

Einfluss konstanter Langzeitbeanspruchung (DoL) auf die Tragfähigkeit selbstbohrender Holzschrauben appliziert in Faserrichtung in Fichte, Buche und BauBuche



M-4-8/2018

Peter Mayr

Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz



Peter Mayr, BSc

**Einfluss konstanter
Langzeitbeanspruchung (DoL)
auf die Tragfähigkeit
selbstbohrender Holzschrauben
appliziert in Faserrichtung in
Fichte, Buche und BauBuche**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen – Bauwesen

Eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Betreuer
Ass.Prof. Dipl.-Ing.(FH) Dr.techn. Reinhard Brandner
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Ringhofer
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Dipl.-Ing. Raimund Sieder
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, Juni 2018

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG AFFIDAVIT

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

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

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle ein aufrichtiges Dankeschön an meine Betreuer Reinhard Brandner, Andreas Ringhofer und Raimund Sieder richten, die es mir ermöglichten in diese spannende Thematik einzutauchen. Durch deren professionelle Betreuung war es mir möglich, diese Arbeit sehr zielführend zu verfassen. Auch Professor Schickhofer möchte ich danken, der bei mir, im Rahmen seiner Lehrveranstaltungen, das Interesse an dem Baustoff Holz geweckt hat. Für die Versuchsplanung und Durchführung gilt mein besonderer Dank Bernd Heissenberger, der mir stets zur Seite stand. Des Weiteren möchte ich dem gesamten Team des Holzbauinstituts für das sehr angenehme Arbeitsklima danken.

Bei den teilnehmenden Firmen des Forschungsprojekts FFG BRIDGE 1 Projekt „hardwood SCREWS“ möchte ich mich für die Möglichkeit bedanken, bei diesem Projekt mitwirken zu dürfen. Besonderer Dank gilt dabei der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH für die Bereitstellung der Schrauben und der Firma Pollmeier Massivholzbau GmbH & Co.KG für die Bereitstellung der Buchenvollholz und BauBuchenträger, sowie der Landeskammer für Land- und Forstwirtschaft Steiermark für die finanzielle Beteiligung an diesem Projekt.

Der größte Dank gilt dabei meinen Eltern Rudolf und Annemarie, die mir dieses Studium ermöglichten und die mir auch in schwereren Zeiten geholfen haben, die Motivation daran nicht zu verlieren. Auch meinem Onkel Reinhard möchte ich dafür danken, dass er mir während des Studiums einige hilfreiche Tipps geben konnte und immer mit Rat zur Seite stand. Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Studienkollegen und Freunden bedanken, die die Studienzeit für mich zu einem ganz besonderen Abschnitt in meinem Leben gemacht haben.

Kurzfassung

Der Vorrat an Hartlaubhölzern steigt in den Wäldern von Österreich, Deutschland und der Schweiz an, während jener der Nadelholzarten eher rückläufig ist. Damit steigt die Notwendigkeit, Hartlaubhölzer verstärkt im Baubereich einzusetzen. Deren mitunter hervorragende mechanische Kenngrößen machen es möglich, den Bauteilquerschnitt im Vergleich zu Nadelhölzern erheblich zu reduzieren. Um dieses Potential nutzen zu können, ist besonderes Augenmerk auf die Verbindungstechnik zu legen, da es erforderlich ist, die Kräfte auch in den Verbindungen auf einen vergleichsweise kleinen Querschnitt zu übertragen. In den kleinvolumigen Anschlussbereichen gelten kompakte Gruppen von Hirnholzverschraubungen als vielversprechend. Die Kenntnisse des Langzeittragverhaltens solcher Anschlüsse sind jedoch als äußerst unzureichend zu bezeichnen.

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich demzufolge mit dem Langzeittragverhalten („duration of load“; DoL) axial beanspruchter, selbstbohrender Holzbauschrauben appliziert in Faserrichtung in Holzbauteilen aus Fichte, Buche bzw. in BauBuche. Nach einer ausführlichen Literaturrecherche zum Thema DoL, bei der unter anderem die sogenannte Madison Kurve analysiert und modifiziert wurde, liegt als Conclusio eine neuartige, schädigungsäquivalente Bewertung der Ergebnisse von Kurzzeit- und Dauerstandversuchen vor, die eine Transformation der dabei variierenden Belastungsarten beinhaltet. Im Hinblick auf die durchgeführten experimentellen Untersuchungen ist diese schädigungsäquivalente Bewertung ein wichtiges Instrument für die Auswertung der dabei bestimmten Ergebnisse. Zu den im Rahmen dieser Versuche analysierenden Parametern zählen die Holzart bzw. das -produkt, das Lastniveau, der Schraubentyp, die Verankerungstiefe des Gewindes im Holz (kurz Einbindelänge) sowie die Belastungsart (Kurzzeitversuche mit Variation der Prüfgeschwindigkeit vs. Dauerstandversuche). Letztere wurden an einem Langzeitprüfstand am Institut für Holzbau und Holztechnologie bei einem weitgehend konstanten Klima entsprechend Nutzungsklasse 2 nach EC 5 durchgeführt.

Die Untersuchungen mit Variation der Prüfgeschwindigkeit zeigten einen abfallenden Trend der Ausziehfestigkeit bei Reduzierung der Prüfgeschwindigkeit. Im Rahmen der Dauerstandversuche konnten bei einer Beobachtungsdauer von einem Jahr 253 von rund 500 geplanten Versagensfällen beobachtet werden. Da diese Versuchsreihen demzufolge noch nicht abgeschlossen sind, werden im Rahmen dieser Masterarbeit nur die bis dato gewonnen Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Dies erfolgt anhand von Regressionsparametern der Beziehung zwischen Belastungsniveau und Standzeit, in Abhängigkeit der Holzart bzw. des -produkts, der Einbindelänge und des Schraubentyps. Diese Parameter wurden ferner für die Bestimmung von k_{mod} -Faktoren verwendet, welche abschließend vorgestellt und mit den derzeit gültigen Regelungen bzw. aus der Literatur bekannten Werten verglichen wurden.

Abstract

The stock of hardwoods in the forests, e.g. of Austria, Germany and Switzerland increases, while that of the softwood species tends to decline. This circumstance mandates for an expanded use of hardwood lumber in the construction sector. In comparison to softwood the often excellent mechanical characteristics make it possible to considerably reduce the demanded cross-sections. In order to be able to exploit this potential, special attention must be paid on the connection technology, since it is necessary to introduce the forces into a comparatively small cross-section which can only be achieved by adequate joint solutions. For these small-volume connection areas, compact groups of end-grain screw type fasteners are considered to be promising. However, knowledge on their long-term performance is fragmented and overall insufficient.

This master thesis is concerned with investigations on the long-term behavior (“duration of load”; DoL) of axially loaded, self-tapping screws applied parallel to the grain in Norway spruce, beech and “BauBuche” (LVL made of beech). After a detailed literature research on DoL, in which, among other things, the so-called Madison curve was analyzed comprehensively, a damage-equivalent evaluation approach is established which makes it possible to uniform the assessment of different loading scenarios. In view of the conducted experimental investigations, this damage-equivalent evaluation approach is an important instrument for the assessment and interpretation of thereby gained results. Parameters analyzed in the context of these tests are (i) the type of wood or timber product, (ii) the load level, (iii) the type of screw, (iv) the embedment length and (v) the type of loading and time to failure (short-term tests with variation of the test speed versus static (DoL) fatigue tests). The static fatigue tests were carried out on a long-term test rig at the Institute of Timber Engineering and Wood Technology at a constant climate set to service class 2 according to EC 5.

Series tested by varying the test speed showed a decreasing trend of the pull-out strength with increasing time to failure, i.e. decreasing test speed. Recording the static fatigue tests, within one year, 253 of 500 planned specimens failed. As many of these test series are not yet completed, only the results obtained so far are presented and discussed within this master thesis, thus representing a preliminary report. The current evaluation of the test data is done on the basis of regression parameters of the relationship between load level and service life, depending on the type of wood or timber product, the embedment length and the screw type. These parameters were also used for the determination of k_{mod} factors, which are finally presented and compared with the currently valid regulations and the literature.

