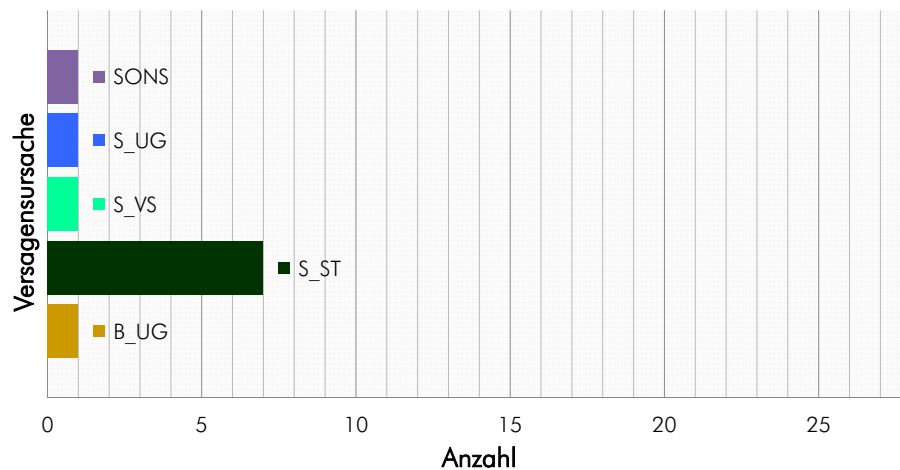


Abb. 3.10 Übersicht über Art und Häufigkeit des Versagensortes und der zugewiesenen kausalen Beanspruchungsart der Serie T-3 (Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1)

In der Abb. 3.11 ist die empirische Summenhäufigkeitsfunktion (empD) der ermittelten Schubspannungen τ<sub>1,12</sub> zum Zeitpunkt des 1. Teilversagens und die Lage der einzelnen Prüfungen mit den dazugehörigen Versagensursachen dargestellt.

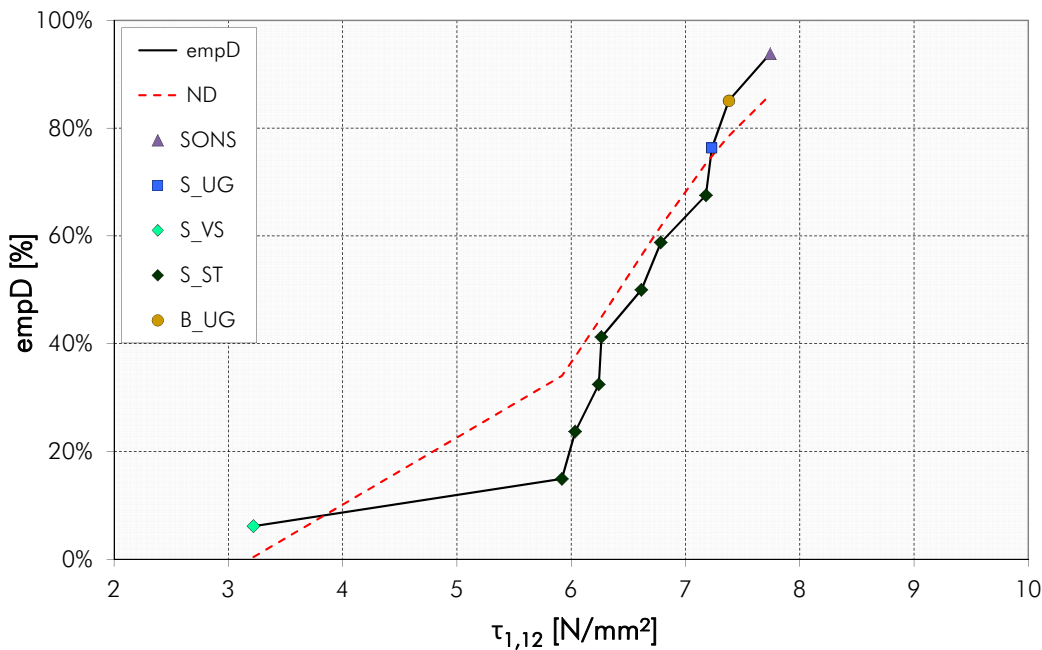


Abb. 3.11 Empirische Häufigkeitsverteilung der Schubspannungen  $\tau_{1,12}$  der Serie T-3, ergänzt durch das für die Serie am besten angepasste Verteilungsmodell (DM) und Darstellung der Versagensarten (Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1)

Unter Berücksichtigung aller Prüfergebnisse lässt sich die in Abb. 3.11 dargestellte empirische Häufigkeitsverteilung (empD) der Serie T-3 am besten durch eine Normalverteilung (ND) repräsentieren. Aufgrund der geringen Prüfkörperanzahl kann jedoch nur schwer eine konkrete Aussage über die Verteilung getroffen werden. Zusätzlich ist zu sehen, dass der Prüfkörper mit der Versagensart S\_VS, welcher durch Trockenrisse vorgeschädigt war, tendenziell eine sehr geringe Schubfestigkeit aufweist, wodurch die ND stark von der empD abweicht. Die Versagensart S\_ST verteilt sich hingegen regelmäßig im Zentrum der empD und die übrigen Versagensarten konnten bezüglich der Schubfestigkeit nicht ihr volles Potenzial ausnützen.

### 3.5 Ergebnisübersicht Serie T-4

In der nachfolgenden Tab. 3.4 sind die physikalischen und mechanischen Kenngrößen aus den Prüfungen der Serie T-4 aufgelistet.

| Serie T-4               | u [%]         | A <sub>pr-GS</sub> [mm <sup>2</sup> ] | ρ <sub>12</sub> [kg/m <sup>3</sup> ] | E <sub>t,0,12,est</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | τ <sub>1,12</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | τ <sub>2,12</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | τ <sub>3,12</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | f <sub>v,1,12</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] |
|-------------------------|---------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|--|--|
| Anzahl                  | 40            | 40                                    | 40                                   | 40   | 40                                     | 2                                      | 1                                      | 21                                       |
| Min                     | 9,1 %         | 11820                                 | 351                                  | 10578  | 5,1                                    | 5,2                                    | --                                     | 5,1                                      |
| <b>MW</b>               | <b>10,0 %</b> | <b>11876</b>                          | <b>414</b>                           | <b>11420</b>                                 | <b>6,4</b>                             | <b>5,5</b>                             | <b>5,1</b>                             | <b>6,6</b>                               |
| median                  | 10,0 %        | 11878                                 | 413                                  | 11373  | 6,3                                    | --                                     | --                                     | 6,5                                      |
| Max                     | 10,6 %        | 11942                                 | 476                                  | 12299  | 8,3                                    | 5,8                                    | --                                     | 8,3                                      |
| <b>COV</b>              | <b>3,4 %</b>  | <b>0,3 %</b>                          | <b>5,8 %</b>                         | <b>3,9 %</b>                                 | <b>11,9 %</b>                          | <b>6,9 %</b>                           | <b>--</b>                              | <b>12,9 %</b>                            |
| X <sub>05,empD</sub>    | --            | --                                    | 366                                  | --   | --                                     | --                                     | --                                     | 5,2                                      |
| X <sub>05,DM</sub>      | --            | --                                    | 367                                  | 10697  | 5,2                                    | --                                     | --                                     | 5,3                                      |
| DM                      |               |                                       | (2pWD)                               | (2pLND)                                      | (2pLND)                                |  |  | (2pLND)                                  |
| X <sub>50,DM</sub>      | --            | --                                    | 418                                  | 11411  | 6,3                                    | --                                     | --                                     | 6,5                                      |
| DM                      |               |                                       | (2pWD)                               | (2pLND)                                      | (2pLND)                                |  |  | (2pLND)                                  |
| X <sub>k,EN 14358</sub> | --            | --                                    | --                                   | --   | --                                     | --                                     | --                                     | 5,1                                      |

Tab. 3.4 Übersicht über die physikalischen und mechanischen Kenngrößen der 3-Punkt-Biegeprüfungen der Serie T-4

In der folgenden Abb. 3.12 sind die Versagensorte, die zugewiesenen kausalen Beanspruchungsarten sowie deren Häufigkeit beim 1. Teilversagen aufgelistet.

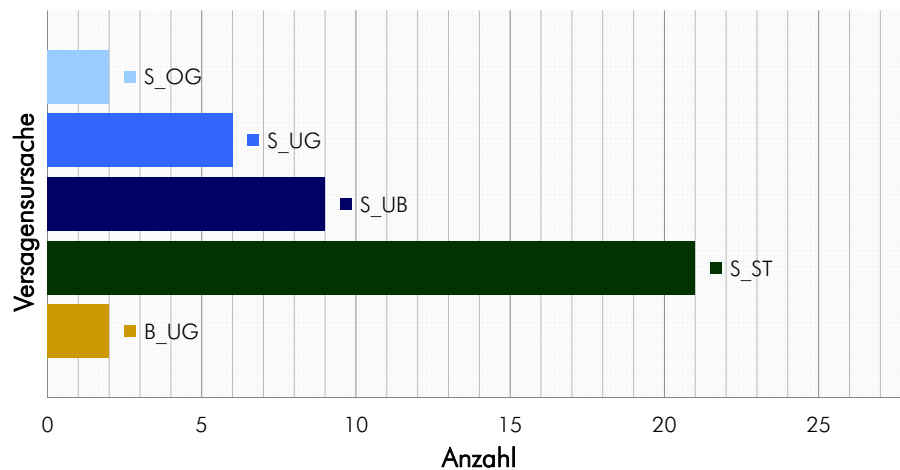


Abb. 3.12 Übersicht über Art und Häufigkeit des Versagensortes und der zugewiesenen kausalen Beanspruchungsart der Serie T-4 (Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1)

In der Abb. 3.13 ist die empirische Summenhäufigkeitsfunktion (empD) der ermittelten Schubspannungen τ<sub>1,12</sub> zum Zeitpunkt des 1. Teilversagens und die Lage der einzelnen Prüfungen mit den dazugehörigen Versagensursachen dargestellt.

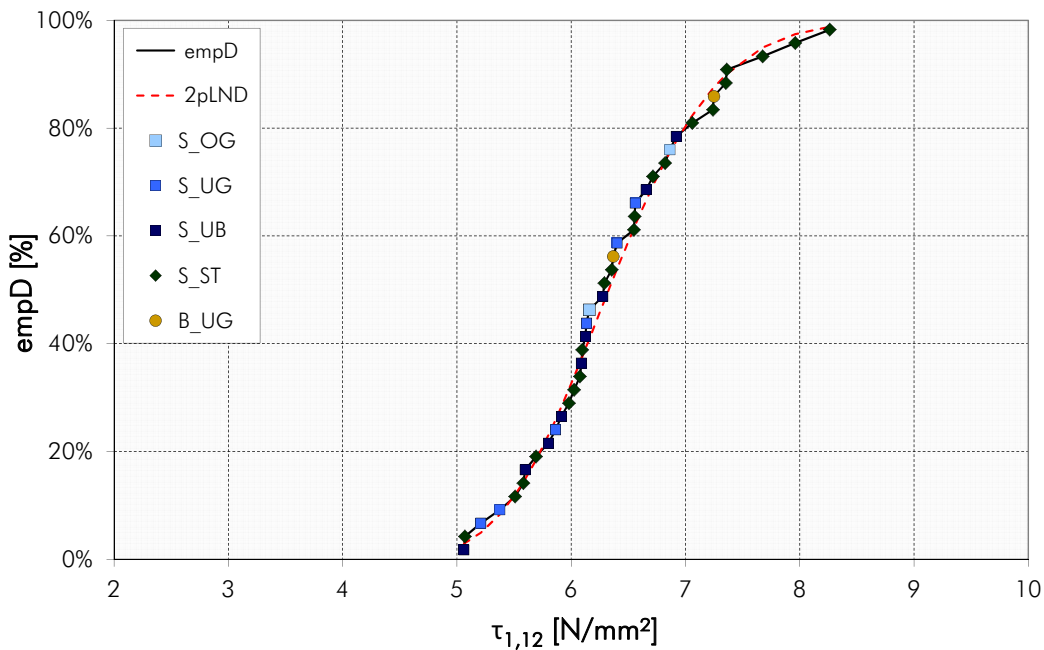


Abb. 3.13 Empirische Häufigkeitsverteilung der Schubspannungen  $\tau_{1,12}$  der Serie T-4, ergänzt durch das für die Serie am besten angepasste Verteilungsmodell (DM) und Darstellung der Versagensarten (Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1)

Wie in Abb. 3.13 ersichtlich, wird die empirische Häufigkeitsverteilung der Serie T-4 am besten durch eine zwei-parametrische Lognormalverteilung (2pLND) repräsentiert. Die 2pLND weicht dabei lediglich in wenigen Bereichen geringfügig von der empD ab. Ersichtlich ist ebenfalls, dass die Versagensarten S\_UB, S\_UG sowie S\_OG tendenziell im mittleren und unteren Bereich der empD liegen. Hingegen findet sich die Versagensart B\_UG in der oberen Hälfte der empD. Die Versagensart S\_ST verteilt sich über den gesamten Bereich der empD.

## 3.6 Ergebnisübersicht Serie T-5

In der nachfolgenden Tab. 3.5 sind die physikalischen und mechanischen Kenngrößen aus den Prüfungen der Serie T-5 aufgelistet.

| Serie T-5        | u [%]         | $A_{Pr-GS}$ [mm <sup>2</sup> ] | $\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $E_{t,0,12,est}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $\tau_{1,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $\tau_{2,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $\tau_{3,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{v,1,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |
|------------------|---------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Anzahl           | 40            | 40                             | 40                               | 40                                    | 40                                 | 3                                  | 1                                  | 19                                |
| Min              | 10,0 %        | 11759                          | 423                              | 12922                                 | 3,4                                | 3,5                                | --                                 | 3,4                               |
| <b>MW</b>        | <b>10,7 %</b> | <b>11875</b>                   | <b>467</b>                       | <b>14247</b>                          | <b>6,1</b>                         | <b>4,1</b>                         | <b>4,2</b>                         | <b>6,0</b>                        |
| median           | 10,7 %        | 11867                          | 463                              | 14100                                 | 6,4                                | --                                 | --                                 | 6,5                               |
| Max              | 11,5 %        | 12033                          | 558                              | 16258                                 | 8,0                                | 4,6                                | --                                 | 8,0                               |
| <b>COV</b>       | <b>2,9 %</b>  | <b>0,5 %</b>                   | <b>6,5 %</b>                     | <b>7,1 %</b>                          | <b>18,5 %</b>                      | <b>14,0 %</b>                      | --                                 | <b>22,6 %</b>                     |
| $X_{05,empD}$    | --            | --                             | 426                              | --                                    | --                                 | --                                 | --                                 | --                                |
| $X_{05,DM}$      | --            | --                             | 420                              | 12671                                 | 4,2                                | 2,8                                | --                                 | 3,4                               |
| DM               |               |                                | (2pLND)                          | (2pLND)                               | (ND)                               | (2pWD)                             |                                    | (2pWD)                            |
| $X_{50,DM}$      | --            | --                             | 466                              | 14213                                 | 6,1                                | 4,1                                | --                                 | 6,1                               |
| DM               |               |                                | (2pLND)                          | (2pLND)                               | (ND)                               | (2pWD)                             |                                    | (2pWD)                            |
| $X_{k,EN 14358}$ | --            | --                             | --                               | --                                    | --                                 | --                                 | --                                 | 3,6                               |

Tab. 3.5 Übersicht über die physikalischen und mechanischen Kenngrößen der 3-Punkt-Biegeprüfungen der Serie T-5

In der folgenden Abb. 3.14 sind die Versagensorte, die zugewiesenen kausalen Beanspruchungsarten sowie deren Häufigkeit beim 1. Teilversagen aufgelistet.

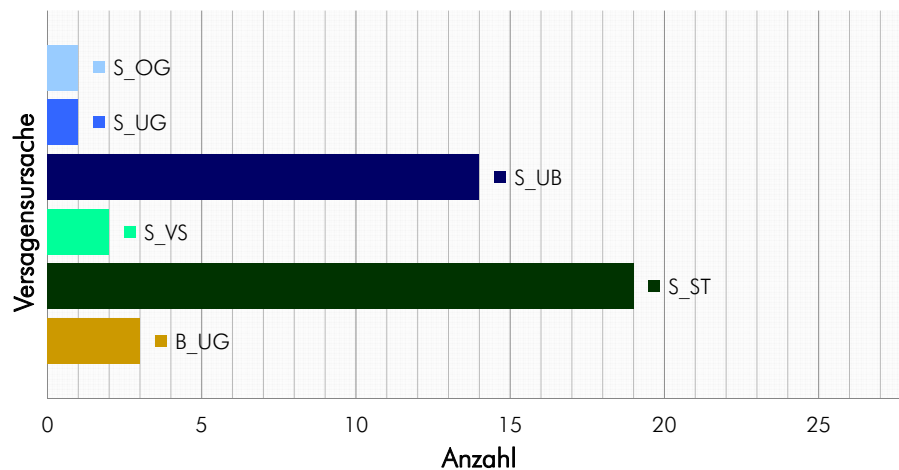


Abb. 3.14 Übersicht über Art und Häufigkeit des Versagensortes und der zugewiesenen kausalen Beanspruchungsart der Serie T-5 (Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1)

In der Abb. 3.15 ist die empirische Summenhäufigkeitsfunktion (empD) der ermittelten Schubspannungen  $\tau_{1,12}$  zum Zeitpunkt des 1. Teilversagens und die Lage der einzelnen Prüfungen mit den dazugehörigen Versagensursachen dargestellt.

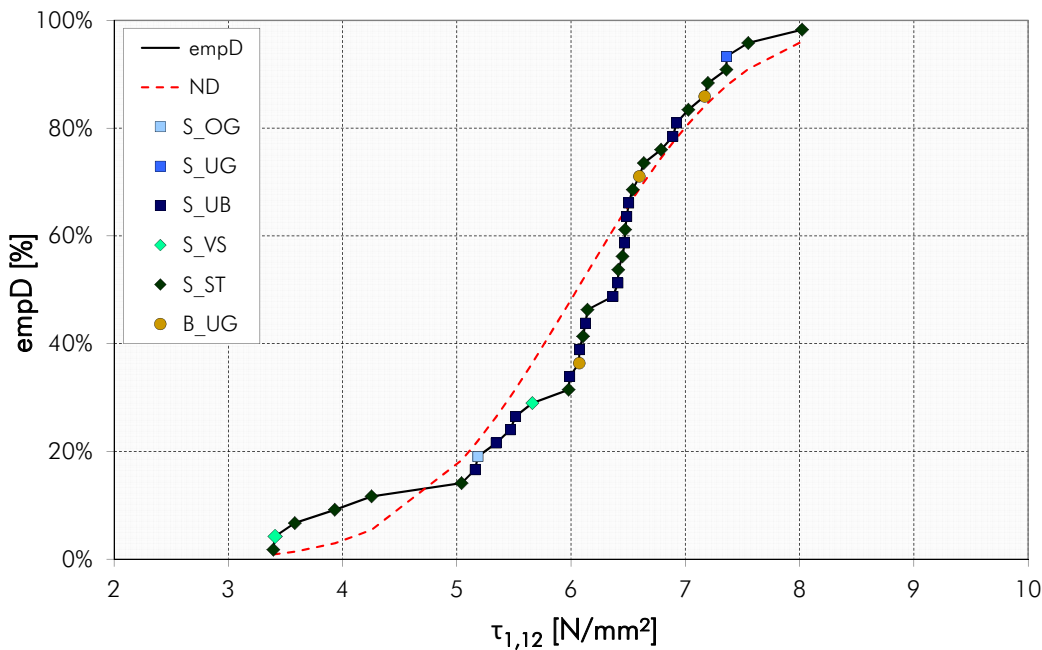


Abb. 3.15 Empirische Häufigkeitsverteilung der Schubspannungen  $\tau_{1,12}$  der Serie T-5, ergänzt durch das für die Serie am besten angepasste Verteilungsmodell (DM) und Darstellung der Versagensarten (Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1)

Unter Berücksichtigung aller Prüfergebnisse lässt sich die in Abb. 3.15 dargestellte empirische Häufigkeitsverteilung (empD) der Serie T-5 am besten durch eine Normalverteilung (ND) repräsentieren. Aufgrund der erhöhten Streuung im unteren Bereich weicht die ND jedoch stark von der empD ab. Zusätzlich ist festzustellen, dass sich die Versagensart  $S_{ST}$  regelmäßig über die gesamte empD verteilt. Hingegen findet sich die Versagensart  $B_{UG}$  in der oberen Hälfte der empD und die Versagensart  $S_{UB}$  im zentralen Bereich. Über die übrigen Versagensarten lassen sich, aufgrund ihrer geringen Anzahl, keine Aussagen treffen.



### 3.7 Ergebnisübersicht Serie T-6

In der nachfolgenden Tab. 3.6 sind die physikalischen und mechanischen Kenngrößen aus den Prüfungen der Serie T-6 aufgelistet.

| Serie T-6               | u [%]         | A <sub>Pr-QS</sub> [mm <sup>2</sup> ] | ρ <sub>12</sub> [kg/m <sup>3</sup> ] | E <sub>t,0,12,est</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | G <sub>090,12,SF</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | τ <sub>1,12</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | τ <sub>2,12</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | τ <sub>3,12</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | f <sub>v,1,12</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] |
|-------------------------|---------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--|---|--|--|--|--|
| Anzahl                  | 20            | 20                                    | 20                                   | 20   | 10  | 20                                     | 5                                      | 2                                      | 10                                       |
| Min                     | 10,3 %        | 23458                                 | 365                                  | 9513   | 512   | 1,0                                    | 2,6                                    | 3,3                                    | 2,7                                      |
| <b>MW</b>               | <b>11,1 %</b> | <b>23854</b>                          | <b>417</b>                           | <b>11708</b>                                 | <b>599</b>                                  | <b>4,3</b>                             | <b>3,3</b>                             | <b>3,6</b>                             | <b>4,8</b>                               |
| median                  | 11,1 %        | 23884                                 | 421                                  | 11345  | 586   | 4,6                                    | 3,3                                    | --                                     | 4,8                                      |
| Max                     | 11,6 %        | 24206                                 | 453                                  | 13960  | 766   | 6,5                                    | 4,1                                    | 3,9                                    | 6,5                                      |
| <b>COV</b>              | <b>3,2 %</b>  | <b>0,7 %</b>                          | <b>6,5 %</b>                         | <b>11,8 %</b>                                | <b>12,0 %</b>                               | <b>34,2 %</b>                          | <b>17,6 %</b>                          | <b>10,9 %</b>                          | <b>22,9 %</b>                            |
| X <sub>05,empD</sub>    | --            | --                                    | 367                                  | --   | --  | --                                     | --                                     | --                                     | --                                       |
| X <sub>05,DM</sub>      | --            | --                                    | 362                                  | 9568   | 494   | 1,9                                    | 2,1                                    | 3,0                                    | 2,7                                      |
| DM                      | --            | --                                    | (2pWD)                               | (2pLND)                                      | (2pLND)                                     | (ND)                                   | (2pWD)                                 | (2pLND)                                | (2pWD)                                   |
| X <sub>50,DM</sub>      | --            | --                                    | 421                                  | 11630  | 596   | 4,3                                    | 3,4                                    | 3,6                                    | 4,8                                      |
| DM                      | --            | --                                    | (2pWD)                               | (2pLND)                                      | (2pLND)                                     | (ND)                                   | (2pWD)                                 | (2pLND)                                | (2pWD)                                   |
| X <sub>k,EN 14358</sub> | --            | --                                    | --                                   | --   | --  | --                                     | --                                     | --                                     | 2,8                                      |

Tab. 3.6 Übersicht über die physikalischen und mechanischen Kenngrößen der 3-Punkt-Biegeprüfungen der Serie T-6

In der folgenden Abb. 3.16 sind die Versagensorte, die zugewiesenen kausalen Beanspruchungsarten sowie deren Häufigkeit beim 1. Teilversagen aufgelistet.

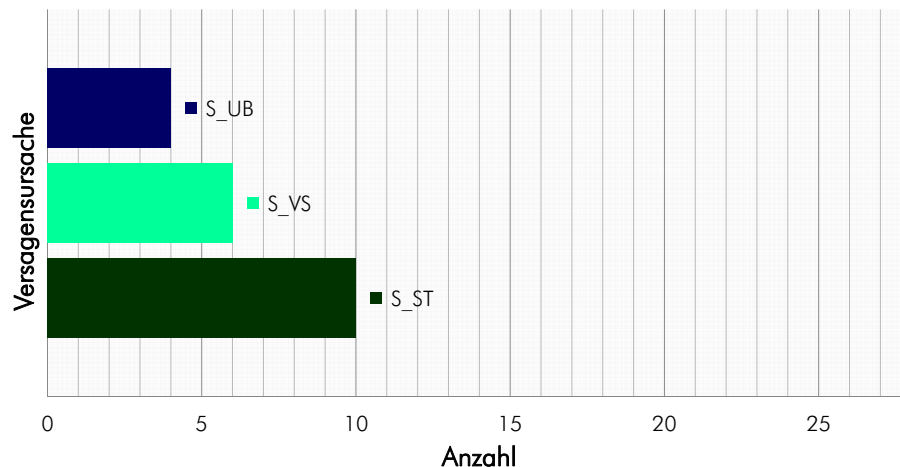


Abb. 3.16 Übersicht über Art und Häufigkeit des Versagensortes und der zugewiesenen kausalen Beanspruchungsart der Serie T-6 (Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1)

In der Abb. 3.17 ist die empirische Summenhäufigkeitsfunktion (empD) der ermittelten Schubspannungen τ<sub>1,12</sub> zum Zeitpunkt des 1. Teilversagens und die Lage der einzelnen Prüfungen mit den dazugehörigen Versagensursachen dargestellt.

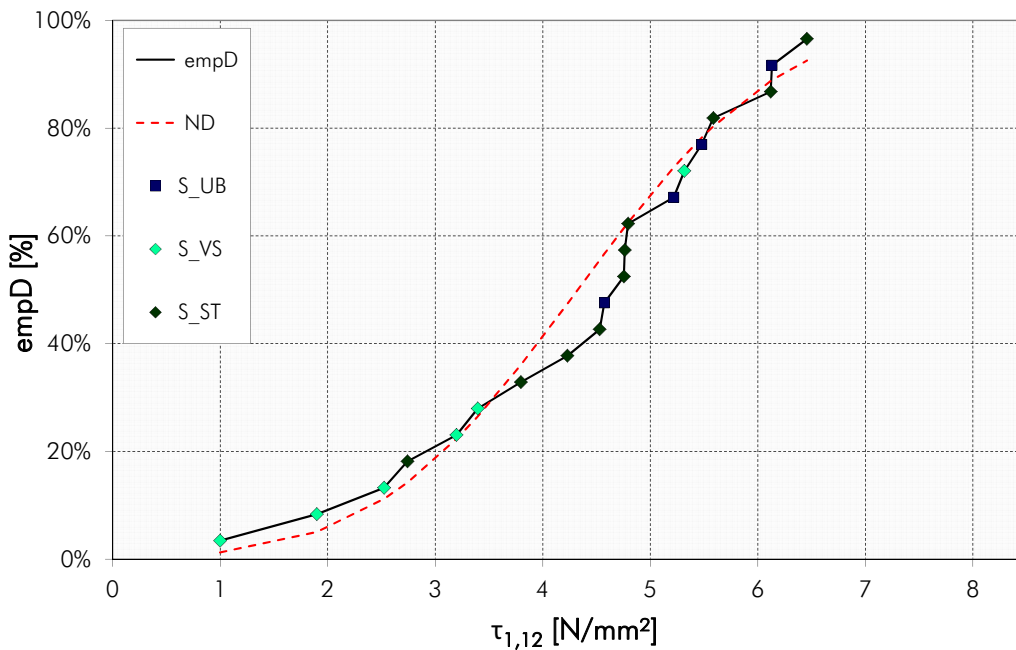


Abb. 3.17 Empirische Häufigkeitsverteilung der Schubspannungen  $\tau_{1,12}$  der Serie T-6, ergänzt durch das für die Serie am besten angepasste Verteilungsmodell (DM) und Darstellung der Versagensarten (Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1)

Wie in Abb. 3.17 ersichtlich, wird die empirische Häufigkeitsverteilung der Serie T-6 am besten durch eine Normalverteilung (ND) repräsentiert. Die ND weicht jedoch in einigen Bereichen deutlich von der empD ab. Im unteren Bereich konzentrieren sich die Prüfdaten der Versagensart S\_VS, welche durch Vorschädigungen im Steg (Trockenrisse) geringere Schubfestigkeiten aufwiesen. Hingegen sind die Versagensarten auf Schub im Steg (S\_ST) und auf Schub im Übergangsbereich (S\_UB) im mittleren und oberen Bereich der empD angesiedelt.

### 3.8 Ergebnisübersicht Serie T-7

In der nachfolgenden Tab. 3.7 sind die physikalischen und mechanischen Kenngrößen aus den Prüfungen der Serie T-7 aufgelistet.

| Serie T-7               | u [%]         | A <sub>pr-GS</sub> [mm <sup>2</sup> ] | ρ <sub>12</sub> [kg/m <sup>3</sup> ] | E <sub>t,0,12,est</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | τ <sub>1,12</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | τ <sub>2,12</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | τ <sub>3,12</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | f <sub>v,1,12</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] |
|-------------------------|---------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|--|--|
| Anzahl                  | 36            | 36                                    | 36                                   | 36   | 36                                     | 2                                      | 0                                      | 13                                       |
| Min                     | 10,4 %        | 6089                                  | 351                                  | 9681   | 4,9                                    | 8,1                                    | --                                     | 7,1                                      |
| <b>MW</b>               | <b>11,1 %</b> | <b>6215</b>                           | <b>432</b>                           | <b>10747</b>                                 | <b>7,8</b>                             | <b>8,5</b>                             | --                                     | <b>8,1</b>                               |
| median                  | 11,1 %        | 6228                                  | 430                                  | 10269  | 7,7                                    | --                                     | --                                     | 8,0                                      |
| Max                     | 12,0 %        | 6264                                  | 569                                  | 12853  | 9,0                                    | 8,9                                    | --                                     | 8,9                                      |
| <b>COV</b>              | <b>4,0 %</b>  | <b>0,7 %</b>                          | <b>10,6 %</b>                        | <b>9,6 %</b>                                 | <b>10,0 %</b>                          | <b>6,7 %</b>                           | --                                     | <b>6,2 %</b>                             |
| X <sub>05,empD</sub>    | --            | --                                    | 356                                  | --   | --                                     | --                                     | --                                     | --                                       |
| X <sub>05,DM</sub>      | --            | --                                    | 362                                  | 9194   | 6,5                                    | 7,6                                    | --                                     | 7,3                                      |
| DM                      |               |                                       | (2pLND)                              | (2pLND)                                      | (ND)                                   | (2pLND)                                |  | (2pLND)                                  |
| X <sub>50,DM</sub>      | --            | --                                    | 429                                  | 10701  | 7,8                                    | 8,5                                    | --                                     | 8,0                                      |
| DM                      |               |                                       | (2pLND)                              | (2pLND)                                      | (ND)                                   | (2pLND)                                |  | (2pLND)                                  |
| X <sub>k,EN 14358</sub> | --            | --                                    | --                                   | --   | --                                     | --                                     | --                                     | 7,1                                      |

Tab. 3.7 Übersicht über die physikalischen und mechanischen Kenngrößen der 3-Punkt-Biegeprüfungen der Serie T-7

In der folgenden Abb. 3.18 sind die Versagensorte, die zugewiesenen kausalen Beanspruchungsarten sowie deren Häufigkeit beim 1. Teilversagen aufgelistet.

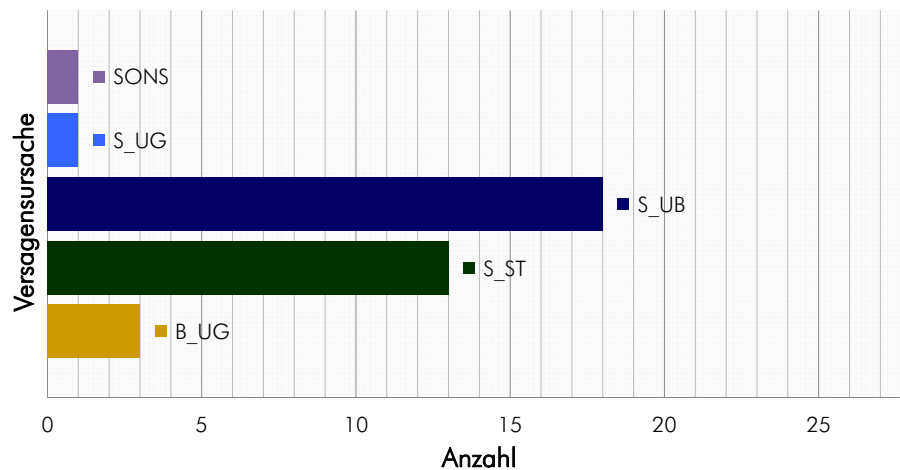


Abb. 3.18 Übersicht über Art und Häufigkeit des Versagensortes und der zugewiesenen kausalen Beanspruchungsart der Serie T-7 (Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1)

In der Abb. 3.19 ist die empirische Summenhäufigkeitsfunktion (empD) der ermittelten Schubspannungen τ<sub>1,12</sub> zum Zeitpunkt des 1. Teilversagens und die Lage der einzelnen Prüfungen mit den dazugehörigen Versagensursachen dargestellt.

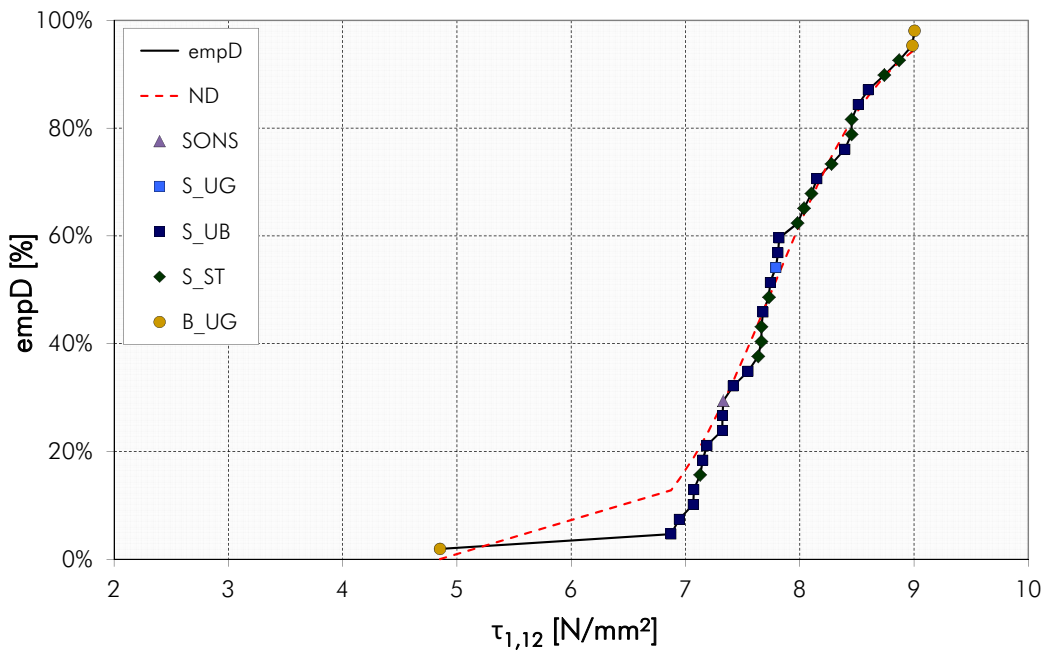


Abb. 3.19 Empirische Häufigkeitsverteilung der Schubspannungen  $\tau_{1,12}$  der Serie T-7, ergänzt durch das für die Serie am besten angepasste Verteilungsmodell (DM) und Darstellung der Versagensarten (Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1)

Die empirische Häufigkeitsverteilung (empD) der Serie T-7, wird, wie in Abb. 3.19 ersichtlich, am besten durch eine Normalverteilung (ND) repräsentiert. Jedoch liegt im untersten Bereich ein Bruch zufolge Biegezugversagens (B\_UG) des Prüfkörpers T7\_27 vor, wobei der Prüfträger, wie in Abb. 4.14 zu sehen, durch Astansammlung mit Rindeneinschlüssen im maximalen Momentenbereich stark geschwächt war. Die übrigen Prüfträger, welche auf Biegung (B\_UG) versagten, sind hingegen im obersten Bereich zu finden. Zusätzlich ist zu sehen, dass sich die Versagensarten S\_ST und S\_UB regelmäßig über die gesamte empD verteilen. Über die übrigen Versagensarten lassen sich, aufgrund ihrer geringen Anzahl, keine Aussagen treffen.

### 3.9 Ergebnisübersicht Serie T-8 (4-Punkt-Biegeprüfungen)

In der nachfolgenden Tab. 3.8 sind die physikalischen und mechanischen Kenngrößen aus den Prüfungen der Serie T-8 aufgelistet. Aus den 50 durchgeführten Prüfungen wurde eine Prüfung (Nr. PA10-124-1\_S4a-02, Abb. 4.15) aussortiert, da hier starke Vorschädigungen im Prüfbereich zu einem, für das Prüflos nicht repräsentativen Wert der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls geführt hätte, was die Statistiken in Tab. 3.8 deutlich beeinflusst hätte. In den empirischen Häufigkeitsverteilungen für die E-Module (Abb. 3.20) und die Biegefestigkeiten (Abb. 3.21) wurde diese Prüfung gesondert markiert, um die große Abweichung zu verdeutlichen.