Inhaltsverzeichnis

KAPITEL 1: EINLEITUNG	1
1-1	ALLGEMEINES ZU EFFEKTEN ZUFOLGE KONSTANTER LANGZEITBEANSPRUCHUNG (DOL)1
1-2	HISTORISCHE EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUM DOL EFFEKT.3
1-2.1	Conte de Buffon3
1-2.2	Lyman W. Wood3
1-2.3	R. G. Pearson.....7
1-2.4	Borg Madsen10
1-2.5	Preben Hoffmeyer12
1-2.6	Zusammenfassung der historischen experimentellen Untersuchungen zum DoL-Effekt17
1-2.7	Conclusio zu den historischen experimentellen Untersuchungen zum DoL-Effekt.....18
1-3	UNTERSUCHUNGEN ZU HOLZBAUSCHRAUBEN.....22
1-3.1	Gernot Pirnbacher.....22
1-3.2	Thomas Uibel & Hans Joachim Blaß25
1-3.3	Christoph Koj & Martin Trautz.....29
1-3.4	Fazit zu den Untersuchungen zu Holzbauschrauben30
1-4	MODELLE ZU DURATION OF LOAD.....31
1-4.1	Modell nach Gerhards32
1-4.2	Modell nach Barrett und Foschi35
1-4.3	Modell nach Foschi und Yao.....36
1-4.4	Modell nach Nielsen.....37
1-5	MOTIVATION.....41
1-6	ZIELSETZUNG41
1-7	GLIEDERUNG DER ARBEIT42
KAPITEL 2: MATERIAL UND METHODEN	43
2-1	MATERIAL43
2-1.1	Prüfplanung43
2-1.2	Holz46
2-1.3	Holzbauschrauben47
2-2	METHODEN.....47
2-2.1	Referenzversuche47
2-2.2	Langzeitversuche.....49
2-2.3	Ergänzende Untersuchungen zu DoL64
2-2.4	Auswertemethodik.....65
2-2.4.1	Bestimmung von Kenngrößen.....65
2-2.4.2	Statistische Auswertemethodik.....67

KAPITEL 3: ERGEBNISSE UND DISKUSSION DER REFERENZVERSUCHE	70	
KAPITEL 4: ERGEBNISSE UND DISKUSSION DER HAUPTVERSUCHE DOL	84	
4-1.1	Allgemeines	84
4-1.1.1	Klimadaten.....	84
4-1.1.2	Holzfeuchte	85
4-1.1.3	Rohdichte	90
4-1.2	DoL Ergebnisdiagramme	97
4-1.2.1	Allgemeines	97
4-1.2.2	Fichte	98
4-1.2.3	BauBuche	101
KAPITEL 5: ERGÄNZENDE UNTERSUCHUNGEN ZU DOL	106	
KAPITEL 6: ZUSAMMENFASSUNG UND CONCLUSIO.....	118	
ANHANG A LITERATURVERZEICHNIS.....	I	
ANHANG B DIVERSE ANDERE ANHÄNGE.....	III	
B-1	REPRODUZIERTE DATEN DER MADISON KURVE	III
B-2	PRÜFRAHMEN DETAILZEICHNUNG.....	V
B-3	QUELLTEXT DER DATENAUFBEREITUNG	VII
B-4	ERGEBNISSE DER LANGZEITVERSUCHE.....	XXIII

KAPITEL 1: EINLEITUNG

1-1 ALLGEMEINES ZU EFFEKTEN ZUFOLGE KONSTANTER LANGZEITBEANSPRUCHUNG (DOL)

Holz und Holzprodukte zeigen einen signifikanten Abfall der Tragfähigkeit und Zunahme an Verformungen, wenn diese über einen längeren Zeitraum beansprucht werden. Bezogen auf den Verlust an Tragfähigkeit wird das Phänomen des sogenannten Kriechbruches, auch genannt „Duration of Load (DoL)“ Effekt, seit vielen Jahrzehnten beobachtet und untersucht. Dieses Phänomen ist von hoher Relevanz und dessen Berücksichtigung essentiell zur Gewährleistung ausreichend zuverlässiger aber auch Basis effizienter Konstruktionen (Hoffmeyer und Sørensen, 2007).

Die zeitabhängige Tragfähigkeit von Holz ist zumindest qualitativ seit Jahrzehnten bekannt. Um diese Zeitabhängigkeit zu berücksichtigen, werden dessen mechanische Eigenschaften bei Belastungen mit unterschiedlicher Dauer angepasst. Die Arten von Einwirkungen, die in Konstruktionskonzepten unterschiedliche Einwirkungsdauern aufweisen, umfassen: Aufprall, Wind und Erdbeben, Schnee, typische Nutzlasten und strukturelles Eigengewicht. Deren Auswirkungen werden im Allgemeinen unter Zugrundelegung einer konstanten Einwirkungsgröße über die erwartete Dauer hinweg bestimmt. Die "voraussichtliche Dauer" kann für Dauerbelastungsperioden gelten, z.B. für eine Eigenlast oder für intermittierende Belastungsperioden die summiert werden, z. B. für eine maximale Schneelast (Gerhards, 1979).

In den 1920er Jahren wurde in der amerikanischen Norm (ASTM 1915), basierend auf den Ergebnissen von Tiemann (1909), der Faktor 9/16 eingeführt, der das Verhältnis der Langzeittragfähigkeit im Bezug zur Kurzzeittragfähigkeit angibt. Das bedeutet, dass die Langzeittragfähigkeit laut ASTM 1915 bei rd. 56 % der Kurzzeittragfähigkeit liegt (Hoffmeyer, 1990).

In den aktuellen europäischen Bemessungsnormen werden diese DoL-Effekte durch Ansatz des Faktors k_{mod} berücksichtigt. Dieser gibt in Abhängigkeit der Lasteinwirkungsdauer und der Nutzungsklasse eine Abminderung der charakteristischen Kurzzeitfestigkeitswerte vor. Die Nutzungsklasse berücksichtigt zudem den Einfluss der klimatischen Verhältnisse, welche im Bauteil im eingebauten Zustand vorherrschen, auf die Holzfeuchte und folglich auf die mechanischen Eigenschaften des Holzes.

Das Maß der Reduktion der Tragfähigkeit und Steifigkeit von Holz- und Holzbauprodukten bei Langzeitbeanspruchung ist gemäß EN 1995-1-1 (2015), neben anderen Faktoren, zudem abhängig von der jeweiligen Holzfeuchte. Zusätzlich zum Festigkeitsverlust bei Kurzzeitbeanspruchung ist mit steigender Holzfeuchte ein höherer DoL Effekt gegeben. Gemäß Hoffmeyer und Sørensen führen zyklisch variierende Bedingungen gegenüber einer konstanten klimatischen Beanspruchung zu den höheren Verlusten. Der Effekt der Langzeitbelastung wurde, mit Bezug auf ein erwartetes Versagen nach einer 50-jährigen konstanten Beanspruchung, in ihren Untersuchungen als das Belastungsniveau („Stress Level“) SL_{50} ausgedrückt. Basierend auf ihren Untersuchungen ergaben sich die folgenden Werte für SL_{50} : 0,60 (das bedeutet 60 % von der Kurzzeitfestigkeit) bei einer Holzfeuchte $u \cong 11$ %, 0,50 bei $u \cong 20$ % und 0,44 bei $u \cong 11$ bis 20 % (Hoffmeyer und Sørensen, 2007).

Die Ermüdung beschreibt den Prozess fortschreitender, örtlich begrenzter aber bleibender struktureller Veränderungen in Materialien, welche Bedingungen ausgesetzt sind, die an irgendeinem oder mehreren strukturellen Punkt(en) konstante oder veränderliche (zyklische) Spannungen und Dehnungen erzeugen in deren Folge sich nach einiger Zeit oder einer ausreichenden Anzahl von Beanspruchungszyklen es zu Rissen oder vollständigem Bruch kommen kann. Für das Ermüdungsversagen eines Materials aus einer anhaltenden oder zyklischen Beanspruchung genügen in Folge Lastniveaus, welche unter jenen liegen die

ein plastisches Verhalten oder einen Bruch unter monotonen Belastungsbedingungen verursachen. Die Schädigung gilt hier als fortschreitender Prozess, beginnend mit vereinzelt Mikrorissen welche sich infolge zusammenschließen und je nach Materialverhalten Cluster bilden können bzw. sich zu Makrorissen entwickeln und infolge ein globales Versagen der Materialstruktur bewirken (Smith et al., 2003).

Die Versagensmechanismen lassen sich grundsätzlich in zwei Fälle einteilen (Köhler und Svensson, 2002):

- Erreichen der maximalen Bruchlast
- Schadensakkumulation hervorgerufen durch eine Langzeitbeanspruchung (Duration of Load)

Die Ermüdung gemäß obiger Definition ordnet sich im Versagensfall der Schadensakkumulation ein. Dabei ist zu beachten, dass die Ermüdung Versagen infolge konstanter Belastung (DoL-Effekt) und/oder Versagen infolge zyklischer Beanspruchung beinhalten kann. Für solche Fälle kann man sich dem Modell nach Palmgren (1924) und Miner (1945) bedienen:

Dieses Modell geht von einer linearen additiven Schädigungsakkumulation bei zyklischer Beanspruchung aus. Das Basismodell stellt hierbei folgende Grenzbedingung auf: Die Summe der Verhältnisse der Lastzyklen n_i zur max. Anzahl an Lastzyklen N_i , bei gegebener Spannung σ_i darf maximal 100 % erreichen (Brandner und Schickhofer, 2011).