Die Bezeichnungen in der nachfolgenden Übersichtstabelle und den Abbildungen entsprechen den Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1. Ergänzend kamen für diese Serie weitere folgend angeführte Bezeichnungen hinzu. Die Feuchtekorrektur erfolgte ebenfalls lt. der ON EN 384 [4] und mithilfe der in Abschnitt 2.5.2 beschriebenen Formeln.

|                   |  |
|-------------------|--|
| $E_{dyn,0,12}$    | dynamischer E-Modul, welcher mithilfe des Eigenfrequenzverfahrens (lt. Lackner [15]) ermittelt und auf 12% Holzfeuchte korrigiert wurde;   |
| $E_{m,0,12,lok}$  | lokaler statischer Biege-E-Modul, welcher entsprechend den Vorgaben und Formeln der ON EN 408 [5] und der Prüfkonfiguration lt. Abb. 2.16 ermittelt und mithilfe der Glg. 2.44 auf 12% Holzfeuchte korrigiert wurde;   |
| $E_{m,0,12,glob}$ | globaler statischer Biege-E-Modul, welcher entsprechend den Vorgaben und Formeln der ON EN 408 [5] und der Prüfkonfiguration lt. Abb. 2.16 ermittelt und mithilfe der Glg. 2.44 auf 12% Holzfeuchte korrigiert wurde; die Berücksichtigung der Schubverformung erfolgte wie in der ON EN 408 [5] beschrieben, wobei der mittlere Schubmodul aufgrund von Erfahrungswerten am Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz mit $G = 500 \text{ N/mm}^2$ angenommen wurde; |
| $f_{m,u}$         | Biegefestigkeit mit der Holzfeuchtigkeit ( $u$ ) zum Zeitpunkt der Prüfung, wobei lt. ON EN 384 [4] keine Holzfeuchtekorrektur erforderlich ist.   |

| Serie T-8        | $u$<br>[%]   | $\rho_{12}$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $E_{dyn,0,12}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $E_{m,0,12,lok}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $E_{m,0,12,glob}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{m,u}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|------------------|--------------|-------------------------------------|--|--|---|-----------------------------------|
| Anzahl           | 49           | 49                                  | 49                                     | 49                                       | 49  | 49                                |
| Min              | 9,1 %        | 398                                 | 7148                                   | 6414                                     | 6937                                      | 21,3                              |
| <b>MW</b>        | <b>9,7 %</b> | <b>441</b>                          | <b>12611</b>                           | <b>11673</b>                             | <b>11873</b>                              | <b>44,1</b>                       |
| median           | 9,6 %        | 449                                 | 12726                                  | 11619                                    | 12162                                     | 43,3                              |
| Max              | 10,9 %       | 475                                 | 16191                                  | 15202                                    | 15507                                     | 68,2                              |
| <b>COV</b>       | <b>4,2 %</b> | <b>5,1 %</b>                        | <b>18,5 %</b>                          | <b>21,0 %</b>                            | <b>19,9 %</b>                             | <b>31,4 %</b>                     |
| $X_{05,empD}$    | --           | 402                                 | --                                     | --                                       | --  | 22,7                              |
| $X_{05,DM}$      | --           | 396                                 | 8341                                   | 7834                                     | 7584                                      | 21,0                              |
| DM               | --           | (2pWD)                              | (2pWD)                                 | (2pLND)                                  | (2pWD)                                    | (2pWD)                            |
| $X_{50,DM}$      | --           | 444                                 | 12782                                  | 11396                                    | 12030                                     | 44,2                              |
| DM               | --           | (2pWD)                              | (2pWD)                                 | (2pLND)                                  | (2pWD)                                    | (2pWD)                            |
| $X_{k,EN 14358}$ | --           | --                                  | --                                     | --                                       | --  | 22,6                              |

Tab. 3.8 Übersicht über die physikalischen und mechanischen Kenngrößen der 4-Punkt-Biegeprüfungen lt. ON EN 408 [5] der Serie T-8

In der Abb. 3.20 sind die empirischen Summenhäufigkeitsfunktionen (empD) der ermittelten E-Module sowie die Lage der einzelnen Prüfungen dargestellt.

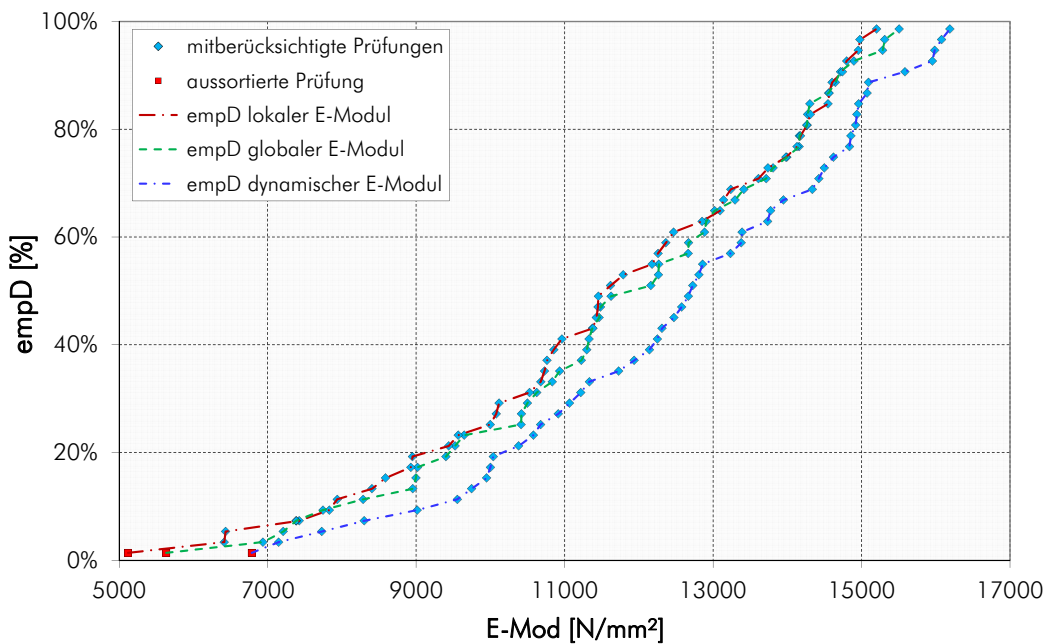


Abb. 3.20 Empirische Häufigkeitsverteilungen der globalen Biege-E-Module  $E_{m,0,12,glob}$ , der lokalen Biege-E-Module  $E_{m,0,12,lok}$  und der dynamischen E-Module  $E_{dyn,0,12}$  der Serie T-8 sowie die Lage der einzelnen Prüfungen (Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1)

Aus den in Abb. 3.20 dargestellten empirischen Häufigkeitsverteilungen ist ersichtlich, dass diese für die unterschiedlichen E-Module annähernd parallel verlaufen. Ausgehend von den Mittelwerten (MW) aus Tab. 3.8 beträgt die Differenz vom dynamischen E-Modul zum globalen E-Modul ca. 6% und zum lokalen E-Modul ca. 8%.

Aus der Tab. 3.8 ist ersichtlich, dass die 5%-Quantilwerte, als auch die Mittelwerte der ermittelten Biege-E-Module nahe den geforderten Kennwerten der untersuchten Festigkeitsklasse C24, wie in Tab. 3.9 dargestellt, liegen.

|                     | $E_0$ (C24)<br>lt. ON EN 338 [8] | $E_0$ (lokal)<br>lt. Tab. 3.8 | Differenz |
|---------------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------|
|                     | [N/mm <sup>2</sup> ]             | [N/mm <sup>2</sup> ]          | [%]       |
| 5%-Quantil-<br>Wert | 7400<br>( $E_{0,05}$ )           | 7834<br>( $\chi_{05,DM}$ )    | 5,5       |
| Mittelwert          | 11000<br>( $E_{0,mean}$ )        | 11673<br>(MW)                 | 5,8       |

Tab. 3.9 Gegenüberstellung des 5%-Quantil- und des Mittelwertes der E-Module lt. ON EN 338 [8] (C24) und der bei Serie T-8 ermittelten lokalen Biege-E-Module lt. Tab. 3.8

In der Abb. 3.21 ist die empirische Summenhäufigkeitsfunktion (empD) der ermittelten Biegefestigkeiten  $f_{m,u}$  und die Lage der einzelnen Prüfungen dargestellt.

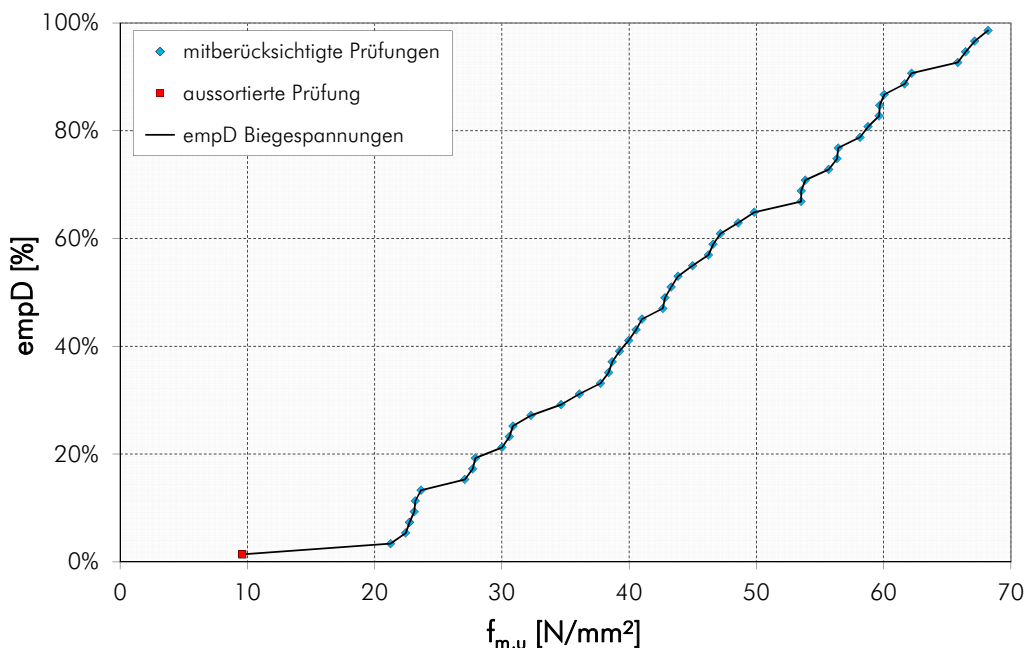


Abb. 3.21 Empirische Häufigkeitsverteilung der Biegefestigkeit  $f_{m,u}$  der Serie T-8 zum Zeitpunkt des Versagens und die Lage der einzelnen Prüfungen (Abkürzungen lt. Abschnitt 3.1.1)

Die empirische Häufigkeitsverteilung der Biegefestigkeiten in Abb. 3.21 weist erwartungsgemäß eine hohe Streuung auf. Die Bandbreite der Werte liegt (exklusive der Prüfung Nr. PA10-124-1\_S4a-02), wie in Tab. 3.8 ersichtlich, zwischen 21,3 N/mm<sup>2</sup> und 68,3 N/mm<sup>2</sup>.

Aus der Tab. 3.10 ist ebenfalls ersichtlich, dass der bei der Prüfdurchführung ermittelte charakteristische Wert ( $X_{k,EN 14358}$ ) annähernd dem geforderten Wert der Biegefestigkeit ( $f_{m,k}$ ) der Festigkeitsklasse C24 lt. ON EN 338 [8] entspricht.

|                         | $f_m$ (C24)<br>lt. ON EN 338 [8] | $f_{m,u}$ (Serie T-8)<br>lt. Tab. 3.8 | Differenz |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------|
|                         | [N/mm <sup>2</sup> ]             | [N/mm <sup>2</sup> ]                  | [%]       |
| charakteristischer Wert | 24,0<br>( $f_{m,k}$ )            | 22,6<br>( $X_{k,EN 14358}$ )          | 6,2       |

Tab. 3.10 Gegenüberstellung des charakteristischen Wertes der Biegefestigkeit der Festigkeitsklasse C24 (lt. ON EN 338 [8]) und der bei Serie T-8 ermittelten Biegefestigkeit lt. Tab. 3.8



## 4 Diskussion



Zu Beginn dieses Kapitels erfolgt eine Auflistung der aufgrund von Vorschädigungen aussortierten Prüfträger sowie eine Beschreibung der für einen Teil der nachfolgenden Plots durchgeführten Korrekturen.

Darauf folgend sind die ermittelten Plots dargestellt. Hierbei wird im Speziellen die Abhängigkeit der Schubfestigkeit zu den Größeneinflüssen sowie den Festigkeitsklassen untersucht.

## 4.1 Vorsortierung der Prüfdaten

Bereits bei den empirischen Häufigkeitsverteilungen (empD) des Kapitels 3 wurden Prüfträger, die aufgrund von Vorschädigungen wie Trockenrisen oder Rindeneinschlüssen im Prüfquerschnitt (Steg) frühzeitig versagten, mit der Versagensbezeichnung S\_VS gekennzeichnet. Diese werden nachfolgend einer genaueren Betrachtung unterzogen.

Da der reine (nicht vorgeschädigte) Prüfquerschnitt untersucht werden sollte, wurden die vorgeschädigten Prüfträger aussortiert. Diese Prüfträger werden in den nachfolgenden Plots, in denen ein Verhältnis zur Schubfestigkeit dargestellt ist, nicht mitberücksichtigt.

Für eine baupraktische Anwendung ist die Einführung eines Abminderungsfaktors für gerissene Träger anzudenken. Da diese Träger (siehe empD Kapitels 3) meist deutlich geringere Schubfestigkeiten aufweisen.

### Serie T-1:

Bei dieser Serie konnte bei einem Träger eine festigkeitsbeeinflussende Vorschädigung festgestellt werden. Dies war der Träger T1\_15 (Abb. 4.1), welcher aufgrund von Trockenrisen auf Schub versagte.



Abb. 4.1 Vorschädigung und Bruch des Trägers T1\_15 (Trockenrisse)

### Serie T-2:

Bei dieser Serie konnten an drei Trägern festigkeitsbeeinflussende Vorschädigungen festgestellt werden. Dies waren der Träger T2\_21 (Abb. 4.2) und der Träger T2\_22 (Abb. 4.3), die aufgrund von Trockenrisen und der Träger T2\_34 (Abb. 4.4), welcher aufgrund von Rindeneinschlüssen, auf Schub versagten.



Abb. 4.2 Vorschädigung und Bruch des Trägers T2\_21 (Trockenrisse)



Abb. 4.3 Vorschädigung und Bruch des Trägers T2\_22 (Trockenrisse)



Abb. 4.4 Vorschädigung und Bruch des Trägers T2\_34 (Rindeneinschlüsse)

### Serie T-3:

Bei dieser Serie konnte an einem Träger eine festigkeitsbeeinflussende Vorschädigung festgestellt werden. Dies war der Träger T3\_06 (Abb. 4.5), welcher aufgrund von Trockenrisse auf Schub versagte.



Abb. 4.5 Vorschädigung und Bruch des Trägers T3\_06 (Trockenrisse)

### Serie T-4:

Bei dieser Serie konnten keine festigkeitsbeeinflussenden Auffälligkeiten aufgrund von Vorschädigungen bzw. starken Abweichungen im Verlauf der empD in Abb. 3.13 festgestellt werden.

### Serie T-5:

Bei dieser Serie konnte an zwei Trägern eine festigkeitsbeeinflussende Vorschädigung festgestellt werden. Dies waren der Träger T5\_06 (Abb. 4.6) und der Träger T5\_19 (Abb. 4.7), die aufgrund von Trockenrissen auf Schub versagten.

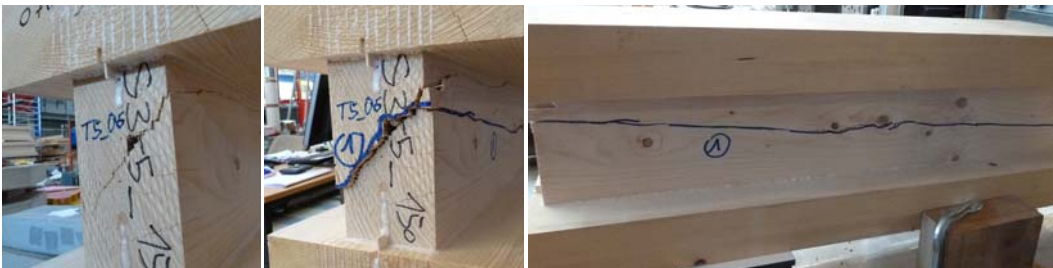


Abb. 4.6 Vorschädigung und Bruch des Trägers T5\_06 (Trockenrisse)



Abb. 4.7 Vorschädigung und Bruch des Trägers T5\_19 (Trockenrisse)

### Serie T-6:

Bei dieser Serie konnte an sechs Trägern festigkeitsbeeinflussende Vorschädigungen festgestellt werden. Dies waren der Träger T6\_04 (Abb. 4.8), der Träger T6\_06 (Abb. 4.9), der Träger T6\_10 (Abb. 4.10), der Träger T6\_13 (Abb. 4.11), der Träger T6\_14 (Abb. 4.12) sowie der Träger T6\_16 (Abb. 4.13), die alle aufgrund von Trockenrissen auf Schub versagten.





Abb. 4.8 Vorschädigung und Bruch des Trägers T6\_04 (Trockenrisse)



Abb. 4.9 Vorschädigung und Bruch des Trägers T6\_06 (Trockenrisse)



Abb. 4.10 Vorschädigung und Bruch des Trägers T6\_10 (Trockenrisse)



Abb. 4.11 Vorschädigung und Bruch des Trägers T6\_13 (Trockenrisse)



Abb. 4.12 Vorschädigung und Bruch des Trägers T6\_14 (Trockenrisse)



Abb. 4.13 Vorschädigung und Bruch des Trägers T6\_19 (Trockenrisse)

### Serie T-7:

Bei dieser Serie konnten an einem Träger, welcher auch im Verlauf der empD lt. Abb. 3.19 im untersten Bereich lag, Auffälligkeiten festgestellt werden. Dies war der Träger T7\_27, welcher aufgrund von Astansammlungen und Rindeneinschlüssen im Steg und Untergurt frühzeitig auf Biegezug (Abb. 4.12) versagte.



Abb. 4.14 Bruch des Trägers T7\_27 (Astansammlungen)

### Serie T-8:

Bei dieser Serie konnten an einem Träger, welcher bereits im Verlauf der empD in Abschnitt 3.9 einen unteren Extremwert darstellte und gesondert gekennzeichnet wurde, Auffälligkeiten festgestellt werden. Dies war der Träger S4a\_02, welcher aufgrund von Astansammlungen im Bereich des maximalen Biegemomentes (Abb. 4.13) frühzeitig versagte.



Abb. 4.15 Bruch des Trägers S4a\_02 (Astansammlungen)

## 4.2 Korrekturen

Nachfolgend werden die, bei einem Teil der im Abschnitt 4.3 dargestellten Plots, durchgeführten Korrekturen erläutert und die ihnen zugrunde liegenden Überlegungen angeführt.

### 4.2.1 Korrektur aufgrund des Fehlers zwischen Stab- und Scheibentheorie, ermittelt auf Basis einer FE-Studie (Gatternig [25])

Wie bereits in Abschnitt 2.5.3 erwähnt, wurden alle Festigkeitswerte entsprechend der Prüfnorm ON EN 408 [5] nach der Stabtheorie ermittelt.

Aufgrund des geringen  $l_{ef}/h_{Pr-QS}$ -Verhältnisses (siehe Abb. 2.7), was eine signifikante Verletzung der Randbedingungen für die Anwendung der Stabtheorie darstellt, erfolgte eine FE-Studie [25], welche diese Abweichungen ermittelte. Im Zuge der Studie wurde eine Einheitslast von  $F = 300$  kN verwendet. Mittels dieser konnte die maximale Schubspannung  $\tau_{xy,ST}$  zufolge Stabtheorie (lt. Glg. 2.16) bestimmt werden und mit den in der Mitte des Schubfeldes ermittelten maximalen Schubspannungen  $\tau_{xy,FE}$  zufolge der FE-Modellierung (genaue Vorgehensweise siehe Gatternig [25]) verglichen werden.

Der Vergleich führte wie aus Abb. 4.16 („Prüfbereich“) ersichtlich, zu Abweichungen von rund 20%.

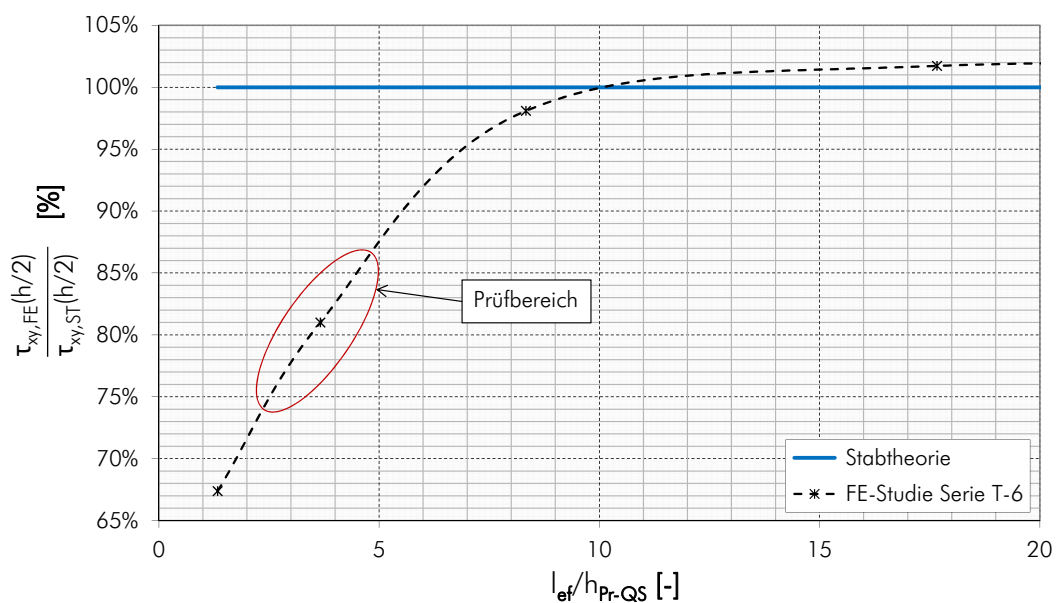


Abb. 4.16 Darstellung des Verlaufes der Abweichungen der Schubspannung  $\tau_{xy}(h/2)$  zwischen Stabtheorie und FE-Modell in Abhängigkeit zum  $l_{ef}/h_{Pr-QS}$ -Verhältnis entsprechend der FE-Studie an der Serie T-6 (nach Gatternig [25])

In den nachfolgenden Plots (Abschnitt 4.3) sind die, entsprechend der Tab. 4.1 korrigierten Ergebnisse, mit dem Index  $f_{v, \text{kor}, 12}$  gekennzeichnet.

Die Tab. 4.1 zeigt die Prüfquerschnittshöhe  $h_{\text{Pr-QS}}$ , die bei der Prüfdurchführung vorhandene Länge der Schubfläche  $l_{\text{ef}}$ , deren Verhältnis ( $l_{\text{ef}}/h_{\text{Pr-QS}}$ ) sowie die aus Abb. 4.16 ermittelte Abweichung zwischen Scheibentheorie ( $\tau_{xy, \text{FE}}$ ) und Stabtheorie ( $\tau_{xy, \text{ST}}$ ) für die einzelnen Prüferien.

|           |   |                            |                         | Verhältnis   |
|-----------|---|----------------------------|-------------------------|--|
|           | $l_{\text{ef}}/h_{\text{Pr-QS}}$<br>[-] | $h_{\text{Pr-QS}}$<br>[mm] | $l_{\text{ef}}$<br>[mm] | $\tau_{xy, \text{FE}}/\tau_{xy, \text{ST}}$<br>[%] |
| Serie T-1 | 4,1                                     | 75                         | 307                     | 83%  |
| Serie T-2 | 3,6                                     | 145                        | 525                     | 81%  |
| Serie T-3 | 2,5                                     | 150                        | 382                     | 75%  |
| Serie T-4 | 3,5                                     | 150                        | 532                     | 80%  |
| Serie T-5 | 4,0                                     | 150                        | 607                     | 83%  |
| Serie T-6 | 3,9                                     | 300                        | 1168                    | 82%  |
| Serie T-7 | 3,8                                     | 80                         | 303                     | 81%  |

Tab. 4.1 Verhältniswerte der Schubspannungen in Abhängigkeit des  $l_{\text{ef}}/h_{\text{Pr-QS}}$ -Verhältnisses der unterschiedlichen Serien (entsprechend Abb. 4.16)

## 4.2.2 „Maximum Likelihood Estimation“ (MLE) für rechts zensierte Daten

Aus der Prüfdurchführung lagen rechts zensierte Daten vor, weil lediglich ein Teil der Prüfträger (101 der 221 Prüfträger) zufolge Schub im Prüfquerschnitt (Steg) versagte und bei den restlichen Trägern das vorhandene Potenzial hinsichtlich ihrer Schubfestigkeit nicht voll ausgenutzt werden konnte.

Daher erfolgte eine Korrektur mithilfe der MLE für rechts zensierte Daten, mit der es möglich ist, die Verteilung der unzensierten Schubfestigkeiten abzuschätzen.

Für diese Korrektur wurden die, in Abschnitt 4.1 beschriebenen Prüfträger aufgrund ihrer Vorschädigung nicht mitberücksichtigt.

Zur Ermittlung der korrigierten Daten kamen die nachfolgende Glg. 4.1 und Glg. 4.2 zur Anwendung.

Die logarithmische „Likelihood“- Funktion ergibt sich zu:

$$\ln[L(\hat{\theta})] = \max_{\theta} [\ln L(\theta)] \quad 4.1$$



mit der verwendeten „Likelihood“- Funktion  $L(\theta)$  zu:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f_X(x_i|\theta)^{d_i} \cdot [1 - F_X(x_i|\theta)]^{1-d_i} \quad 4.2$$

$$\text{mit } d_i = \begin{cases} 1, & \text{Schubbruch Steg } (f_v) \\ 0, & \text{sonstige Brüche} \end{cases}$$

Entsprechend des JCSS [27] ist für Schubfestigkeiten eine zwei-parametrische Lognormalverteilung als Verteilungsmodell (DM) zu verwenden.

In der nachfolgenden Tab. 4.2 sind die mithilfe der MLE korrigierten Kenngrößen sowie die nochmals nach der FE-Studie korrigierten Kenngrößen für die einzelnen Serien dargestellt.

|                 | Serie T-1 | Serie T-2 | Serie T-3 | Serie T-4 | Serie T-5 | Serie T-6 | Serie T-7 |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Anzahl          | 39        | 31        | 10        | 40        | 38        | 14        | 35        |
| mean            | 8,85      | 7,47      | 6,91      | 6,86      | 7,15      | 5,31      | 8,45      |
| COV             | 12,5%     | 24,4%     | 11,9%     | 12,5%     | 28,6%     | 27,1%     | 7,5%      |
| stand. dev.     | 1,11      | 1,82      | 0,82      | 0,86      | 2,05      | 1,44      | 0,64      |
| DM              | 2pLND     | 2pLND     | 2pLND     | 2pLND     | 2pLND     | 2pLND     | 2pLND     |
| korr. FE-Studie | 83%       | 81%       | 75%       | 80%       | 83%       | 82%       | 81%       |
| mean korr.      | 7,35      | 6,05      | 5,18      | 5,49      | 5,94      | 4,35      | 6,84      |
| COV korr.       | 15,1%     | 30,1%     | 15,9%     | 15,6%     | 34,5%     | 33,0%     | 9,3%      |

Tab. 4.2 Übersicht über die mithilfe der MLE ermittelten unzensierten Kenngrößen (oben), unten sind die mithilfe der FE-Studie korrigierten unzensierten Kenngrößen dargestellt

## 4.3 Statistische Untersuchungen

Die in Kapitel 3 dargestellten Prüfdaten werden nachfolgend in Abhängigkeit der unterschiedlichen Kenngrößen, wie z.B. der Prüfquerschnittsbreite, beschrieben. Für die dargestellten Ergebnisse wurden, in Abhängigkeit ihres Einflusses auf die untersuchten Kenngrößen, die zuvor beschriebenen Vorsortierungen sowie Korrekturen mitberücksichtigt.

Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen galt, wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln, der Analyse von Größeneinflüssen auf die Schubfestigkeit sowie der Abhängigkeiten der Schubfestigkeit von der Biegefestigkeit. Die übrigen Verhältnisplots wurden vollständigshalber mit dargestellt.

### 4.3.1 Übersicht über die ermittelten Schubkenngrößen

Um eine Übersicht über die nachfolgend beschriebenen Plots zu schaffen, sind in Abb. 4.17 die Boxplots der zum Zeitpunkt des 1. Teilversagens vorhanden, rechts zensierten Schubspannungen  $\tau_{1,12}$ , der Schubfestigkeiten  $f_{v,1,12}$  (zufolge der auf Schub versagten Prüfträger) sowie der abgeschätzten unzensierten Schubfestigkeiten  $f_{v,MLE,12}$  (mittels MLE korrigiert) dargestellt.

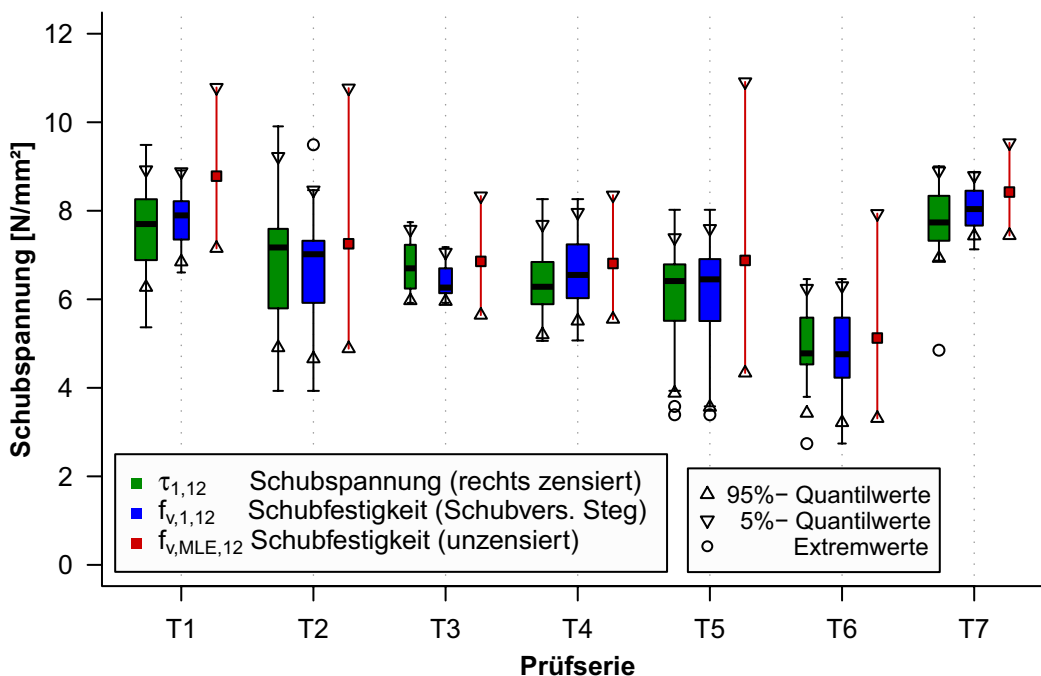


Abb. 4.17 Darstellung der Boxplots der zum Zeitpunkt des 1. Teilversagens vorhandenen rechts zensierten Schubspannung  $\tau_{1,12}$ , der Schubfestigkeit  $f_{v,1,12}$  (zufolge der auf Schub versagten Prüfträger) sowie der unzensierten Schubfestigkeit  $f_{v,MLE,12}$  (korrigiert mithilfe der MLE)

### 4.3.2 Vergleich der Schubfestigkeit mit den Größeneinflüssen

Wie bereits in der Literaturrecherche (Abschnitt 1.5) mittels referenziellen Berichten hinterlegt, besitzt die Größe bzw. die Abmessung des Bauteils einen starken Einfluss auf die Schubfestigkeit. In den folgenden Plots sind diese Abhängigkeiten für die jeweiligen Prüfkörpergeometrien ( $b_{Pr-QS}$ ,  $h_{Pr-QS}$ ,  $A_{Pr-QS}$ ,  $A_S$  sowie  $V_S$ ), für die in dieser Arbeit untersuchten Prüfserien, dargestellt.

Die Aussagekraft der nachfolgenden Modelle richtet sich nach den, in den angefügten Tabellen dargestellten korrigierten Korrelationsmaßen  $R_{adj}$ . Je höher dieser Wert liegt, desto geringer ist die Unsicherheit in den dargestellten Modellen.

#### 4.3.2.1 Beziehung Schubfestigkeit $f_{v,1,12}$ vs. Prüfquerschnittsbreite $b_{Pr-QS}$

In Abb. 4.18 ist die Schubfestigkeit im Verhältnis zur Prüfquerschnittsbreite dargestellt. Zu sehen sind links die Serien T-1 und T-7 mit einer Prüfquerschnittshöhe von rund 80 mm und rechts die Serien T-2 und T-4 mit einer Prüfquerschnittshöhe von rund 150 mm.

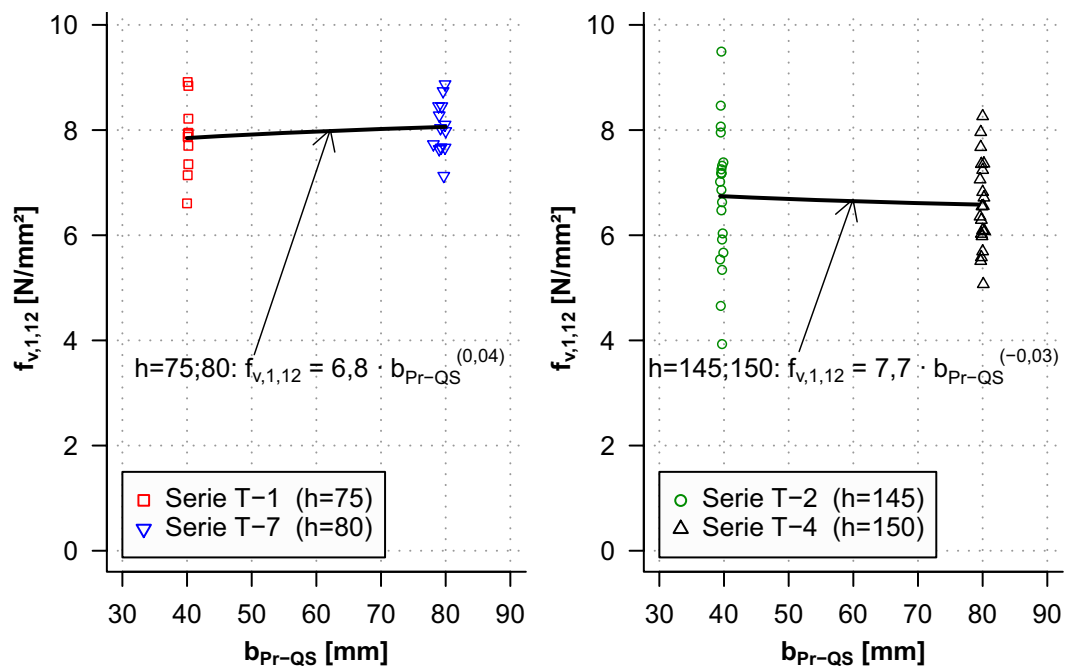


Abb. 4.18 Darstellung der Beziehung Schubfestigkeit  $f_{v,1,12}$  [N/mm<sup>2</sup>] vs. Prüfquerschnittsbreite  $b_{Pr-QS}$  [mm]; links:  $h_{Pr-QS} = 75$  bzw.  $80$  mm; rechts:  $h_{Pr-QS} = 145$  bzw.  $150$  mm

Aus den in Abb. 4.18 und in Tab. 4.3 dargestellten Potenzfunktionen ist ersichtlich, dass die Breite des Prüfträgers die Schubfestigkeit kaum beeinflusst. Diese Abhängigkeit stimmt auch mit den vertiefenden Literaturrecherchen nach Lackner [15] (siehe Abb. 1.11) überein.

|  | Anzahl | Modell<br>$y = A \cdot x^{(B)} + \epsilon$              | $\Sigma e_i$ | $R_{adj}$ | $p$  |
|--|--------|---|--------------|-----------|------|
| $f_{v,1,12}$ vs. $b_{Pr-QS}$ ( $h=75;80$ )   | 23     | $f_{v,1,12} = 6,8 \cdot b_{Pr-QS}^{(0,04)} + \epsilon$  | 0,599        | -0,060    | 0,42 |
| $f_{v,1,12}$ vs. $b_{Pr-QS}$ ( $h=145;150$ ) | 42     | $f_{v,1,12} = 7,7 \cdot b_{Pr-QS}^{(-0,03)} + \epsilon$ | 1,094        | -0,044    | 0,63 |

Tab. 4.3 Übersicht über die Modelle der in Abb. 4.18 dargestellten Potenzfunktionen

### 4.3.2.2 Beziehung Schubfestigkeit $f_{v,1,12}$ vs. Prüfquerschnittshöhe $h_{Pr-QS}$

In der Abb. 4.19 ist die Beziehung zwischen der Schubfestigkeit und der Höhe des Prüfquerschnittes dargestellt. Zu sehen sind die Prüfserien mit den jeweils auf Schub im Steg versagten Prüfträgern sowie die Potenzfunktionen, welche die Abhängigkeit der Schubfestigkeit zur Höhe darstellen (siehe auch Tab. 4.4). Gegeben sind einerseits die Potenzfunktionen für die konstante Breite von  $b = 40$  mm sowie  $b = 80$  mm und andererseits die Potenzfunktion über alle dargestellten Serien, da die Breite, wie zuvor beschrieben, kaum Einfluss auf die Schubfestigkeit besitzt. Zusätzlich ist der korrigierte Verlauf (lt. Abschnitt 4.2.1) über alle Serien dargestellt.