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \tag{1.1}$$

Wie bereits oben erwähnt, beinhaltet Gl. (1.1) nur zyklische Beanspruchungen. Um statisch konstante Langzeitbeanspruchungen zu berücksichtigen kann folgender Term hinzugefügt werden (Brandner und Schickhofer, 2011):

$$\sum_{i=1}^m \frac{t_i}{T_i} + \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \tag{1.2}$$

In der Literatur wird Gl. (1.2) in vielen Varianten verwendet. Dabei werden diese zwei Terme mit verschiedenen Vorfaktoren und Hochzahlen kalibriert. In dieser Arbeit wird nur gezeigt, dass es grundsätzlich möglich ist, statische und dynamische Ermüdung gemeinsam mittels Gl. (1.2) zu berücksichtigen.

In Abbildung 1-1 sind drei allgemein zu unterscheidende Belastungskategorien angeführt, welche im folgenden Absatz kurz beschrieben werden:

Im Kurzzeittest („ramp loading“, Abbildung 1-1, Mitte) wird die Probe einer sukzessiv steigenden Belastung infolge konstanter Belastungsgeschwindigkeit ausgesetzt bis der Bruch eintritt. Somit ergibt sich die Kurzzeittragfähigkeit zum Zeitpunkt t_s und bei der Kraft F_0 . Unter Ansatz einer linear elastischen Beziehung zwischen der Kraft und der Beanspruchungszeit lässt sich die Steigung zwischen diesen Größen über den Faktor k_R ausdrücken. Beim Langzeittest (Abbildung 1-1, rechts) hingegen wird die Probe nur bis zu einem gewissen Prozentsatz der zuvor ermittelten Kurzzeittragfähigkeit belastet. Ab dem Zeitpunkt t_c erfolgt eine konstante Belastung bis zum Zeitpunkt t_f der Bruch eintritt. Wird die Belastung wiederum sehr schnell (stoßartig) aufgebracht („impact loading“, Abbildung 1-1, links), so wird in der Regel eine höhere Tragfähigkeit in Bezug auf die versuchstechnisch ermittelte statische Kurzzeittragfähigkeit erreicht.

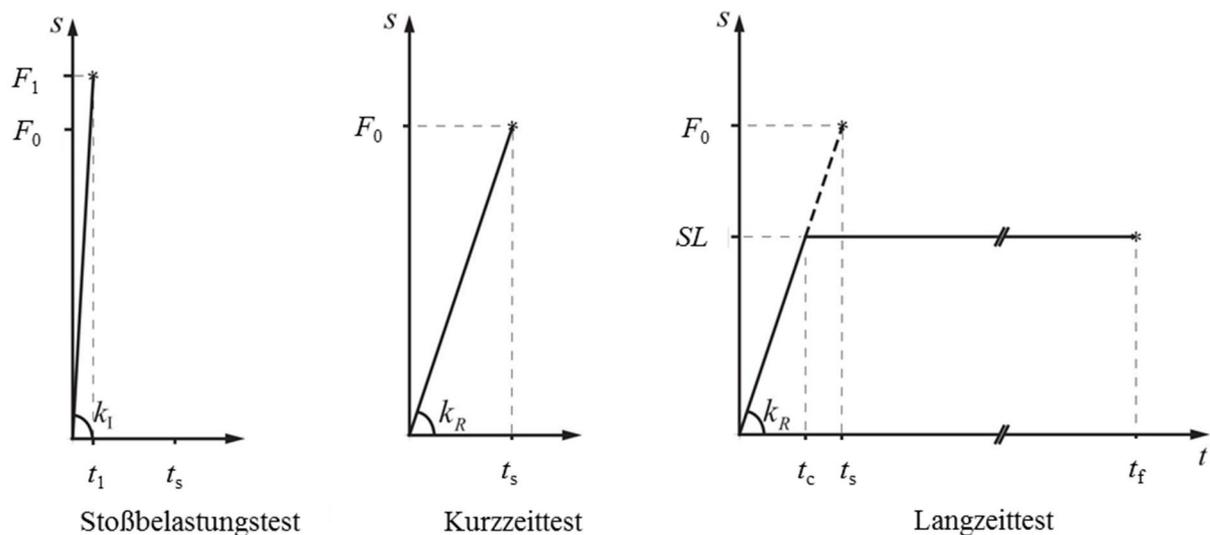


Abbildung 1-1: Schematische Last-Zeit-Diagramme der drei Belastungskategorien Stoßbelastung (links), Kurzzeittest (Mitte), Langzeittest (rechts) (vgl. Köhler, 2007)

1-2 HISTORISCHE EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUM DOL EFFEKT

1-2.1 CONTE DE BUFFON

Bereits im Jahre 1741 wurden von Georges Louis Le Clerc und Conte de Buffon erste Versuche zum DoL Effekt durchgeführt. Dabei wurden jeweils zwei Balken aus Eichenholz mit unterschiedlichen Lastintensitäten beaufschlagt und die Zeit bis zum Versagen gemessen. Folgende Beobachtungen wurden dabei festgehalten (Schickhofer, 2009):

Bei einer Belastung von 4100 kg trat der Bruch bereits nach einer Stunde ein. Bei zwei Balken, welche in weiterer Folge mit 2710 kg belastet wurden, trat der Bruch nach 176 bzw. 197 Tagen ein. Ein drittes Paar Balken wurde mit 2050 kg belastet und es konnte auch nach zwei Jahren Beobachtungszeit kein Bruch festgestellt werden, jedoch waren erhebliche Durchbiegungen feststellbar. Buffon schloss daraus, dass die Langzeittragfähigkeit aufgrund von ständigen Lasten nicht mehr als 50 % der Bruchlasten aus den Kurzzeitversuchen betragen darf.

1-2.2 LYMAN W. WOOD

Im Jahre 1951 veröffentlichte Wood Ergebnisse aus Langzeitversuchen, durchgeführt an biegebeanspruchten kleinen fehlerfreien Proben am Forest Products Laboratory in Madison, Wisconsin (Wood, 1951). Diese Arbeit stellt den Hintergrund des heutigen Modifikationsbeiwertes k_{mod} des Eurocode 5, der Bemessungsnorm für Holzkonstruktionen im europäischen Binnenraum dar (Schickhofer, 2009). Die auf Basis der daraus ermittelten Ergebnisse definierte sogenannte "Madison-Kurve", oder eine darauf basierende empirische Ersatzbeziehung, ist weltweit Teil von Holzbau-Bemessungsnormen (Smith et al., 2003).

Wood ließ neben seinen eigenen Versuchen noch zwei weitere Arbeiten einfließen:

- Stoßbelastungstest, durchgeführt von A. Elmendorf (1916),
- Belastungstests (konstante Belastungsgeschwindigkeit), durchgeführt von J. A. Liska (1950)

Im Jahre 1943 wurden 126 Langzeitbiegeversuche an Kleinproben mit rund sechs bzw. zwölf Prozent Holzfeuchtegehalt gestartet. Die Tests wurden an Proben aus Douglasie mit den Abmessungen von $25 \times 25 \times 410 \text{ mm}^3$ durchgeführt. Die Spannweite der Biegeversuche betrug 355 mm (14 Zoll) und die

Prüfkonfiguration entsprach einem 3-Punkt Biegeversuch. Für jede Serie wurde ein Balken mit den Abmessungen von rd. $75 \times 25 \times 410 \text{ mm}^3$ verwendet. Dieser Balken wurde in zwei äußere Probekörper und einen mittleren Probekörper geteilt. Die beiden äußeren Probekörper wurden einem Kurzzeittest ausgesetzt, welcher mit einer Prüfmaschine mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit bewerkstelligt wurde. Der Mittelwert dieser beiden äußeren Probekörper wurde als Eingangswert für den langzeitbeanspruchten mittleren Probekörper verwendet. Die daran anschließenden Langzeitbiegeversuche wurden mit acht Lastniveaus im Bereich von 60 bis 95 % der Kurzzeitfestigkeit durchgeführt (siehe Abbildung 1-2). Die eine Hälfte der Probekörper wurde bei sechs Prozent Feuchtegehalt getestet und die andere Hälfte bei zwölf Prozent. Der Bruch trat bei manchen Proben bereits nach wenigen Minuten ein, andere hingegen hielten länger als 5 Jahre. (Madsen und Nielsen, 1992)