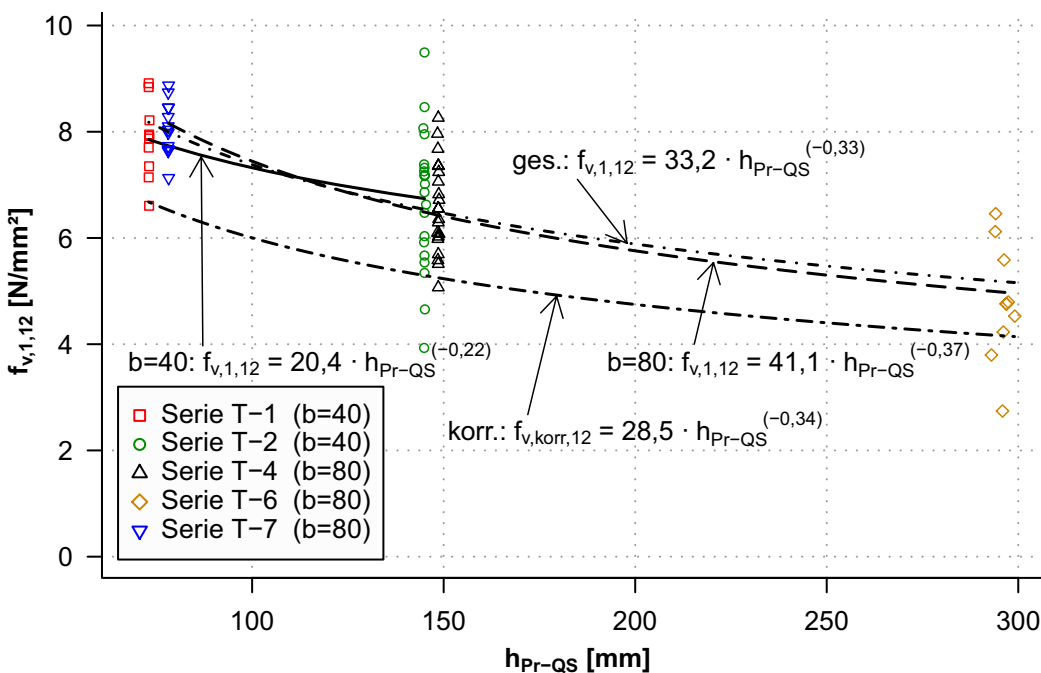


Abb. 4.19 Darstellung der Beziehung Schubfestigkeit  $f_{v,1,12}$  [N/mm<sup>2</sup>] vs. Prüfquerschnittshöhe  $h_{Pr-QS}$  [mm] der Prüfserien

Zu erkennen ist eine deutliche Abhängigkeit der Schubfestigkeit zur Höhe. Verglichen mit den vertiefenden Literaturrecherchen nach Lackner [15] (siehe Abb. 1.10) ist zu erkennen, dass die unkorrigierte Funktion gut mit denen für BSH übereinstimmen, jedoch stark von denen für Vollholz abweichen.

|  | Anzahl | Modell<br>$y = A \cdot x^{(B)} + \epsilon$                  | $\Sigma e_i$ | $R_{adj}$ | $p$  |
|--|--------|---|--------------|-----------|------|
| $f_{v,1,12}$ vs. $h_{Pr-QS}$ (b=40mm)        | 31     | $f_{v,1,12} = 20,4 \cdot h_{Pr-QS}^{(-0,22)} + \epsilon$    | 1,146        | 0,123     | 0,02 |
| $f_{v,1,12}$ vs. $h_{Pr-QS}$ (b=80mm)        | 44     | $f_{v,1,12} = 41,1 \cdot h_{Pr-QS}^{(-0,37)} + \epsilon$    | 0,832        | 0,657     | 0,00 |
| $f_{v,1,12}$ vs. $h_{Pr-QS}$ (gesamt)        | 75     | $f_{v,1,12} = 33,2 \cdot h_{Pr-QS}^{(-0,33)} + \epsilon$    | 0,979        | 0,486     | 0,00 |
| $f_{v,korr,12}$ vs. $h_{Pr-QS}$ (korrigiert) | 75     | $f_{v,korr,12} = 28,5 \cdot h_{Pr-QS}^{(-0,34)} + \epsilon$ | 0,784        | 0,508     | 0,00 |

Tab. 4.4 Übersicht über die Modelle der in Abb. 4.19 dargestellten Potenzfunktionen

#### 4.3.2.3 Beziehung Schubfestigkeit $f_{v,1,12}$ vs. Prüfquerschnitt $A_{Pr-QS}$

In der Abb. 4.20 ist die Schubfestigkeit im Verhältnis zur Prüfquerschnittsfläche dargestellt. Zu sehen ist die Potenzfunktion über die untersuchten Prüfserien sowie dessen (lt. Abschnitt 4.2.1) korrigierter Verlauf.

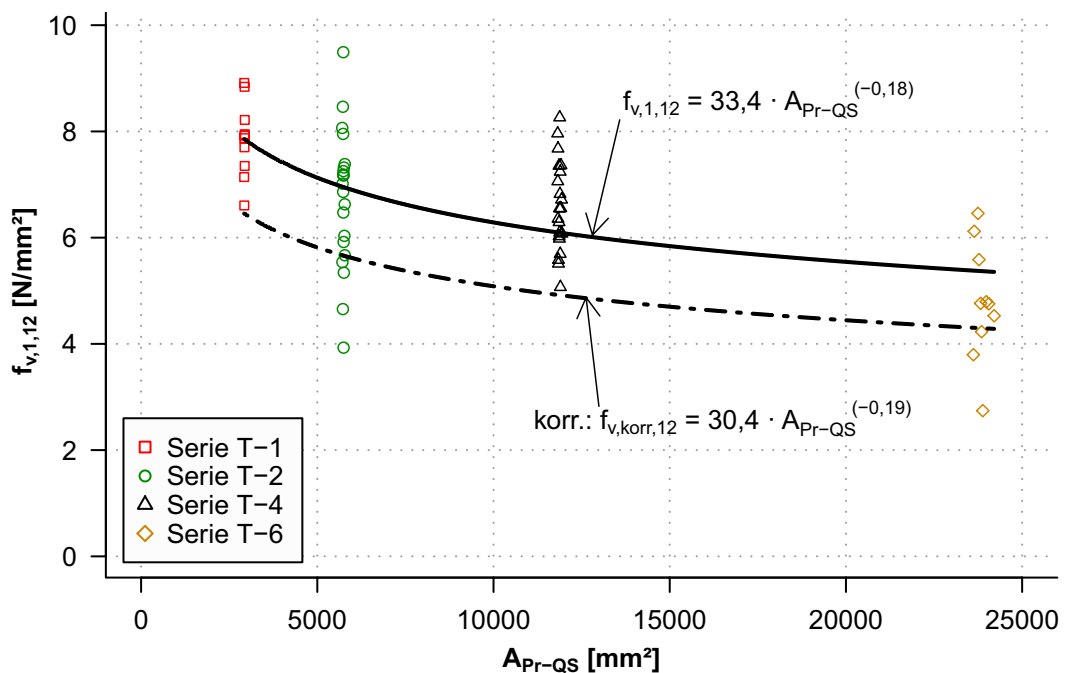


Abb. 4.20 Darstellung der Beziehung Schubfestigkeit  $f_{v,1,12}$  [N/mm<sup>2</sup>] vs. Prüfquerschnitt  $A_{Pr-QS}$  [mm<sup>2</sup>] der Prüfserien

Hier ist ebenfalls eine deutliche Abhängigkeit der Schubfestigkeit zum Prüfquerschnitt zu erkennen, jedoch ist diese im Vergleich zur Höhe (Abb. 4.19) deutlich geringer, da hier auch die in Abb. 4.18 dargestellte Breite, welche kaum Einfluss auf die Schubfestigkeit besitzt, mitwirkt.

|  | Anzahl | Modell<br>$y = A \cdot x^{(B)} + \epsilon$                  | $\Sigma e_i$ | $R_{adj}$ | $p$  |
|--|--------|---|--------------|-----------|------|
| $f_{v,1,12}$ vs. $A_{Pr-QS}$                 | 62     | $f_{v,1,12} = 33,4 \cdot A_{Pr-QS}^{(-0,18)} + \epsilon$    | 1,100        | 0,332     | 0,00 |
| $f_{v,korr,12}$ vs. $A_{Pr-QS}$ (korrigiert) | 62     | $f_{v,korr,12} = 30,4 \cdot A_{Pr-QS}^{(-0,19)} + \epsilon$ | 0,879        | 0,370     | 0,00 |

Tab. 4.5 Übersicht über die Modelle der in Abb. 4.20 dargestellten Potenzfunktionen

4.3.2.4 Beziehung Schubfestigkeit  $f_{v,1,12}$  vs. schubbeanspruchter Fläche  $A_S$

In der Abb. 4.21 ist die Schubfestigkeit im Verhältnis zur schubbeanspruchten Fläche ( $A_S$ ) dargestellt.  $A_S$  setzt sich entsprechend Glg. 2.2 aus der effektiven Länge der Schubfläche  $l_{ef}$  und der Prüfquerschnittsbreite  $b_{Pr-QS}$  (entsprechend den Prüfkörperabmessungen der einzelnen Serien Abschnitt 2.4) zusammen. Zu sehen ist die Potenzfunktion über die untersuchten Prüfserien sowie deren lt. Abschnitt 4.2.1 korrigierter Verlauf.

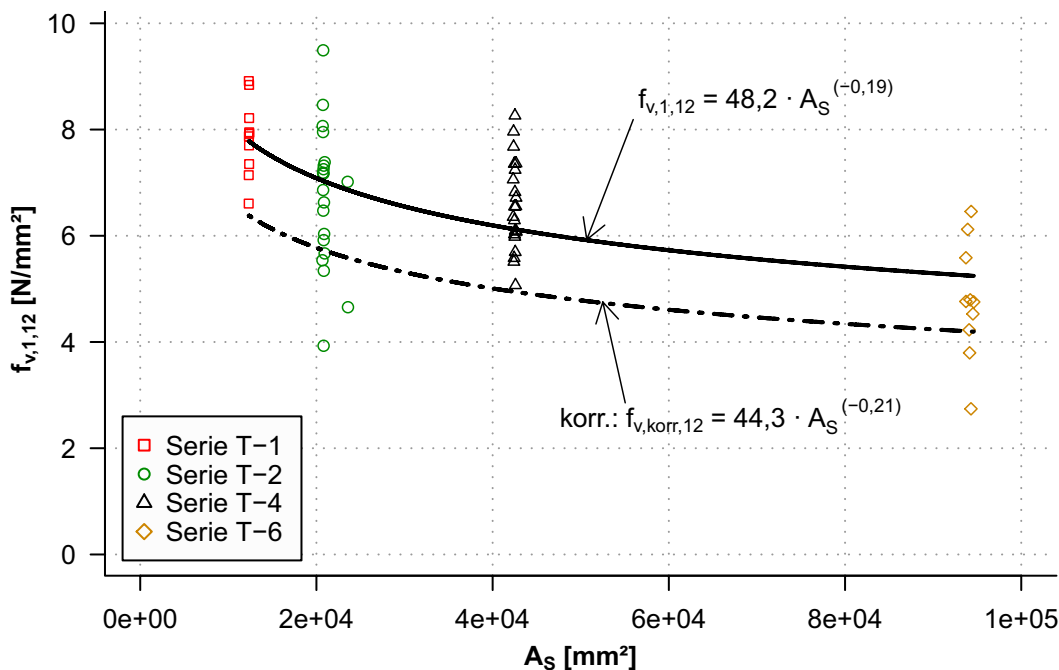


Abb. 4.21 Darstellung der Beziehung Schubfestigkeit  $f_{v,1,12}$  [N/mm<sup>2</sup>] vs. schubbeanspruchter Fläche  $A_S$  [mm<sup>2</sup>] der Prüfserien

Wie in den Literaturrecherchen in Abschnitt 1.5 bereits dargelegt, dient der Parameter der schubbeanspruchten Fläche als guter Schätzer für den Größeneffekt der Schubfestigkeit. Vergleicht stattdessen jedoch das  $R_{adj}$  in Tab. 4.6 mit jenem aus Tab. 4.4, ist zu erkennen, dass die Prüfquerschnittshöhe  $h_{Pr-QS}$  eine deutlich geringere Unsicherheit im Modell aufweist und somit einen noch besseren Schätzer darstellt.

|  | Anzahl | Modell<br>$y = A \cdot x^{(B)} + \epsilon$            | $\Sigma e_i$ | $R_{adj}$ | $p$  |
|--|--------|---|--------------|-----------|------|
| $f_{v,1,12}$ vs. $A_S$                 | 62     | $f_{v,1,12} = 48,2 \cdot A_S^{(-0,19)} + \epsilon$    | 1,087        | 0,348     | 0,00 |
| $f_{v,korr,12}$ vs. $A_S$ (korrigiert) | 62     | $f_{v,korr,12} = 44,3 \cdot A_S^{(-0,21)} + \epsilon$ | 0,872        | 0,380     | 0,00 |

Tab. 4.6 Übersicht über die Modelle der in Abb. 4.21 dargestellten Potenzfunktionen

### 4.3.2.5 Beziehung Schubfestigkeit $f_{v,1,12}$ vs. schubbeanspruchtem Volumen $V_S$

In der Abb. 4.22 ist die Schubfestigkeit im Verhältnis zum schubbeanspruchten Volumen ( $V_S$ ) dargestellt.  $V_S$  setzt sich aus der schubbeanspruchten Fläche  $A_S$  multipliziert mit der Prüfquerschnittshöhe  $h_{Pr-QS}$  (entsprechend den Prüfkörperabmessungen der einzelnen Serien Abschnitt 2.4) zusammen. Zu sehen ist die Potenzfunktion über die untersuchten Prüfserien sowie ihr (lt. Abschnitt 4.2.1) korrigierter Verlauf.

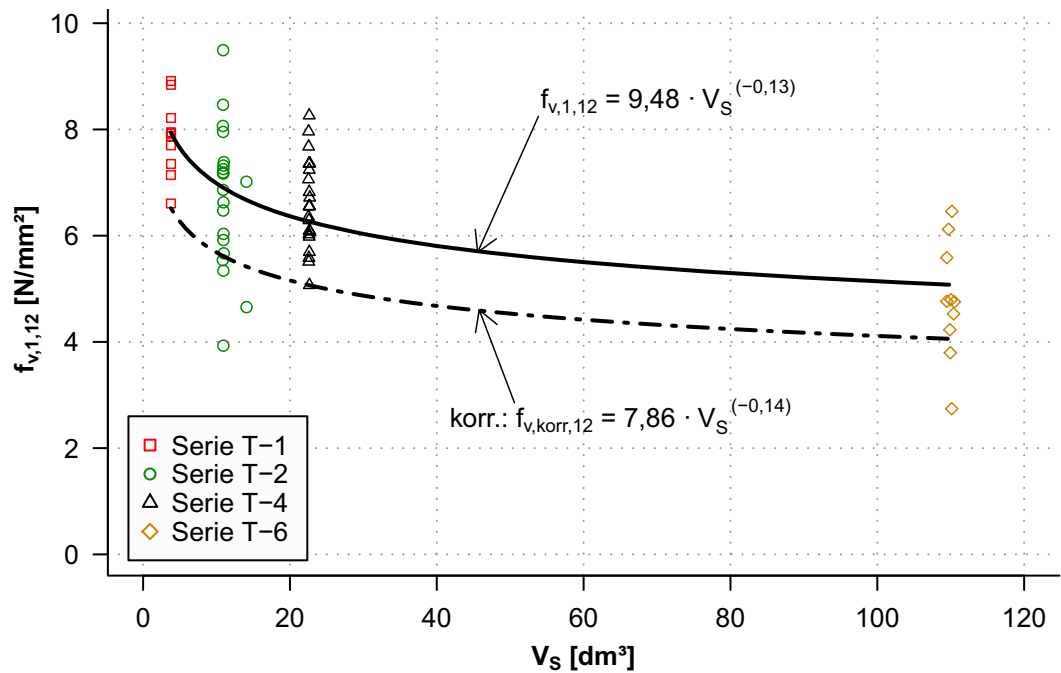


Abb. 4.22 Darstellung der Beziehung Schubfestigkeit  $f_{v,1,12}$  [N/mm<sup>2</sup>] vs. schubbeanspruchtem Volumen  $V_S$  [mm<sup>3</sup>] der Prüfserien

Die hier dargestellte unkorrigierte Potenzfunktion ist gut mit jenen aus der Literaturrecherche in Abschnitt 1.5 (Abb. 1.9 bzw. Glg. 1.13) vergleichbar, wobei in Abb. 1.9 der Verlauf für BSH das in Abb. 4.22 dargestellte Modell besser widerspiegelt.

|  | Anzahl | Modell<br>$y = A \cdot x^{(B)} + \epsilon$            | $\Sigma e_i$ | $R_{adj}$ | $p$  |
|--|--------|---|--------------|-----------|------|
| $f_{v,1,12}$ vs. $V_S$                 | 62     | $f_{v,1,12} = 9,48 \cdot V_S^{(-0,13)} + \epsilon$    | 1,048        | 0,393     | 0,00 |
| $f_{v,korr,12}$ vs. $V_S$ (korrigiert) | 62     | $f_{v,korr,12} = 7,86 \cdot V_S^{(-0,14)} + \epsilon$ | 0,841        | 0,423     | 0,00 |

Tab. 4.7 Übersicht über die Modelle der in Abb. 4.22 dargestellten Potenzfunktionen

Vergleicht stattdessen das  $R_{adj}$  aus Tab. 4.5 ( $A_{Pr-QS}$ ) und Tab. 4.6 ( $A_S$ ) mit jenem aus Tab. 4.7 ( $V_S$ ), ist zu erkennen, dass die Schätzung der Schubfestigkeit durch den Parameter des schubbeanspruchten Volumens eine geringere Unsicherheit aufweist, jedoch das  $R_{adj}$  der Prüfquerschnittshöhe Tab. 4.4 ( $h_{Pr-QS}$ ) noch höher liegt und somit die beste Aussagekraft der hier dargestellten Modelle liefert.

### 4.3.3 Vergleich der Schubfestigkeit mit den Festigkeitsklassen

Da, wie bereits im Abschnitt 1.4 beschrieben, die Schubfestigkeit lt. der aktuellen ON EN 337 [8] (siehe auch Abb. 4.25) von den Festigkeitsklassen abhängig ist, wird mithilfe der nachfolgenden Plots diese postulierte Abhängigkeit näher erörtert.

#### 4.3.3.1 Vergleich der Schubfestigkeit mit Steifigkeitseigenschaften und Rohdichten

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Abhängigkeiten zwischen den, in den Prüfungen ermittelten Schubfestigkeiten  $f_{v,1,12}$  und den Rohdichten  $\rho_{12}$  (Abb. 4.23) einerseits sowie den lt. Glg. 2.1 aus den dynamischen E-Modulen abgeschätzten statischen E-Modulen  $E_{t,0,12,est}$  (Abb. 4.24) andererseits, dargestellt.