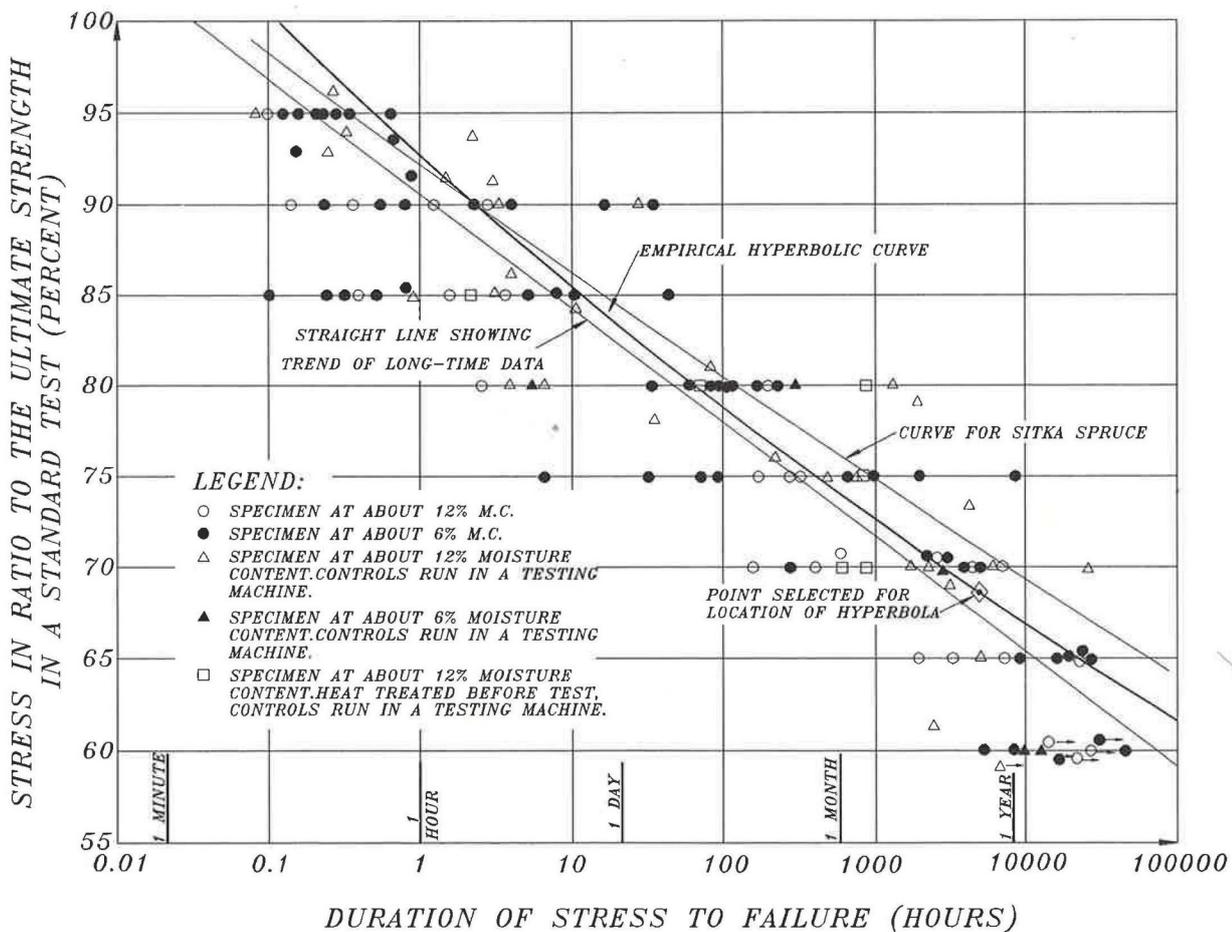


Abbildung 1-2: Resultate von kleinen fehlerfreien langzeitbeanspruchten Proben (Madsen und Nielsen, 1992)

In Abbildung 1-2 kann man erkennen, dass in der Arbeit von Wood Probekörper mit unterschiedlichen Holzfeuchten vermischt wurden. Daher wurde im Zuge der vorliegenden Arbeit überprüft, ob ein Einfluss der Holzfeuchte auf das Langzeitverhalten im Bereich zwischen $u = 6 \%$ und $u = 12 \%$ besteht. Zudem wurden die Einzeldaten nochmals neu aufbereitet und getrennt einer Auswertung unterzogen. Beim Vergleich der Regressionsmodelle unter Ansatz der Funktion von Wood und Kalibrierung der Regressionsparameter stellte sich heraus, dass eine getrennte Auswertung für die hier untersuchten Holzfeuchten nicht erforderlich ist, sprich dass für den genannten Bereich und die aufgebrachte Biegebeanspruchung kein signifikanter Einfluss der Holzfeuchte auf das Langzeitverhalten gefunden wurde.

Aus den Stoßbelastungstests, durchgeführt von Elmendorf (1916), liegen nur sehr wenige Informationen vor. Die Kernaussage dieser Tests ist, dass bei einer Stoßbelastung eine um 75 % höhere Tragfähigkeit erreicht wurde, als in Standardbiegeversuchen mit einem Versagenseintritt in rund fünf Minuten (Madsen und Nielsen, 1992).

Im Rahmen der Analyse des DoL-Effektes wurden zudem die Tests mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit, durchgeführt von Liska (1950), herangezogen. Bei diesen Tests wurden sechs Gruppen, differenziert nach der Belastungsgeschwindigkeit und bestehend aus jeweils 14 Probekörpern, untersucht. Die Belastungsgeschwindigkeit variierte dabei zwischen einer und 150 Sekunden. In Abbildung 1-3 sind die Resultate der Kurzzeituntersuchungen von Liska (1950) graphisch dargestellt. Zu beachten ist, dass es sich bei diesen Tests im Gegensatz zu den eigenen Untersuchungen von Wood um „ramp-loading-tests“ handelte. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse aus den beiden Untersuchungen ist daher grundsätzlich nicht zielführend (Madsen und Nielsen, 1992) und somit eine gemeinsame Auswertung ohne entsprechende Datenaufbereitung zu hinterfragen. Die Herausforderung besteht darin, eine Umrechnung von einer Belastung mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit in eine über die Zeit konstante Belastung zu finden. Eine Möglichkeit der Umrechnung im Zuge einer iterativen Optimierung wird später in Kapitel 1-2.7 vorgestellt.

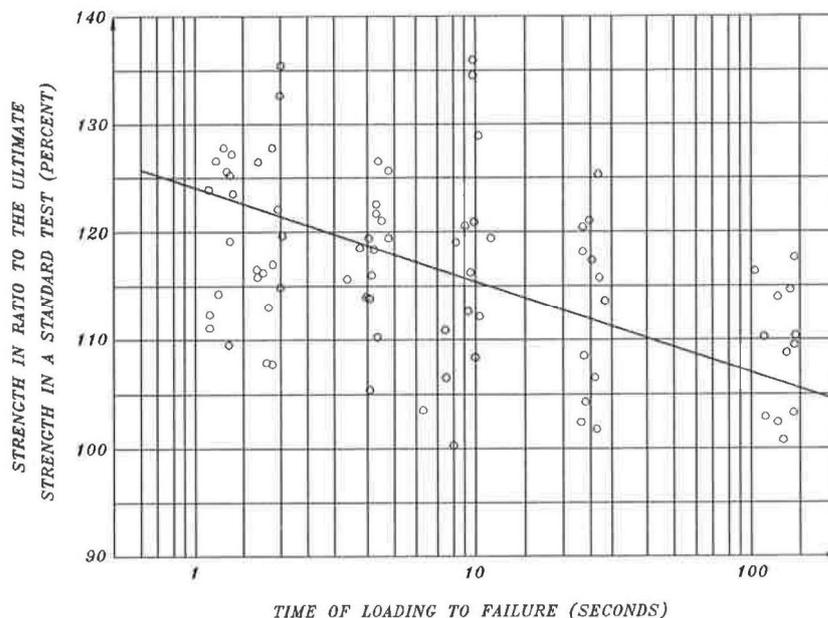


Abbildung 1-3: Kurzzeituntersuchungen („ramp-loading tests“) durchgeführt von Liska (Madsen und Nielsen, 1992)

Auf Basis dieser drei Untersuchungen wurde die hyperbolische Madison Kurve abgeleitet. Die Gründe für die Wahl eines hyperbolischen Regressionsmodells sind nicht bekannt, so auch nicht die Beweggründe für zum Teil durchgeführte Manipulationen der zugrunde gelegten Modelldaten. Zusätzlich wurde keine Rücksicht auf die Belastungsart genommen. Diese lässt sich sehr gut mit Abbildung 1-1 spezifizieren. Die DoL-Untersuchungen von Wood (1951) basieren auf einer annähernd konstanten Beanspruchung unter Vernachlässigung des Belastungsvorganges. Das bedeutet, dass für jeden Zeitabschnitt eine partielle Schädigung im gleichen Ausmaß im Material hervorgerufen wird. Bei den Untersuchungen von Elmendorf (1916) und Liska (1950) werden die Probekörper mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit beansprucht. Hier wird zwar für jeden Zeitabschnitt eine partielle Schädigung im Material hervorgerufen, jedoch in einem unterschiedlichen Ausmaß. Befindet man sich am Anfang des Belastungsvorganges, so tritt eine sehr geringe Schädigung im Material auf, wo hingegen zum Zeitpunkt kurz vor dem Bruch die maximale Schädigung auftritt. In Abbildung 1-4 ist die Madison Funktion auf Basis von drei Punkten, die von Wood für die Kalibrierung der Funktion ausgewählt wurden, dargestellt. Zusätzlich sind die Trendlinien der Ergebnisse der Belastungstests von Liska (1950) und jener von Wood

(1951) dargestellt. Im linken oberen Rand kann man den ersten Punkt erkennen, welcher auf den Stoßbelastungstests von Elmendorf (1916) basiert. Leider ist auch trotz umfangreicher Literaturrecherche nicht nachzuvollziehen, warum dieser Punkt nicht bei 175 % gesetzt wurde, sondern bei 150 % zu liegen kommt. Weiters wurde der 100 %-Lastlevel-Wert bei 7,5 Minuten festgelegt obwohl sich alle einbezogenen Untersuchungen auf ein Biegeversagen innerhalb von im Mittel fünf Minuten beziehen. Der dritte Punkt wurde bei 69 % und 3.750 Stunden Dauerbeanspruchung festgelegt. Auch hierfür ist die Motivation nicht klar nachvollziehbar.

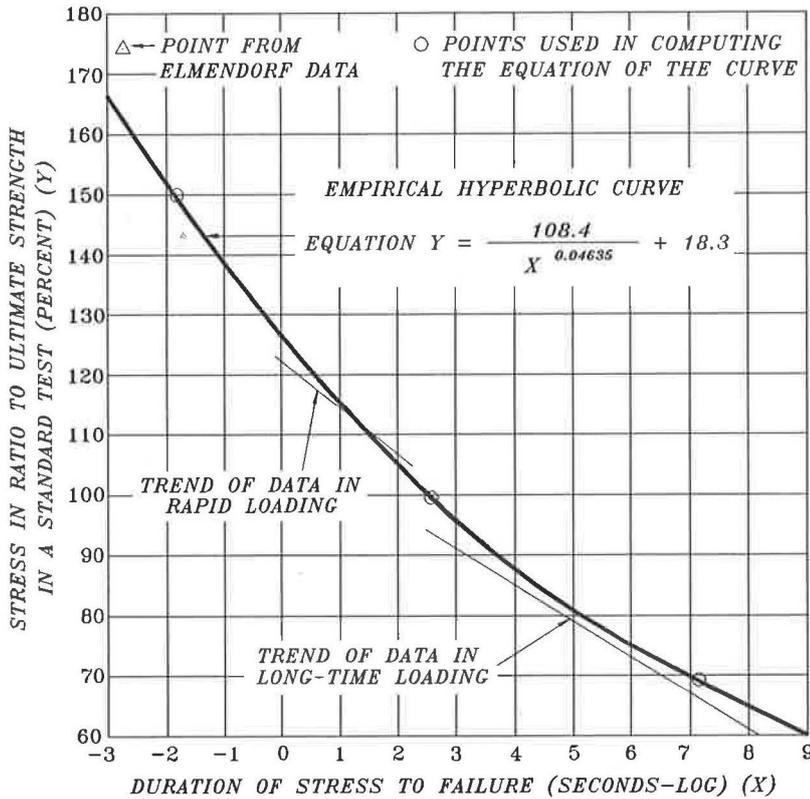


Abbildung 1-4: Empirische hyperbolische Madison Kurve (Madsen und Nielsen, 1992)

Auf Basis dieser drei ausgewählten Punkte konnte eine Funktion festgelegt werden. Dabei wird auf der Ordinate die Zeit in Sekunden in einem logarithmischen Maßstab mit der Basis zehn und auf der Abszisse das Lastniveau in Prozent aufgetragen. In der Tabelle 1-1 sind die drei ausgewählten Funktionspunkte noch einmal zusammengefasst (Wood, 1951):

Tabelle 1-1: Madison Kurve: Funktionspunkte

	Zeit	Lastintensität [%]
Punkt 1	0,015 Sekunden	150
Punkt 2	7,50 Minuten	100
Punkt 3	3.750 Stunden	69

Daraus ergibt sich folgende empirische Gleichung:

$$SL = \frac{108,4}{t_f^{0,04635}} + 18,3 \quad (1.3)$$

Dabei sind:

SL Lastniveau [%]
 t_f Zeit [s]

Als Grenzwert der Gl. (1.3) mit $t \rightarrow \infty$ ergibt sich 18,3 %, d.h., dass gemäß dieser Gleichung eine Dauerstandfestigkeit im Bereich von rd. 18 % der Kurzzeitfestigkeit zu liegen käme bzw. unterhalb dieses Lastniveaus kein Versagen zu erwarten ist. Der Faktor von 9/16 gemäß Tiemann (1909) wird bei Anwendung von Gl. (1.3) erst nach ca. 216 Jahren erreicht.

1-2.3 R. G. PEARSON

Im Jahre 1972 schreibt Pearson, dass trotz der Unterschiede zwischen Art, Größe, Typ und Feuchtigkeitsgehalt der Proben die Ergebnisse einer Reihe von Forschungsarbeiten über den Einfluss der Dauerbelastung auf die Biegefestigkeit von Holz im Allgemeinen übereinstimmen. Deswegen wurden von ihm die zuvor ermittelten experimentellen Untersuchungsergebnisse verschiedener Quellen gemeinsam dargestellt, bewertet und die folgende lineare Regressionsgleichung bestimmt (Pearson, 1972):

$$SL = 91,5 - 7 \cdot \log(t_f) \quad (1.4)$$

mit:

SL Lastniveau (Verhältnis zwischen der Spannung und der Referenzspannung) [%]
 t_f Zeit [h]

Eine Dauerstandfestigkeit, als unterer Grenzwert des Spannungsniveaus unter welchem selbst nach sehr langer, konstanter Beanspruchung kein Versagen zu erwarten ist, konnte nicht nachgewiesen werden. Solch ein Grenzwert würde jedoch unter 50 % der Kurzzeitfestigkeit liegen (Pearson, 1972). Der Faktor von 9/16 gemäß Tiemann (1909) wird laut Gl. (1.4) nach rd. 20 Jahren erreicht.