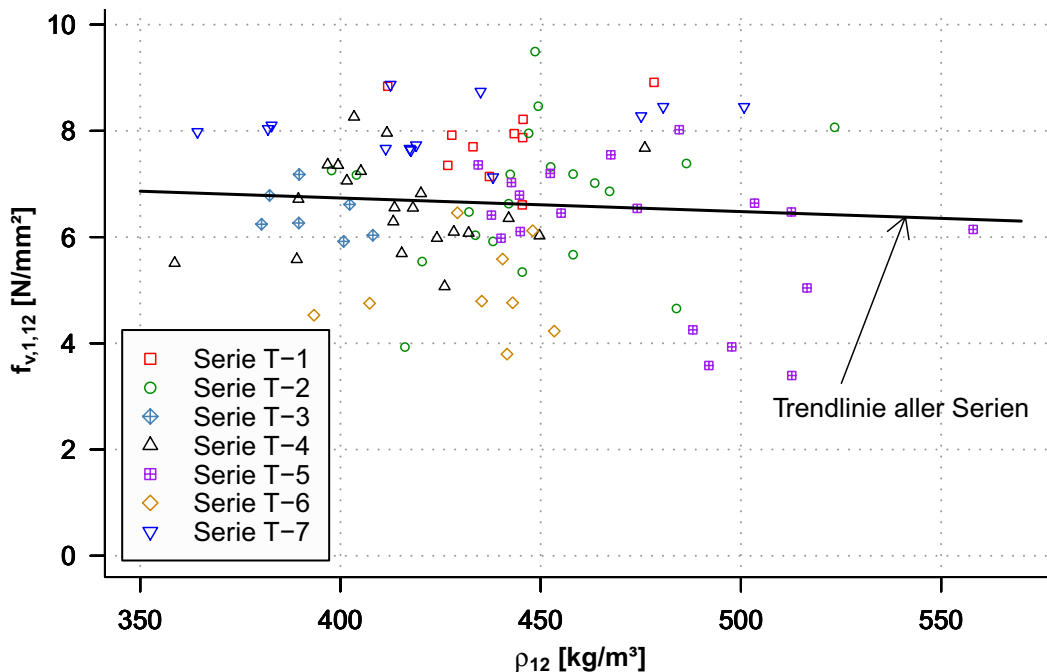


Abb. 4.23 Darstellung der Beziehung Schubfestigkeit  $f_{v,1,12}$  [N/mm<sup>2</sup>] vs. Rohdichte  $\rho_{12}$  [kg/m<sup>3</sup>] aller Serien



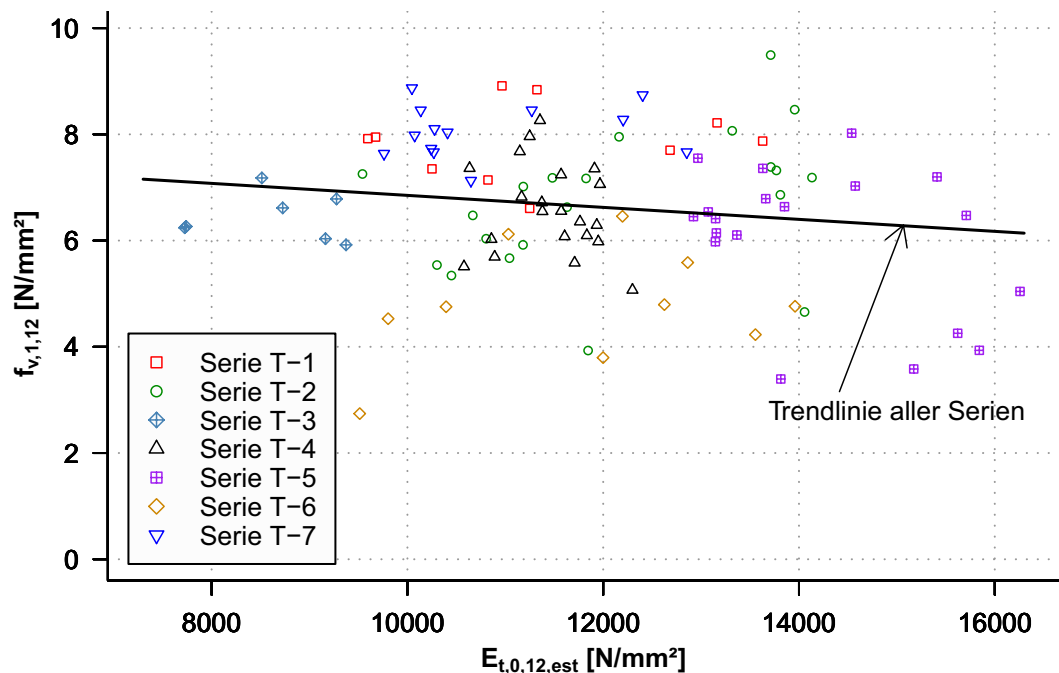


Abb. 4.24 Darstellung der Beziehung Schubfestigkeit  $f_{v,1,12}$  [N/mm<sup>2</sup>] vs. E-Modul  $E_{t,0,12,est}$  [N/mm<sup>2</sup>] aller Serien

Aus den Abbildungen ist keine Steigerung der Schubfestigkeit mit zunehmender Rohdichte bzw. zunehmenden E-Modulen erkennbar. Entgegen der ON EN 337 [8] ist anhand der Trendlinien in beiden Abbildungen (Abb. 4.23 und Abb. 4.24) ein leichter Abfall der Schubfestigkeit erkennbar.

#### 4.3.3.2 Vergleich der Schubfestigkeit mit der Biegefestigkeit

In der Abb. 4.25 sind die Abhängigkeiten zwischen der charakteristischen Biegefestigkeit  $f_{m,k}$  der ON EN 337 [8] und den Schubfestigkeiten  $f_v$  dargestellt. Zu sehen ist der Verlauf der 5%- und 50%-Quantile der Schubfestigkeiten aus den Serien T-3, T-4 und T-5 (beide Verläufe wurden entsprechend Abschnitt 4.2 korrigiert). Außerdem ist die Funktion der charakteristischen Schubfestigkeit in Abhängigkeit zur charakteristischen Biegefestigkeit lt. ON EN 337 (2009) [8] (Glg. 1.4) und (2003) [9] (Glg. 1.3) dargestellt.

Wie in Abschnitt 2.1.3 beschrieben, wurden die Serien T-3, T-4 und T-5 in Bezug auf deren mittleren E-Modul den Festigkeitsklassen C16, C24 und C40 zugeordnet. Für die Serie T-4 wurde zusätzlich die Biegefestigkeit mittels 4-Punkt-Biegeprüfungen lt. ON EN 408 [5] ermittelt (Serie T-8). Wie im Abschnitt 3.9 beschrieben, entsprechen die Prüfkörper der Serie T-8 der Festigkeitsklasse C24, wobei die Serie T-4 aus derselben Grundgesamtheit entnommen wurde und infolgedessen auch dieselbe Biegefestigkeit angenommen werden kann.

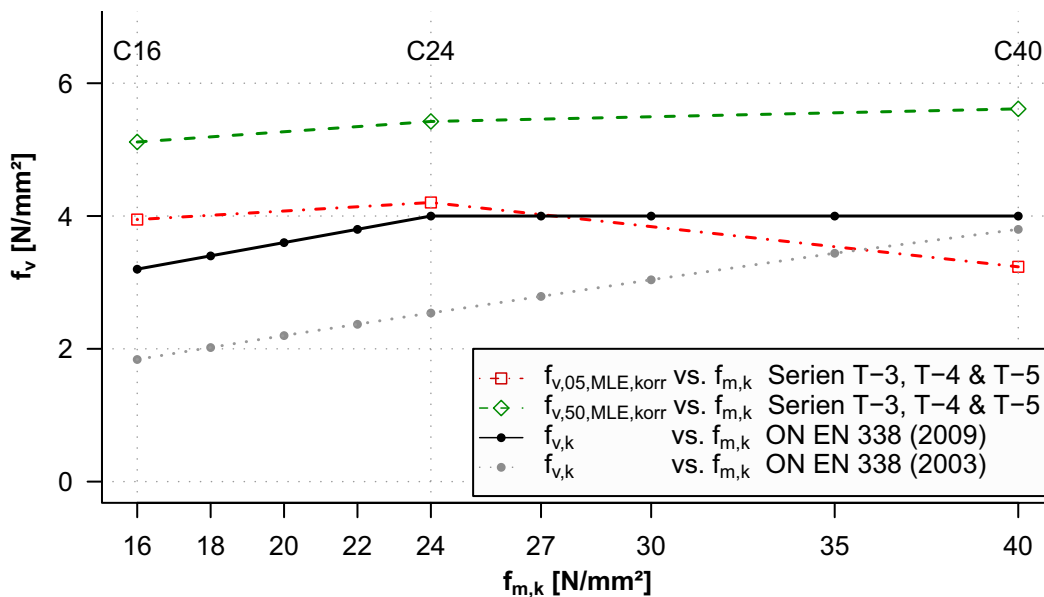


Abb. 4.25 Darstellung der Beziehung Schubfestigkeit  $f_v$  [N/mm<sup>2</sup>] vs. der charakteristischen Biegefestigkeit  $f_{m,k}$  [N/mm<sup>2</sup>] der Prüfserien T-3, T-4 und T-5 sowie der ON EN 338 (2009) [8] und (2003) [9]

Wie bereits in der Forschungsarbeit an Brettschichtholz von Schickhofer [35] beschrieben, ist auch für Vollholz (siehe Abb. 4.25) kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Schubfestigkeit und der Biegefestigkeit festzustellen. Die in der ON EN 338 [8] beschriebene positive Abhängigkeit der Schubfestigkeit von der Festigkeitsklasse kann nicht bestätigt werden, jedoch lag für die Serie T-3 (C16) keine aussagekräftige Anzahl an Prüfkörpern vor. Für die Serie T-5 (C40) konnte ein Abfall der 5%-Quantilen Schubfestigkeit gegenüber jener der Serie T-4 (C24) bzw. der ON EN 338 [8] festgestellt werden. Dieser Abfall kann auf die hohe Streuung in dieser Serie (COV=34,5% lt. Tab. 4.2) zurückgeführt werden (siehe Abb. 3.15 und Abb. 4.17), da auch der Verlauf der 50%-Quantil Werte dies nicht bestätigen kann.

Zusätzlich ist anzumerken, dass die Funktion der seit 2009 gültigen ON EN 338 [8] im Vergleich zu der bis 2003 [9] gültigen eine bessere Anpassung an den beobachteten Verlauf darstellt, jedoch bei den unteren Festigkeitsklassen noch deutlich abweicht.

#### 4.3.4 Schubmodulverhältnisse der Serie T-6

In den nachfolgenden Abb. 4.26 und Abb. 4.27 sind die bei der Serie T-6 ermittelten Schubmodule  $G_{090,12,SF}$  im Verhältnis zur Rohdichte  $\rho_{12}$ , dem E-Modul  $E_{t,0,12,est}$  und der Schubfestigkeit  $f_{v,1,12}$  dargestellt. Für den Schubmodul wurde der Mittelwert aus vier Messungen (wie in Abschnitt 2.4.7.1 beschrieben) verwendet, wobei die in Abschnitt 4.1 aussortierten Prüfräger aufgrund ihrer Vorschädigung nicht mitberücksichtigt wurden.

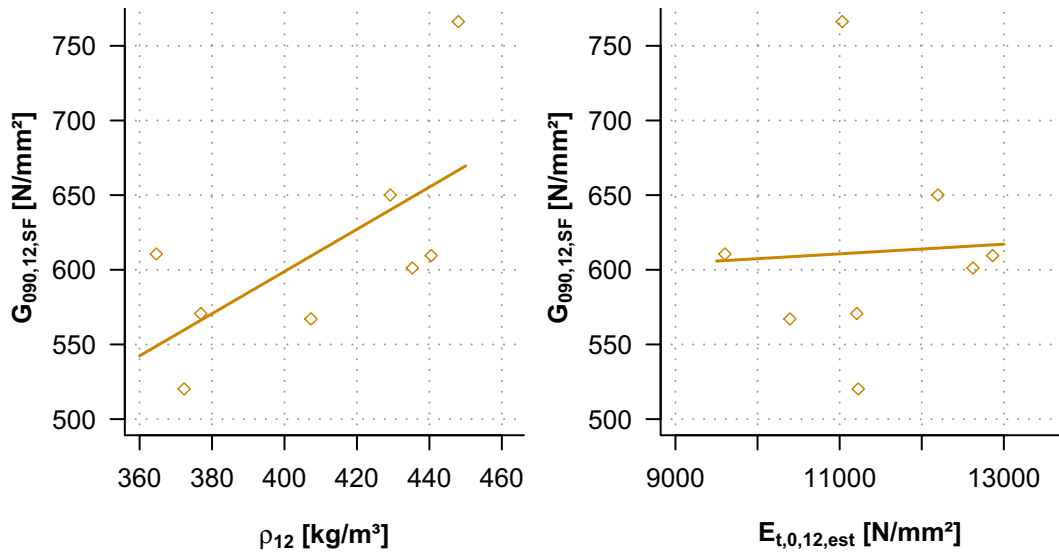


Abb. 4.26 Darstellung der Beziehung zwischen Schubmodul  $G_{090,12,SF}$  [N/mm<sup>2</sup>] und der Rohdichte  $\rho_{12}$  [kg/m<sup>3</sup>] (links) sowie dem E-Modul  $E_{t,0,12,est}$  [N/mm<sup>2</sup>] (rechts) der Serie T-6

In Abb. 4.26 (links) ist deutlich zu erkennen, dass der Schubmodul mit steigender Rohdichte zunimmt. Hingegen ist in Abb. 4.26 (rechts) zu erkennen, dass der E-Modul kaum Einfluss auf den Schubmodul besitzt. Dies steht jedoch im Gegensatz zur ON EN 338 [8], welche für den Schubmodul eine direkte Abhängigkeit vom E-Modul ( $G_{mean} = E_{0,mean}/16$ ) vorsieht.

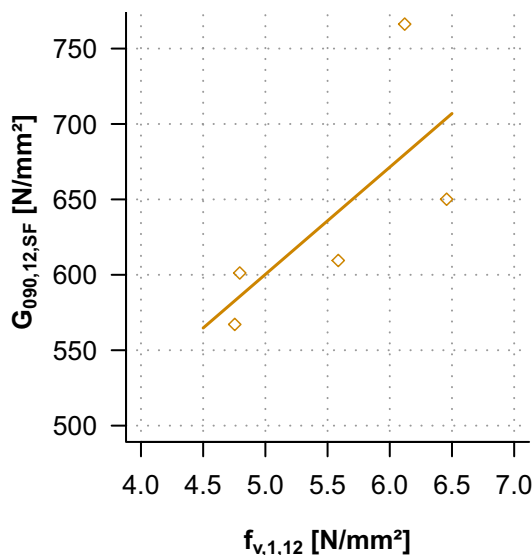


Abb. 4.27 Darstellung der Beziehung Schubmodul  $G_{090,12,SF}$  [N/mm<sup>2</sup>] vs. Schubfestigkeit  $f_{v,1,12}$  [N/mm<sup>2</sup>] der Serie T-6

Obwohl aufgrund der Vorsortierung und des teilweisen Versagens der Prüfträger auf Schub im Übergangsbereich (keine Daten für die Schubfestigkeit vorhanden) nur fünf Prüfträger übrig blieben, ist in Abb. 4.27 eine deutliche Abhängigkeit des Schubmoduls von der Schubfestigkeit erkennbar.

### 4.3.5 Verhältnis Rohdichte zu E-Modul

Die nachfolgenden Verhältnisplots zeigen den Zusammenhang zwischen den Rohdichten  $\rho_{12}$  und den lt. Glg. 2.1 aus den dynamischen E-Modulen abgeschätzten statischen E-Modulen  $E_{t,0,12,est}$ . Da weder die Rohdichte, noch der mittels Eigenfrequenzverfahren ermittelte E-Modul von den Vorschädigungen (z.B. Trockenrissen) beeinflusst wird, wurden die in Abschnitt 4.1 beschriebenen Prüfträger hier mitberücksichtigt.

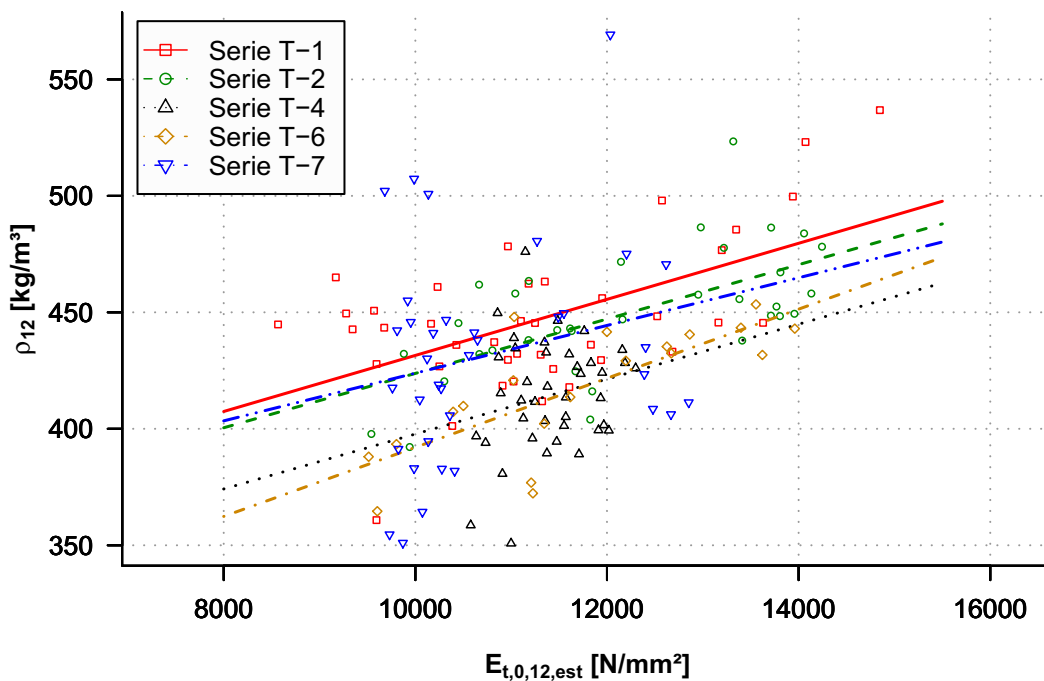


Abb. 4.28 Darstellung der Beziehung Rohdichte  $\rho_{12}$  [kg/m<sup>3</sup>] vs. E-Modul  $E_{t,0,12,est}$  [N/mm<sup>2</sup>] der Serien mit variiertem Prüfquerschnitt

In Abb. 4.28 sind die, wie in Abschnitt 2.1.3 beschriebenen Prüfserien mit der Festigkeitsklasse C24+ (in Anlehnung an die ON EN 338 [8]) dargestellt. Zu sehen ist die Beziehung zwischen der Rohdichte  $\rho_{12}$  und dem E-Modul  $E_{t,0,12,est}$  der einzelnen Prüfserien sowie deren lineare Regressionsgeraden (Modelle siehe Tab. 4.8). Die Serien zeigen die erwartete Abhängigkeit zwischen Rohdichte und E-Modul. Es ist zu sehen, dass die Serie T-4 und T-6 von den anderen Serien abweichen, allerdings alle Serien im Bereich der definierten Festigkeitsklasse C24+ liegen.

Da jedoch, wie bei Abb. 4.24, Abb. 4.25 und Abb. 4.26 beschrieben, weder die Rohdichte, noch der E-Modul einen starken Einfluss auf die Schubfestigkeit aufweisen, können die Schubkenngrößen der, bezüglich des  $\rho_{12}$  zu  $E_{t,0,12,est}$ -Verhältnisses, abweichenden Werte trotzdem herangezogen werden.