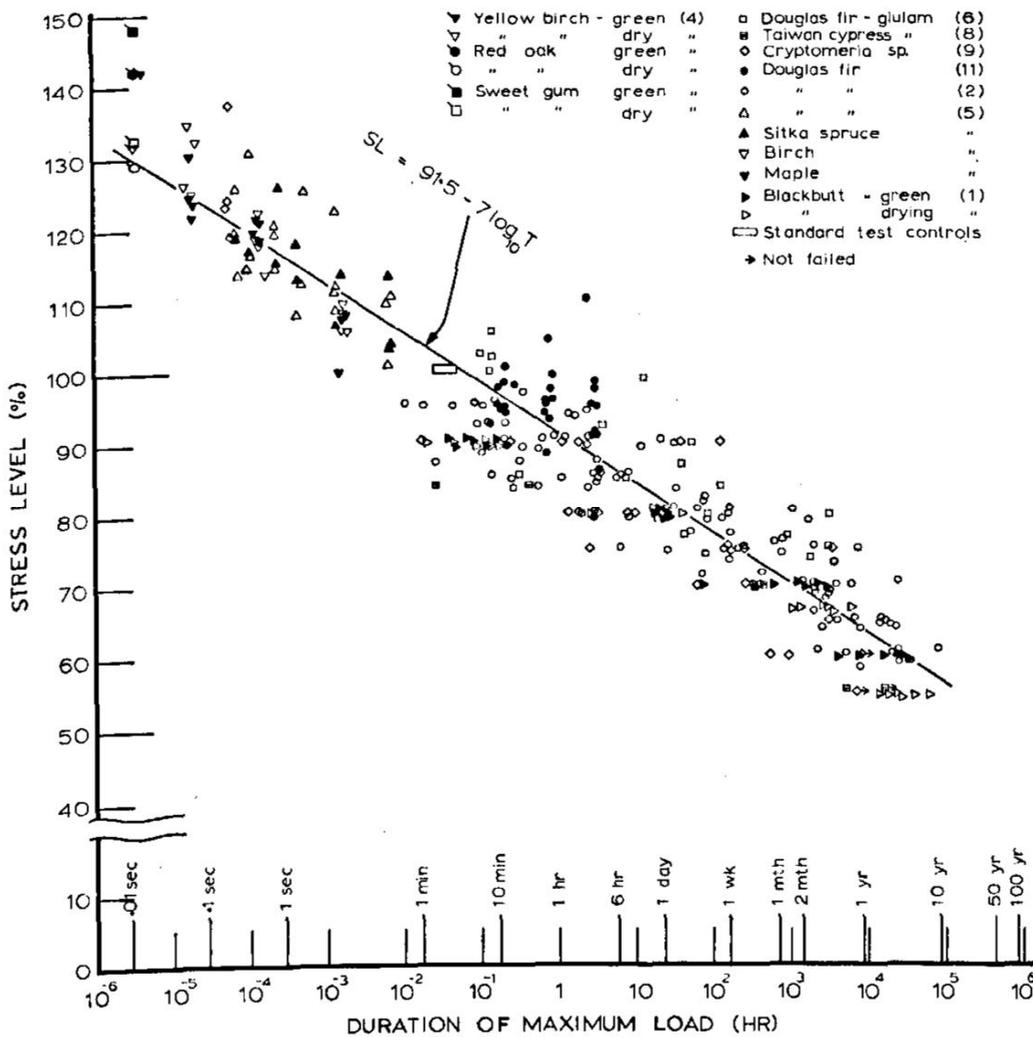


Abbildung 1-5: DOL-Diagramm nach Pearson (Pearson, 1972)

In Tabelle 1-2 sind die zugrundeliegenden Untersuchungen des DoL-Diagrammes nach Pearson (1972) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass nicht nur die Holzart einen weiten Bereich abdeckt, sondern auch die Holzfeuchte die gesamte Bandbreite vom Fasersättigungsbereich bis zum darrtrockenen Zustand widerspiegelt. Zusätzlich ist in Tabelle 1-2 die zugrunde liegende Belastungsart der jeweiligen Untersuchungen angegeben, jedoch ist zu beachten, dass Pearson (1972) ausschließlich Biegeversuche in seiner Arbeit einfließen ließ.

Tabelle 1-2: Zusammenstellung der Untersuchungen als Basis für die Gleichung nach (Pearson, 1972)

Referenz	Holzart	Holzfeuchte	Maße	Anzahl der Tests	Art des Testes
Armstrong (1971)	Eukalyptus	konstant im FSB ¹	51 × 51 × 1016 mm ³	24	konstante Belastung, 4-Punkt Biegeversuch
		FSB ¹ (trocknen unter Last)		24	Spannungsniveaus: 90 %, 80 %, 70 % und 60 % Referenzversuche im FSB
Clouser (1959)	Douglasie	6 %	25 × 25 × 559 mm ³	58	konstante Belastung, mittig belasteter Biegeversuch
		12 %		51	konstante Belastung, mittig belasteter Biegeversuch
James (1962)	Eiche	FSB ¹	20 × 20 × 279 mm ³	24	mittige Beanspruchung in einer Kerbschlagprüfung
		13,8 %		24	
	Amberbaum	FSB ¹		29	„matched specimens“ geprüft unter statischer Biegebeanspruchung
		14,8 %		29	
	Birke	FSB ¹		15	–
		14 %		15	
Liska (1950)	Douglasie	12 %	25 × 51 × 406 mm ³	121	konstanter weggesteuerter 3-Punkt Biegeversuch. (5, 25, 152, 305, 2032 mm/min)
	Fichte	12 %		159	
	Ahorn	12 %		57	
	Birke	12 %		48	
Littleford	Douglasie (BSH)	Trocken	83 × 83 × 4877 mm ³	29	konstante Belastung, 4-Punkt Biegeversuch, Spannweite: 4267 mm
Sasaki und Maku (1963)	Scheinzypresse (BSH)	Trocken	40 × 60 × 2000 mm ³	5	konstante Belastung, auskragende Balken mit einer Belastung die 1500 mm vom Auflager entfernt ist.
Sugiyama (1956)	Sicheltanne	Trocken	100 × 10 × 1250 mm ³	5	stoßartige Aufbringung definierter Last; auskragende Balken mit einer Belastung, die 400 – 450 mm vom Auflager entfernt ist.
		Trocken	50 × 15 × 600 mm ³	23 ²	
		Trocken	35 × 13 × 600 mm ³	23 ²	
Youngs und Hilbrand (1963)	Douglasie	6 %	25 × 25 × 559 mm ³	15	konstante Dehnungsrate, Bruch in 1, 4 und 16 Stunden, 3-Punkt Biegeversuch
		12 %		15	

Anmerkungen:

¹⁾... FSB... Fasersättigungsbereich

²⁾... andere Probekörper wurden mit Lastniveaus < 50 % getestet ohne innerhalb von 10 Monaten ein Versagen aufzuweisen

1-2.4 BORG MADSEN

Der Beginn der gegenwärtigen Ära der DoL-Forschung fand um 1970 statt, als Madsen, einer der Vorreiter für die Forschungsarbeiten zur Dauerbelastung von Bauholz, dieses anstatt kleiner fehlerfreier Proben für seine Untersuchungen verwendete. Es gab Testergebnisse, die darauf hinwiesen, dass das Phänomen des Kriechbruches von Bauholz sich von jenem kleineren fehlerfreien Proben unterschied. Madsen führte dazu Biegeversuche an kanadischen Fichten-Probekörpern mit den Abmessungen von $38 \times 140 \text{ mm}^2$ unter Anwendung unterschiedlicher Belastungsverfahren durch. Seine Annahmen waren, dass die Zeit bis zum Versagen von dem jeweiligen Spannungsniveau abhängt und dass der DoL-Effekt bei Bauholz hoher Güte größer ist, als jener bei geringer Güte (Li, 2015).

In Tabelle 1-3 sind die Quantile von zwei Populationen aufgelistet. Diese Quantile basieren auf der Kurzzeitbiegefestigkeit, wobei das Versagen infolge konstanter Belastungsgeschwindigkeit im Mittel innerhalb von fünf Minuten eingetreten ist. Man kann erkennen, dass die Population II eine höhere Qualität aufweist. In Abbildung 1-6 sind die Kurven der Quantile derart geplottet, dass auf der Ordinate der relative Anteil der überlebenden Probekörper in Prozent und auf der Abszisse die Zeitdauer konstanter Beanspruchung in Stunden aufgetragen ist. Beim Vergleich annähernd ähnlicher Quantile kann man erkennen, dass Bauholz höherer Güte (Population II) bei gegebener Prüfzeit prozentuell mehr Versagensfälle aufweist. Dies bekräftigt die zuvor getätigte Annahme. Zu beachten ist, dass nicht alle Linien bei 100 % starten. Das liegt daran, dass es sich um einen logarithmischen Maßstab handelt und es daher auf der Abszisse keinen Nullpunkt gibt. Das bedeutet, dass bei den höheren Quantilen der Population II die Bruchzeit $t_f < 0,1 \text{ h}$ ist.