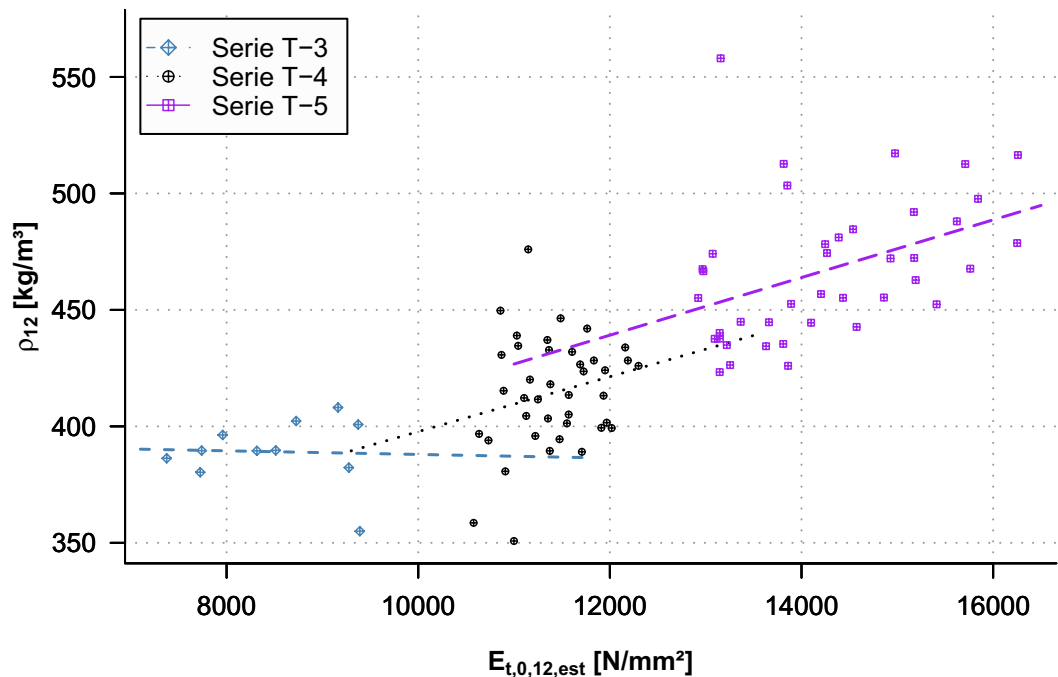


Abb. 4.29 Darstellung der Beziehung Rohdichte  $\rho_{12}$  [kg/m<sup>3</sup>] vs. E-Modul  $E_{t,0,12,est}$  [N/mm<sup>2</sup>] der Serien mit variierten Festigkeitsklasse

In Abb. 4.29 sind die, wie in Abschnitt 2.1.3 beschriebenen, Prüfserien mit variierten Festigkeitsklassen dargestellt. Zu sehen ist ebenfalls die Beziehung zwischen den Rohdichten  $\rho_{12}$  und den E-Modulen  $E_{t,0,12,est}$  der einzelnen Prüfserien sowie deren lineare Regressionsgeraden (Modelle siehe Tab. 4.8). Die Serien T-4 und T-5 zeigen die erwartete Abhängigkeit zwischen Rohdichte und E-Modul. Bei der Serie T-3 ist im Gegensatz dazu kaum eine Abhängigkeit erkennbar, was auf die geringe Anzahl an Prüfkörpern zurückzuführen ist.

|                  | Anzahl | Modell<br>$\ln(y) = k \cdot \ln(x) + d + \epsilon$                     | $\sum e_i$ | $R^2_{adj}$ | $p$  |
|------------------|--------|--|------------|-------------|------|
| <b>Serie T-1</b> | 40     | $\ln(\rho_{12}) = 0,279 \cdot \ln(E_{t,0,12,est}) + 3,501 + \epsilon$  | 0,061      | 0,25        | 0,00 |
| <b>Serie T-2</b> | 34     | $\ln(\rho_{12}) = 0,317 \cdot \ln(E_{t,0,12,est}) + 3,124 + \epsilon$  | 0,047      | 0,38        | 0,00 |
| <b>Serie T-3</b> | 11     | $\ln(\rho_{12}) = -0,019 \cdot \ln(E_{t,0,12,est}) + 6,138 + \epsilon$ | 0,039      | -0,11       | 0,90 |
| <b>Serie T-4</b> | 40     | $\ln(\rho_{12}) = 0,358 \cdot \ln(E_{t,0,12,est}) + 2,677 + \epsilon$  | 0,058      | 0,03        | 0,14 |
| <b>Serie T-5</b> | 40     | $\ln(\rho_{12}) = 0,385 \cdot \ln(E_{t,0,12,est}) + 2,465 + \epsilon$  | 0,058      | 0,16        | 0,01 |
| <b>Serie T-6</b> | 20     | $\ln(\rho_{12}) = 0,420 \cdot \ln(E_{t,0,12,est}) + 2,102 + \epsilon$  | 0,045      | 0,54        | 0,00 |
| <b>Serie T-7</b> | 36     | $\ln(\rho_{12}) = 0,276 \cdot \ln(E_{t,0,12,est}) + 3,499 + \epsilon$  | 0,102      | 0,03        | 0,15 |

Tab. 4.8 Übersicht über die Modelle der in Abb. 4.28 und Abb. 4.29 dargestellten Regressionsgeraden der Serien T-1 bis T-7

### 4.3.6 Serie T-8 (4-Punkt-Biegeprüfungen)

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Verhältnisplots aus den 4-Punkt-Biegeprüfungen (lt. ON EN 408 [5]) der Serie T-8.

Nachfolgend sind die Biegefestigkeiten  $f_{m,u}$  einerseits (Abb. 4.30) und die Rohdichten  $\rho_{12}$  (Abb. 4.31) andererseits, den bei den Prüfungen ermittelten lokalen- ( $E_{m,0,12,lok}$ ) und globalen- ( $E_{m,0,12,glob}$ ) Biege-E-Modulen sowie den nach Lackner [15] ermittelten dynamischen ( $E_{dyn,0,12}$ ) und den daraus abgeschätzten statischen ( $E_{t,0,12,est}$ ) E-Modulen gegenübergestellt.

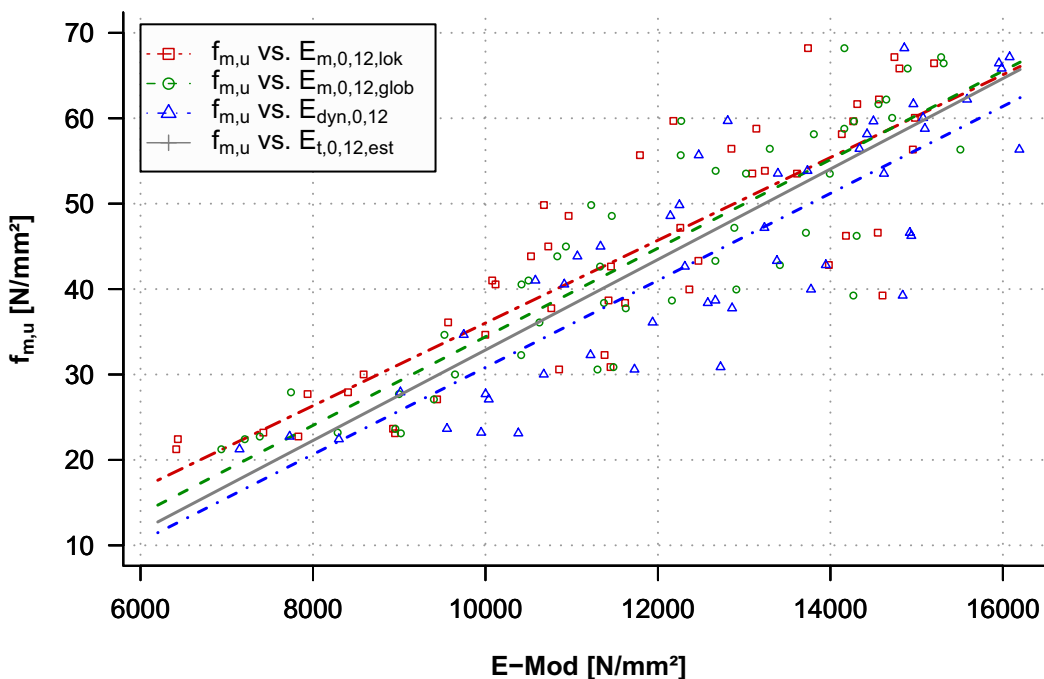


Abb. 4.30 Darstellung der Beziehung Biegefestigkeit  $f_{m,u}$  [N/mm<sup>2</sup>] vs. lokalem- ( $E_{m,0,12,lok}$ ), globalem- ( $E_{m,0,12,glob}$ ), dynamischem- ( $E_{dyn,0,12}$ ) und abgeschätztem statischem- ( $E_{t,0,12,est}$ ) E-Modul [N/mm<sup>2</sup>] der Serie T-8

Aus Abb. 4.30 ist ersichtlich, dass der bei den Prüfserien T-1 bis T-7 verwendete abgeschätzte statische E-Modul ( $E_{t,0,12,est}$ ) im Bereich der höheren E-Module sehr gut mit den Biege-E-Modulen zusammenpasst, jedoch im unteren Bereich zunehmend abweicht. Dies würde für eine steifigkeitsabhängige Korrektur des dynamischen E-Moduls sprechen. Für die hier durchgeführten Untersuchungen ist die ausgeführte Korrektur (lt. Glg. 2.1) allerdings von ausreichender Genauigkeit. Die Modelle für die dargestellten Regressionsgeraden sind der Tab. 4.9 zu entnehmen.

| Serie T-8                       | Anzahl | Modell<br>$\ln(y) = k \cdot \ln(x) + d + \epsilon$                 | $\Sigma e_i$ | $R^2_{adj}$ | $p$  |
|---------------------------------|--------|--|--------------|-------------|------|
| $f_{m,u}$ vs. $E_{m,0,12,lok}$  | 49     | $\ln(f_{m,u}) = 1,31 \cdot \ln(E_{m,0,12,lok}) - 8,51 + \epsilon$  | 0,165        | 0,77        | 0,00 |
| $f_{m,u}$ vs. $E_{m,0,12,glob}$ | 49     | $\ln(f_{m,u}) = 1,43 \cdot \ln(E_{m,0,12,glob}) - 9,66 + \epsilon$ | 0,150        | 0,81        | 0,00 |
| $f_{m,u}$ vs. $E_{dyn,0,12}$    | 49     | $\ln(f_{m,u}) = 1,49 \cdot \ln(E_{dyn,0,12}) - 10,29 + \epsilon$   | 0,170        | 0,75        | 0,00 |
| $f_{m,u}$ vs. $E_{t,0,12,est}$  | 49     | $\ln(f_{m,u}) = 1,49 \cdot \ln(E_{t,0,12,est}) - 10,23 + \epsilon$ | 0,170        | 0,75        | 0,00 |

Tab. 4.9 Übersicht über die Modelle der in Abb. 4.30 (Biegefestigkeit vs. E-Modul) dargestellten Regressionsgeraden der Serie T-8

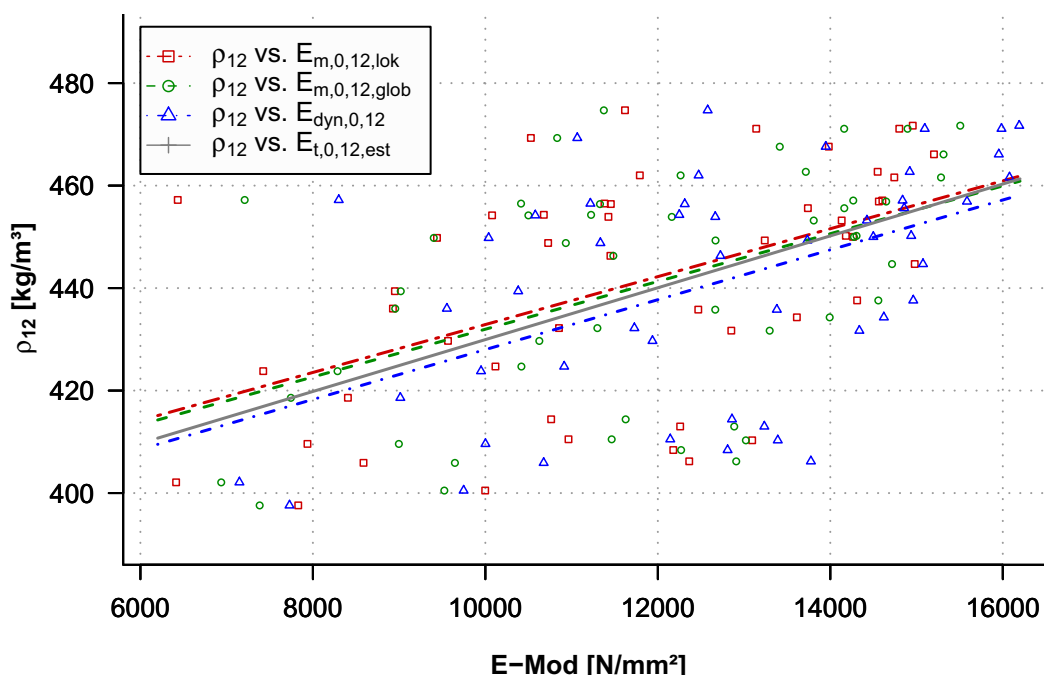


Abb. 4.31 Darstellung der Beziehung Rohdichte  $\rho_{12}$  [kg/m<sup>3</sup>] vs. lokalem- ( $E_{m,0,12,lok}$ ), globalem- ( $E_{m,0,12,glob}$ ), dynamischem- ( $E_{dyn,0,12}$ ) und abgeschätzten statischem- ( $E_{t,0,12,est}$ ) E-Modul [N/mm<sup>2</sup>] der Serie T-8

Für den in Abb. 4.31 dargestellten Vergleich zwischen der Rohdichte und den E-Modulen ist eine deutliche Abhängigkeit erkennbar. Zu sehen ist zusätzlich, dass die Regressionsgerade des abgeschätzten statischen E-Moduls ( $E_{t,0,12,est}$ ) sehr nahe an denen aus den Biegeprüfungen ( $E_{m,0,12,lok}$  und  $E_{m,0,12,glob}$ ) ermittelten (Modelle lt. Tab. 4.10), liegt.

| Serie T-8                         | Anzahl | Modell<br>$\ln(y) = k \cdot \ln(x) + d + \epsilon$                     | $\Sigma e_i$ | $R^2_{adj}$ | $p$  |
|-----------------------------------|--------|--|--------------|-------------|------|
| $\rho_{12}$ vs. $E_{m,0,12,lok}$  | 49     | $\ln(\rho_{12}) = 0,113 \cdot \ln(E_{m,0,12,lok}) + 5,036 + \epsilon$  | 0,045        | 0,23        | 0,00 |
| $\rho_{12}$ vs. $E_{m,0,12,glob}$ | 49     | $\ln(\rho_{12}) = 0,117 \cdot \ln(E_{m,0,12,glob}) + 4,995 + \epsilon$ | 0,046        | 0,22        | 0,00 |
| $\rho_{12}$ vs. $E_{dyn,0,12}$    | 49     | $\ln(\rho_{12}) = 0,130 \cdot \ln(E_{dyn,0,12}) + 4,857 + \epsilon$    | 0,045        | 0,24        | 0,00 |
| $\rho_{12}$ vs. $E_{t,0,12,est}$  | 49     | $\ln(\rho_{12}) = 0,130 \cdot \ln(E_{t,0,12,est}) + 4,864 + \epsilon$  | 0,045        | 0,24        | 0,00 |

Tab. 4.10 Übersicht über die Modelle der in Abb. 4.31 (Rohdichte vs. E-Modul) dargestellten Regressionsgeraden der Serie T-8

Die Abb. 4.32 zeigt das Verhältnis zwischen den Rohdichten  $\rho_{12}$  und den Biegefestigkeiten  $f_{m,u}$ .

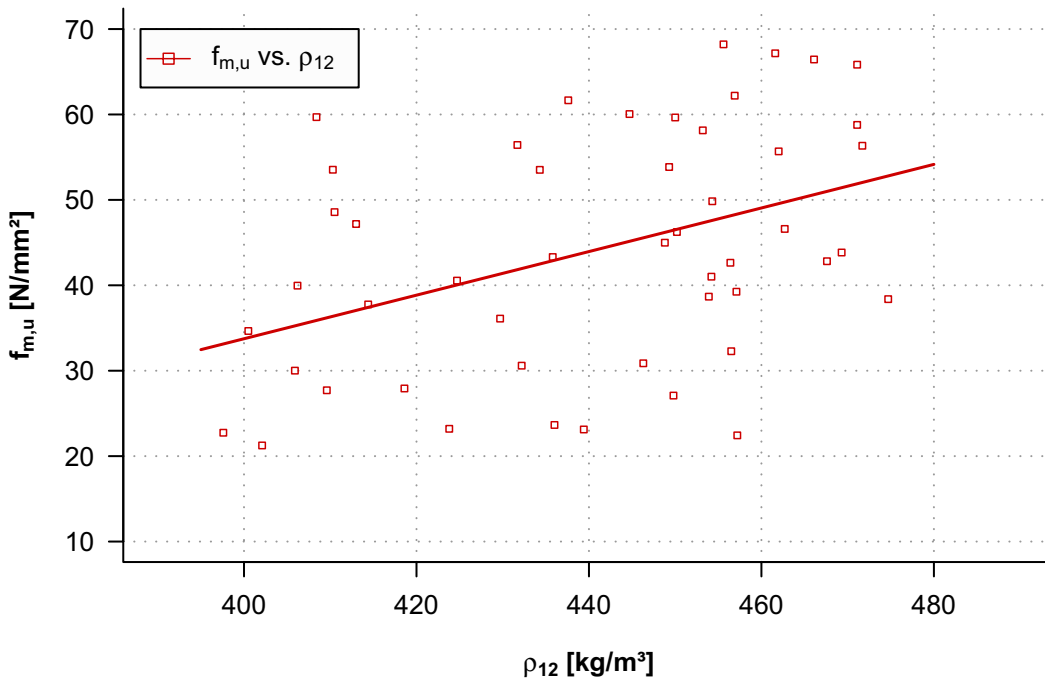


Abb. 4.32 Darstellung der Beziehung Biegefestigkeit  $f_{m,u}$  [N/mm<sup>2</sup>] vs. Rohdichte  $\rho_{12}$  [kg/m<sup>3</sup>] der Serie T-8

Für die in Abb. 4.32 dargestellte Beziehung zwischen der Biegefestigkeit  $f_{m,u}$  und der Rohdichte  $\rho_{12}$  zeigt sich erwartungsgemäß eine positive Beziehung zwischen  $f_{m,u}$  und  $\rho_{12}$ . Das Modell für die dargestellte Regressionsgerade ist aus Tab. 4.11 zu entnehmen.

| Serie T-8                 | Anzahl | Modell<br>$\ln(y) = k \cdot \ln(x) + d + \epsilon$            | $\Sigma e_i$ | $R^2_{adj}$ | $p$  |
|---------------------------|--------|---|--------------|-------------|------|
| $f_{m,u}$ vs. $\rho_{12}$ | 49     | $\ln(f_{m,u}) = 2,73 \cdot \ln(\rho_{12}) - 12,89 + \epsilon$ | 0,313        | 0,15        | 0,00 |

Tab. 4.11 Übersicht über das Modell der in Abb. 4.32 (Biegefestigkeit vs. Rohdichte) dargestellten Regressionsgeraden der Serie T-8



## 5 Schlussbetrachtung



In diesem Kapitel erfolgt eine abschließende Schlussbetrachtung sowie Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit, wobei auf die wesentlichen Ergebnisse und auf Empfehlungen zu Verbesserungen bei der Prüfdurchführung hingewiesen wird.

Zusätzlich erfolgt ein Ausblick auf eine weitergehende Verwendung der hier ermittelten Ergebnisse sowie ein Hinweis auf ausstehende Forschungsarbeiten zu dieser Thematik.

## 5.1 Resümee

Hier werden die, in den zuvor beschriebenen Kapiteln ausgeführten Vordimensionierungen, Prüfkfigurationen sowie Prüfergebnisse zusammengefasst und über eventuelle Verbesserungen bzw. Adaptierungen diskutiert.

- **Vordimensionierung**

Der Vergleich zwischen den Mittelwerten  $f_{v,mean}$  aus den Ergebnissen der Vorbestimmung (Abschnitt 2.2.2) und den Mittelwerten aus den in Kapitel 3 dargestellten Ergebnissen für  $f_{v,1,12}$  zeigt, dass die hier verwendete Glg. 2.3 nach Lackner [15] im Mittel um 11,6% zu niedrige Werte für die Schubfestigkeit liefert. Da diese Abweichungen stark schwanken (zwischen 1,7% und 25,2%) ist die verwendete Formel zur Abschätzung der Schubfestigkeit kritisch zu hinterfragen.

Zusätzlich ist zu sehen, dass die in Abschnitt 2.2.2 ermittelten 5%-Quantilwerte nach Glg. 2.4 ff. aufgrund des Variationskoeffizienten (COV), welcher konstant mit 20% angenommen wurde, teilweise sehr stark von den ermittelten 5%-Quantilwerten der Prüfungen abweicht (COV lag hier zwischen 6,2% und 22,9%).