Tabelle 1-3: Unterschiedliche Quantilniveaus der Kurzzeitbiegefestigkeit von zwei Populationen (Madsen und Nielsen, 1992)

	Population I [N/mm ²]	Population II [N/mm ²]
5 % Quantile	7,4	13,9
10 % Quantile	9,7	20,7
25 % Quantile	14,6	26,4
50 % Quantile	21,4	31,7

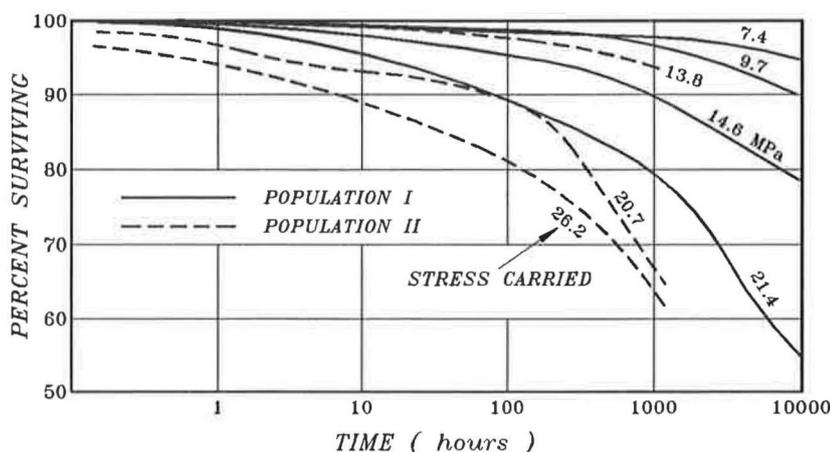


Abbildung 1-6: Prozentuell überlebende Probekörper unter verschiedenen Lastniveaus (Quantile) der zwei in Tabelle 1-3 definierten Populationen (Madsen und Nielsen, 1992)

Dies ist ein gewisser Widerspruch der Clustertheorie. Diese sieht Bauholz als Komposit aus auf der Skalenebene von Bauholz merkmalsfreiem Material und lokalen (Äste, Risse, etc.) bzw. globalen Merkmalen (globale Schrägfaser, Druckholz, etc.). Bauholz geringer Güte ist im Allg. durch größere

lokale Merkmale / Fehlstellen in Kombination mit einer zudem höheren Auftretenshäufigkeit gekennzeichnet als Bauholz hoher Güte. Abgesehen von der Rohdichte und damit korrelierte mechanische Kenngrößen ist der Unterschied in den Kenngrößen des merkmalsfreien Holzanteiles zwischen diesen beiden Bauholzgüten gering bzw. im Allgemeinen deutlich weniger ausgeprägt als zwischen den Kenngrößen des Bauholzes beider Güten (merkmalsfreie Holzanteile kombiniert mit lokalen und globalen Fehlstellen). Mit zunehmender Bauholzgüte nimmt somit der Unterschied in den Kenngrößen zwischen Bauholz und merkmalsfreien Holzbereichen ab. Während im Bauholz geringer Güte in Folge konstanter Beanspruchung eine Clusterung der Schädigungen bevorzugt, wenn nicht ausschließlich in den Bereichen der Fehlstellen zu erwarten ist, sind bei Bauholz hoher Güte nur geringen Unterschiede zu den merkmalsfreien Holzbereichen vorhanden und auch Clusterungen innerhalb der merkmalsfreien Bereiche möglich. Damit einhergehend steigt der Anteil an Volumen in welchem sich ein Versagen in Folge konstanter Langzeitbeanspruchung ereignen kann. Dieser Umstand wird insofern begünstigt, da das jeweilige Belastungsniveau sich auf die Tragfähigkeit des Bauholzes unter statischer Kurzzeitbeanspruchung bezieht. Somit ist mit zunehmender Bauholzgüte eine Verschiebung der Lastniveau-Verhältnisse bezogen auf das Potential der Fehlstellen und jenes der merkmalsfreien Holzbereiche gegeben. Das heißt, dass die merkmalsfreien Holzbereiche bei Bauholz hoher Güte bei gleichem Lastniveau proportional stärker beansprucht werden als bei Bauholz geringer Güte. Man kann schlussfolgern, dass sich im Material ein Volumeneffekt bemerkbar macht, welcher dazu führt, dass Material hoher Güte ein ausgeprägteres DoL-Verhalten aufweist als Bauholz geringer Güte.

Da man einen Probekörper nur einmal zum Versagen bringen kann, ist es für die Langzeituntersuchungen erforderlich, die zugehörigen Kurzzeitfestigkeiten bestmöglich zu prognostizieren. In Abbildung 1-7 (links) sind die Ergebnisse aus den DoL-Untersuchungen von Madsen als „x“ gekennzeichnet und nach der Versagensdauer aufsteigend gereiht. Ganz links sind die Probekörper, die schon beim Aufbringen der Belastung versagt haben („broke during uploading“; B.O.L.). Im Anschluss dazu sind die langzeitbeanspruchten Proben, die während der Beanspruchung versagt haben, nach ihrer Beanspruchungsdauer bis Versagen aufsteigend gereiht dargestellt. Nach Abbruch der Langzeituntersuchungen sind die überlebenden Probekörper einem statischen Kurzzeittest mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit unterworfen worden, bei dem die verbleibende Tragfähigkeit (Resttragfähigkeit) bestimmt wurde. Nun ist es auf Basis der aus statischen Kurzzeitversuchen geschätzten Verteilungsfunktion und unter der Annahme einer aufsteigenden Ausfallszeit im Rang äquivalent zum aufsteigenden Widerstand („equal rank assumption“) möglich, eine Funktion darzustellen, die die Kurzzeitfestigkeit der DoL-Probekörper prognostiziert. In Abbildung 1-7 (links) wird exemplarisch für einen Probekörper diese Methodik vorgestellt. Dieser Probekörper wird mit 14 N/mm^2 (A) in der Langzeitbeanspruchung belastet und seine zugeordnete Kurzzeitfestigkeit ist mit B eingezeichnet.

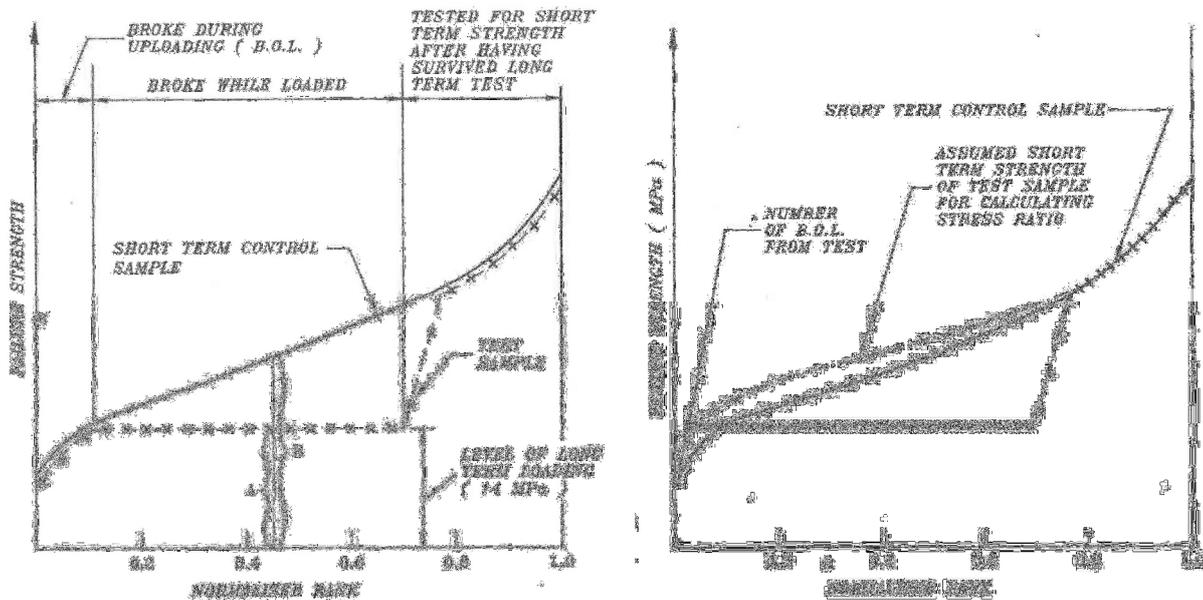


Abbildung 1-7: Prognosehypothese zur Ermittlung der Kurzzeitfestigkeit (Madsen und Nielsen, 1992)

Wie in Abbildung 1-7 (rechts) dargelegt kann sich aus der Charakteristik der DoL-Prüfkörper welche bereits bei der Lastaufbringung versagen die Notwendigkeit einer Adaptierung der Verteilungsfunktion der Kurzzeitfestigkeiten ergeben, um die Prognosefähigkeit der Zuordnung zwischen den DoL-Prüfdaten und den Kurzzeitfestigkeiten zu verbessern. Hierzu wird die Verteilungsfunktion aus der statischen Kurzzeitbeanspruchung derart verändert, dass diese die unteren und oberen Versuchsergebnisse aus den DoL-Prüfungen entsprechend repräsentiert. Somit ist es für alle DoL-Proben unter den genannten Annahmen möglich, die Kurzzeitfestigkeit vorherzusagen.