- **Prüfkfiguration und Prüfdurchführung**

Die verwendete Prüfkfiguration mittels I-Querschnitt und einer Variation der Abmessungen der Prüfräger in Abhängigkeit des Prüfquerschnittes (Steg), welcher bei der Serie T-4 vom Standardprüfquerschnitt für Biegeprüfungen lt. ON EN 408 [5] ( $b/h = 80/150$  mm) ausgeht, scheint für eine Bestimmung der Schubfestigkeit als durchaus praktikabel. Für weitere Untersuchungen werden jedoch einige nachfolgend beschriebenen Adaptierungen vorgeschlagen:

- Da die erste Vordimensionierung und die Prüfkörperauswahl mittels „proof loading“ nach Lackner [15] von zu niedrig geschätzten Schubfestigkeiten ausging und die darauf aufbauende Prüfkfiguration nicht mehr abgeändert werden konnte, war ein vermehrtes Auftreten von Biegezugbrüchen festzustellen. Um diese Brüche, welche vor allem bei der Prüfserie T-1 vorkamen, zu vermeiden, sollte die Länge der Schubfläche  $l_{ef}$  mithilfe der Variable  $a$  (lt. Abschnitt 2.1.4) beschränkt werden. Der Vorschlag diesbezüglich wäre  $a = h_{Pr-QS} \cdot 4,0$ , da diese Konfiguration bei den Prüfserien T-2 und T-4 zu lediglich je zwei Versagen zufolge Biegezug führte.
- Ein weiteres Problem war, dass vermehrt Schubbrüche im Übergangsbereich zwischen Prüfquerschnitt (Steg) und Gurt (in Summe 63 der 221 Prüfräger) auftraten. Dies ist auf den Spannungssprung der Schubspannung (wie in Abschnitt 2.2.2 dargestellt) zurückzuführen, welcher zwar vom Klebstoffsystem aufgenommen werden kann (es wurde kein Versagen in der Klebefuge festgestellt), jedoch das angrenzende Holz durch die Interaktion aus Querdruck und

Schub teilweise zu stark beanspruchte. Um ein solches Versagen zu verhindern, sollte das Verhältnis Breiten zu Höhen der Verstärkungslamellen (Gurte) angepasst werden. Ein Vorschlag diesbezüglich wäre (z.B. für die Serie T-1) statt bisher  $b_{\text{Gurt}} \sim 2,75 \cdot b_{\text{Pr-QS}}$  und  $h_{\text{Gurt}} \sim 1,0 \cdot b_{\text{Pr-QS}}$  ein Verhältnis von  $b_{\text{Gurt}} \sim 2,0 \cdot b_{\text{Pr-QS}}$  und  $h_{\text{Gurt}} \sim 1,25 \cdot b_{\text{Pr-QS}}$  zu wählen, was die Spannungsdifferenz um rund 20% verringern würde und die Zugspannung zufolge Biegung in der Randfaser des Untergurtes nur geringfügig vergrößern würde.

- Die Verstärkung des Krafteinleitungs- sowie Auflagerbereiches mittels Vollgewindeschrauben (siehe Abschnitt 2.3.2.3) funktionierte für die meisten Prüfserien sehr gut. Es konnten kaum Einpressungen der Krafteinleitungs- sowie der Auflagerplatte festgestellt werden. Lediglich bei den ersten Prüfträgern der Serie T-6 stellte sich ein einseitiges Einpressen der Auflagerplatte sowie ein Ausknicken der in diesem Bereich überbeanspruchten Schrauben ein. Diese Überbeanspruchung konnte durch ein Verschieben der Auflagerrolle von  $1/3$  auf  $1/2$  der Länge der Auflagerplatte (siehe Abb. 2.53) beseitigt werden. Aufgrund des Auftretens dieses Versagens sollte die Auflagerrolle, entgegen den Untersuchungen von Obermayr [18] und Lackner [15], bei weiteren ähnlichen Prüfungen (speziell wenn Auflagerverstärkungen ausgeführt werden) mittig unter den Auflagerplatten angeordnet werden.
- Da die Schubfestigkeit von gerissenen Prüfquerschnitten (meist Trockenrisse) deutlich abnimmt, hier jedoch der ungerissene Querschnitt untersucht werden sollte, wurden vorgeschädigte Prüfträger für die hier durchgeführten Untersuchungen aussortiert (siehe Abschnitt 4.1). Um dies zu vermeiden, sollte bei weiteren Untersuchungen ein vermehrtes Augenmerk auf die Lagerung sowie eine noch schonendere Trocknung der Prüfhölzer gelegt werden. Da diese Vorschädigungen auch in der Baupraxis vorkommen, sind vertiefende Untersuchungen über einen Einfluss von Trockenrisse sowie eventuell anderen Vorschädigungen auf die Schubfestigkeit erforderlich.

- **Prüfergebnisse und Diskussion**

Aus den ermittelten Ergebnissen und den Diskussionen ist die Abhängigkeit der Schubfestigkeit von der Bauteilgröße deutlich erkennbar. Diese Abhängigkeit zeigt sich ebenfalls aus anderen Forschungsarbeiten (siehe Abschnitt 1.5), wobei die Ergebnisse in diesen Arbeiten teilweise stark von den hier ermittelten abweichen. Diese Abweichungen sind besonders auf die unterschiedlichen Prüfkonfigurationen und teilweise verschiedenen Holzarten (z.B. Asselin [21] 5-Punkt-Biegeversuche an „Southern pine“), aber auch auf die Anzahl der untersuchten Prüfkörper zurückzuführen.

Der Vergleich zwischen der vertieften Literaturrecherche von Lackner [15] und den hier ermittelten Abhängigkeiten zeigt zusätzlich, dass sich die Schubfestigkeit mit zunehmenden Abmessungen einem konstanten Wert annähert. Weiters ist zu sehen, dass die Schubfestigkeit von größeren Vollholzquerschnitten, wie etwa der

hier untersuchten Serie T-6, näher der von Brettschichtholz (vergleiche Abb. 1.8 lt. Lackner [15] mit Abb. 4.21) liegt. Aufgrund der geringen Anzahl verwertbarer Prüfergebnisse aus der Serie T-6 (lediglich 10 Prüfräger) ist es jedoch erforderlich diese Abhängigkeit genauer zu untersuchen.

## 5.2 Fazit

Die Untersuchungen in Abschnitt 4.3.3 zeigen, dass die in ON EN 338 [8] beschriebene Abhängigkeit der Schubfestigkeit von den Festigkeitsklassen nicht bestätigt werden kann. Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen und der nachfolgend beschriebenen Annahmen wird eine referenzielle charakteristische Schubfestigkeit von  $f_{v,k,ref} = 3,6 \text{ N/mm}^2$  vorgeschlagen, welche für den Referenzquerschnitt für Vollholz (150/80 mm) gilt und über alle Festigkeitsklassen konstant bleibt.

Bezüglich des untersuchten Größeneffektes auf die Schubfestigkeit (lt. Abschnitt 4.3.2) ergab sich, dass die Prüfquerschnittshöhe  $h_{Pr-QS}$  die höchste Aussagekraft liefert. Eine Möglichkeit diesen Effekt in der Normung zu integrieren, wäre die Einführung eines höhenabhängigen Korrekturfaktors  $k_{size}$  (lt. Glg. 5.1 und Glg. 5.2), welcher sich auf eine Referenzhöhe für Vollholz von  $h_{ref} = 150 \text{ mm}$  (siehe Abb. 5.1) bezieht.

$$f_{v,k} = f_{v,k,ref} \cdot k_{size} \quad 5.1$$

$$k_{size} = \max \left\{ 1, 3 ; \left( \frac{h}{h_{ref}} \right)^{-0,36} \right\} \quad 5.2$$

Für den in Abb. 5.1 dargestellten Verlauf sowie den daraus abgeleiteten Gleichungen Glg. 5.1 und Glg. 5.2 kamen die nachfolgend beschriebenen Annahmen und Korrekturen zur Anwendung.

- Verwendet wurden die Prüfserien mit derselben Festigkeitsklasse C24+ (Serie T-1, T-2, T-4, T-6 und T-7).
- Die charakteristischen Schubfestigkeiten der einzelnen Serien wurden ausgehend von den korrigierten Mittelwerten,  $mean \text{ korr.}$  lt. Tab. 4.2 (siehe Abschnitt 4.2), ermittelt. Dabei kam für alle Serien der einheitliche Variationskoeffizient (COV) von 25% (entsprechend des JCSS [27]) zur Anwendung (Rechenablauf lt. Glg. 2.4 ff.). Aufgrund des einheitlichen COV weichen die 5%-Quantilwerte der Abb. 5.1 von denen der Abb. 4.25 (hier wurde der COV aus den Prüfdaten lt. Tab. 4.2 verwendet) ab. Zu sehen ist dies an der Serie T-4 bei welcher die Schubfestigkeit um rund 15% niedriger liegt.
- Die daraus abgeleitete Potenzfunktion (für den Mittelwert siehe auch Tab. 4.4) wurde anschließend in den Grenzen von  $h = 75 - 300 \text{ mm}$  (dies entspricht den Höhen der Prüfquerschnitte T-1 und T-6) dargestellt und auf die Referenzschub-

spannung von  $f_{v,k,ref} = 3,6 \text{ N/mm}^2$  und die Referenzhöhe von  $h_{ref} = 150 \text{ mm}$  umgeformt.

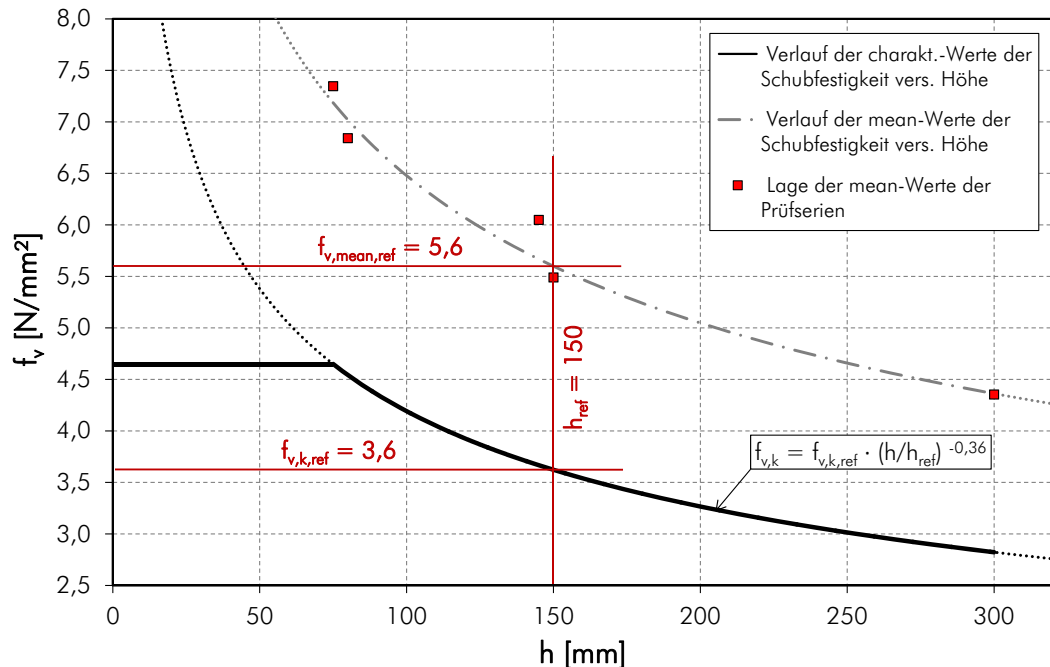


Abb. 5.1 Vorgeschlagerener Verlauf der charakteristischen Werte und der Mittelwerte der Schubfestigkeit in Abhängigkeit der Bauteilhöhe

### 5.3 Ausblick

Wie in dieser Arbeit beschrieben, hängt die Schubfestigkeit von Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) stark von der Größe des Bauteils ab. Wünschenswert wäre es, dass die gewonnenen und durch die Literaturrecherchen bestätigten Erkenntnisse auch in der Normung berücksichtigt werden. Dies wäre vor allem in Hinblick auf eine wirtschaftlichere Bemessung hinsichtlich der Schubfestigkeit von Biegeträgern erstrebenswert.

Zusätzlich sollten weitere Untersuchungen bezüglich der Schubfestigkeit von Vollholz durchgeführt werden, um die hier ermittelten Abhängigkeiten zu bestätigen und zu fundieren. Untersuchungen wären ebenfalls in Hinblick auf eine sinnvolle Abminderung für in der Praxis auftretende gerissene Querschnitte erforderlich.



## 6 Literaturverzeichnis

### 6.1 Normen

- [1] DIN 1052 (2008-12) Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau
- [2] DIN 52186 (1978) Prüfung von Holz – Biegeversuche
- [3] enBR (2007-04) eurocodenahe Bemessungsrichtlinie – Holzbauwerke – Entwurf, Berechnung und Bemessung. österreichische Richtlinien, Kompetenzzentrum holz.bau forschungs gmbh, Graz
- [4] Entwurf ÖNORM EN 384 (2008\_12\_15) Bauholz für tragende Zwecke – Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte
- [5] Entwurf ÖNORM EN 408 (2009) Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften
- [6] Eurocode Nr. 5 (1987) Gemeinsame einheitliche Regeln für Holzbauwerke
- [7] ÖNORM DIN 4074-1 (2009) Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit. Teil1: Nadelschnittholz
- [8] ÖNORM EN 338 (2009) Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen
- [9] ÖNORM EN 338 (2003) Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen
- [10] ÖNORM EN 1194 (1999) Holzbauwerke, Brettschichtholz, Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte

- [11] ÖNORM EN 13183-1 (2004\_02) Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz. Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren
- [12] ÖNORM EN 14358 (2007\_04\_01) Holzbauwerke – Berechnung der 5%-Quantile für charakteristische Werte und Annahmekriterien für Proben
- [13] SIA 265 (2003) Bauwesen – Holzbau

## 6.2 Bücher/ Dissertationen/ Abschlussarbeiten

- [14] Kollmann F (1951) Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Erster Band, 2. Auflage, 887-903
- [15] Lackner H (2011) Festlegung einer Prüfkfiguration für die Ermittlung der Schubfestigkeit von Vollholz sowie Analyse des Größeneinflusses. Diplomarbeit, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 142 p.
- [16] Mattheck C (1997) Design in der Natur. Reihe Ökologie Band 1, 3. überarbeitete und erweiterte Neuauflage, Rombach Verlag
- [17] Mistler H L (1979) Die Tragfähigkeit des am Endauflager unten rechtwinklig ausgeklinkten Brettschichtholzträgers. Dissertation, Universität (TH) Karlsruhe, 112 p.
- [18] Obermayr B (1998) Entwicklung einer optimierten Versuchskonfiguration zur Ermittlung der Schubfestigkeit von Brettschichtholz. Diplomarbeit, Institut für Stahlbau, Holzbau und Flächentragwerke, Technische Universität Graz, 108 p.
- [19] Salzman C (2010) Ermittlung von Querdruckkenngrößen für Brettsperrholz (BSP), Masterarbeit, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 198 p.
- [20] Weibull W (1939) A statistical theory of the strength of materials. Ingeniörsvetenskapsakademiens, Handlingar Nr. 151, Royal Swedish Institute

## 6.3 Berichte/ Skripten

- [21] Asselin S S (1995) Effects of member size on the shear strength of sawn lumber beams. Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, 111 p.
- [22] Brandner R, Freytag B, Schickhofer G (2008) Determination of Shear Modulus by means of standardized Four-Point Bending tests. CIB-W18/41-21-1, St. Andrews, Canada, 13 p.



- [23] Brandner R, Schickhofer G, Ruli A, Halili Y (2006) Leistungspotential von Brett-schichtholz: Beanspruchung auf Längsdruck und Querdruck. Non-Klnd B\_S\_H, Kompetenzzentrum holz.bau forschungs gmbh, Graz, Austria, 109 p.
- [24] Eiser A, Unterwieser H (2009) Untersuchung der dynamischen Kenngrößen von Schnittholz bei unterschiedlichen Temperaturen und Holzfeuchtegehalten so-wie Ermittlung der statischen Zugkenngrößen. Prüfbericht, Forschungsprojekt 2.1.5 pregrading, COMET K-Projekt, Kompetenzzentrum holz.bau forschungs gmbh, Graz, 49 p.
- [25] Gatternig W (2012) Vergleich von Schubspannungen in Vollholz nach Stab- und Scheibentheorie. Institut für Betonbau, Technische Universität Graz, 13 p.
- [26] Gehri E (2009) Eingeklebte Anker – Anforderungen und Umsetzungen. Procee-ding,15. Internationales Holzbau-Forum, Band 1, Fraunhofer Institut, ISBN 978-3-8167-8187-5, 14 p.
- [27] JCSS (2006) Joint Probabilistic Model Code – Part 3: Resistance Models, Pro-perities of Timber. Joint Committee on Structural Safety
- [28] Kretschmann D, Green D (1994) Strength properties of low moisture content southern pine. Proceedings of the Pacific Timber Engineering Conference, Gold Coast Australia, (2): 731-736
- [29] Lackner H (2009) Bestimmung der Schubfestigkeit von Vollholzträgern. Mas-terprojekt, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 59 p.
- [30] Longworth J (1977) Longitudinal Shear Strength of Timber Beams. Forest Pro-ducts Journal, 27(8): 19-23
- [31] Müller M, Sretenovic A, Gindl W, Grabner M, Wimmer R, Teischinger A (2004) Effects of macro- and micro-structural variability on the shear behavior of soft-wood. IAWA Journal, Vol.25(2): 231-243
- [32] Pirnbacher G, Brandner R, Schickhofer G (2010) Base Parameters of Self-Tap-ping Screws. CIB-W18/42- 7-1, Dübendorf, Switzerland, 16 p.
- [33] Rammer D R, Soltis L A (1994) Experimental shear strength of glued-laminated beams. Research Paper. FPL--RP-527. Madison, WI: U.S. Department of Agri-culture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- [34] Schanz M (2011) Manuskript zur Vorlesung Mechanik B2–Festigkeitslehre. In-stitut für Baumechanik. Technische Universität Graz, 204 p.

- [35] Schickhofer G (2001) Determination of shear strength values for GLT using visual and machine graded spruce laminations. CIB W18 (34):12-6, Venice, Italy, 25 p.
- [36] Schickhofer G (2006) Holzbau, Der Roh- und Werkstoff Holz. Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 549 p.
- [37] Schickhofer G (2009) Holzbau, Nachweisführung für Konstruktionen aus Holz. Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 403 p.
- [38] Theiler M, Frangi A (2009) Flächen aus Schichten – Steifigkeitswerte und Spannungsberechnung. SAH-Tagung: Werkstoffkombinationen – ein Mehrwert für Holz, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung SAH, (41): 53-64

## 6.4 Zulassungen/ Produktinformationen

- [39] Jowapur® 686.60 (07/2010) Flüssiger Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoff für den tragenden Holzleimbau, Datenblatt, Jowat AG Klebstoffe
- [40] PURBOND® HB 110 (08/2006) 1K Polyurethanklebstoff für tragende Holzkonstruktionen nach DIN 1052 einschliesslich Sonderbauweisen, Datenblatt, Purbond Adhesive systems for engineered wood
- [41] Z-9.1-509 (2011) Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung – Holzbauschrauben Star Drive Vollgewinde, Star Drive 2-Gewinde, Star Drive, Rapid, Rapid Perfekt und Rapid Komplex für die Befestigung von Dämmsystemen
- [42] Z-9.1-519 (2011) Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung – SPAX®-S Schrauben mit Vollgewinde als Holzverbindungsmitel

## 6.5 Internet

- [43] [http://www.fundermax.at/max\\_compact\\_interior.de.54.htm](http://www.fundermax.at/max_compact_interior.de.54.htm)  
FUNDERMAX Compact Interior – Technik (08.09.2011)
- [44] <http://de.wikipedia.org/wiki/Festigkeit>  
Festigkeit (05.03.2012)
- [45] <http://de.wikipedia.org/wiki/Gr%C3%B6%C3%9Feneinfluss>  
Größeneinfluss (13.03.2012)
- [46] [http://de.wikipedia.org/wiki/Spannung\\_%28Mechanik%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Spannung_%28Mechanik%29)  
Spannung (Mechanik) (05.03.2012)



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