Die Probekörper die bereits beim Aufbringen der Belastung versagen, repräsentieren jene Proben welche statistisch eine Tragfähigkeit unter bzw. gleich dem Lastniveau der DoL-Prüfungen aufweisen. Ausfälle während der DoL-Prüfung erfolgen in Reihenfolge ihrer individuellen Beanspruchung, ihrem individuellen Lastniveau. Im Sinne des Rissmodells erfolgt hier das Versagen aufgrund des fortschreitenden Risswachstums nach Erreichen einer kritischen Risslänge. Probekörper welche innerhalb des DoL-Prüfzeitrahmens nicht versagen, erreichten noch nicht diese kritische Risslänge oder hatten noch nicht ausreichend Zeit, dass das fortschreitende Risswachstum zum Versagen führte. Wohingegen im ersteren Fall eine Resttragfähigkeit äquivalent zur statischen Kurzzeitfestigkeit erwartet werden kann, ist im zweiten Fall eine Resttragfähigkeit kleiner der statischen Kurzzeitfestigkeit zu erwarten. (Madsen und Nielsen, 1992). Dieses Materialverhalten lässt sich sehr gut mit dem später, im Kapitel 1-4.4, definierten Rissmodell erklären.

1-2.5 PREBEN HOFFMEYER

Hoffmeyer (1990) führte DoL-Untersuchungen an Fichtenholz in Bauholzdimension durch. Dafür wurden Biegeversuche unter konstanter Last bei konstantem oder variierendem Feuchtigkeitsgehalt umgesetzt. Aus rund 9000 Probekörpern wurden 1100 Probekörper selektiert, die den Qualitätsanforderungen für die Prüfungen entsprachen. Die ausgeschiedenen 7900 Probekörper hatten zum Großteil eine zu hohe Qualität. Alle Untersuchungen wurden als Vier-Punkt Biegeversuche mit einer Spannweite von 1720 mm und einem Mittelabschnitt (Abstand zwischen der Lasteinleitung, Bereich des konstanten Moments) von 600 mm durchgeführt. Hoffmeyer führte Kurzzeittests durch und ermittelte über eine multiple Regressionsgleichung auf Basis zerstörungsfreier Parameter ein Prognosemodell zur Vorhersage der Kurzzeitfestigkeit von langzeitbeanspruchten Fichtenproben.

Material

Hoffmeyer verwendete Fichtenholz aus Südschweden. Die Probekörper wurden auf die Abmessungen $44 \times 95 \text{ mm}^2$ gehobelt und auf eine Länge von 1800 mm geschnitten. Dabei wurde darauf Rücksicht genommen, dass sich die qualitätsbestimmenden Fehlstellen im mittleren Bereich der Probekörper befanden. Zur Bestimmung der multiplen Regressionsgleichung, wurden nach dem Zufallsprinzip 300 Probekörper ausgewählt. Von diesen Probekörpern wurde unter Verwendung einer „Cook Bolinder“ Sortiermaschine ein Zusammenhang zwischen der Biegefestigkeit und ausgewählten zerstörungsfreien Parametern gebildet. Als zerstörungsfreie Parameter wurde das Astflächenverhältnis MKAR und der E-Modul längs zur Faser festgelegt (Hoffmeyer, 1990).

$$f_m = 7,29 + 4,321 \cdot 10^{-3} MOECB - 29,4 \cdot MKAR \quad \text{mit: } R^2 = 0,67 \quad (1.5)$$

mit:

f_m Biegefestigkeit [N/mm²]

$MOECB$ Elastizitätsmodul [N/mm²] des kritischen Abschnittes basierend auf dem Mittelwert der drei Sortiermaschinenablesungen (CB \triangleq Cook-Bolinder), die dem kritischen Abschnitt am nächsten liegen

$MKAR$... Astflächenverhältnis [-]: Astflächenverhältnis des äußeren 1/4 des Querschnitts auf der Biege-Zugseite. Die Astfläche wird als das Verhältnis zwischen der im Querschnitt projizierten Fläche von Ästen und der Bezugsquerschnittsfläche über eine Brettsegmentlänge von 150 mm bestimmt. Hierbei werden überlappende Astflächen nur einmal einbezogen.

Im Anschluss wurden die 1100 gewonnenen Probekörper in Gruppen eingeteilt. Insgesamt ergaben sich 16 Gruppen mit jeweils 51 Probekörpern. Acht Gruppen wurden für die Kurzzeittests verwendet, wobei vier Gruppen bei einer relativen Luftfeuchte von 55 % ($u \cong 11$ %) und vier Gruppen bei 90 % ($u \cong 20$ %) getestet wurden. Die restlichen acht Gruppen wurden zu vier Gruppen zusammengefasst (jeweils 102 Probekörper) und gemäß Tabelle 1-4 für die Langzeittests verwendet. In Tabelle 1-4 sind zwei Spalten für die Holzfeuchte angegeben. Dies liegt daran, dass sich die erste Spalte auf den Holzfeuchtebereich der Langzeittests bezieht und die zweite Spalte jene Holzfeuchte angibt, die bei den Kurzzeittests vorlag. Bei den zyklisch variierenden Langzeittests wurden als Basis jene Kurzzeittests herangezogen, die bei einem Holzfeuchtegehalt von $u \cong 20$ % durchgeführt worden sind.

Tabelle 1-4: Anzahl der Probekörper, Holzfeuchte und Lastniveaus für Langzeitversuche (Hoffmeyer, 1990)

Holzfeuchte bei Langzeittests	Holzfeuchte	Anzahl Probekörper	Lastniveau als Quantil der Kurzzeitfestigkeit	Belastung [N/mm ²]
$u \cong 11$ %	$u \cong 11$ %	102	5 %-Quantil	28,2
$u \cong 20$ %	$u \cong 20$ %	102	5 %-Quantil	26,5
$u \cong 20$ %	$u \cong 20$ %	102	15 %-Quantil	31,4
$u: 11$ % \leftrightarrow 20 %	$u \cong 20$ %	102	5 %-Quantil	26,5

Methoden

Die Prüfstände wurden derart konstruiert, sodass gleichzeitig 200 Langzeittests durchgeführt werden konnten. Die Langzeitbelastung auf die Probe wurde durch einen Lasthebel aufgebracht, der durch die Masse eines Stahlzylinders zu einer Riemenscheibe gezogen wurde. (siehe Abbildung 1-8) Das Riemenscheibenverhältnis von 5,16 bedeutet, dass die Langzeitbelastung in der Größenordnung von 6 bis 7 kN durch eine Stahlrohrmasse in der Größenordnung von 120 bis 140 kg erreicht wird (Hoffmeyer und Sørensen, 2007).

Tests bei konstantem Klima wurden in Klimäräumen mit einer Präzision der relativen Luftfeuchte von $\pm 0,5\%$ durchgeführt. Als zusätzliche Vorsichtsmaßnahme wurden alle Probekörper in einem 0,2 mm Polyethylenschlauch versiegelt. Probekörper, die zyklisch variierender relativer Feuchtigkeit ausgesetzt waren, wurden in feuchtem Zustand belastet, während sie noch in Polyethylenschlauch versiegelt waren. Nach einer Woche der Kriechmessungen wurde der Schlauch entfernt und die variierende Feuchtigkeit wurde durch Variieren des Klimas des gesamten Raumes erreicht. Die Probekörper wurden zuerst drei Wochen trockenem Klima, dann vier Wochen feuchtem Klima, gefolgt von vier Wochen trockenem Klima usw. ausgesetzt. Die Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit von einem stationären Zustand zu einem anderen fand in ungefähr sechs Stunden statt. Probekörper, die eine Langzeitbelastung von etwa 13 Jahren überlebten, wurden nach zwei-monatiger Pause in einem Kurzzeittest bis zum Bruch belastet (Hoffmeyer und Sørensen, 2007).

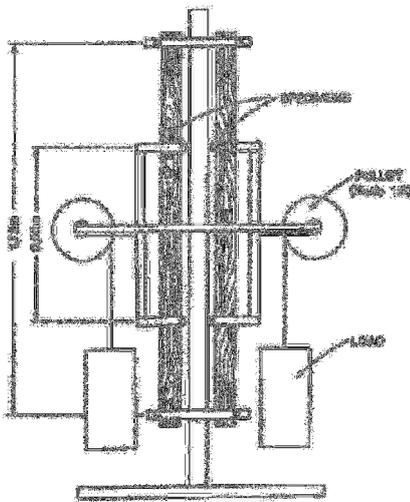


Abbildung 1-8: Prüfaufbau der Langzeituntersuchungen (Hoffmeyer, 1990)

Ergebnisse und Diskussion

Wie bereits in Tabelle 1-4 aufgelistet, belastete Hoffmeyer seine Proben entsprechend einem bestimmten Quantil der Kurzzeitfestigkeit. Als Vergleich seiner Ergebnisse wurde die Madison Kurve herangezogen. Zur Auswertung seiner DoL-Prüfungen und Zuordnung dieser zu einer entsprechenden Kurzzeitfestigkeit verwendete Hoffmeyer zwei Methoden: Die erste Methode ist die sogenannte „equal rank assumption“, welche bereits erfolgreich von Madsen angewendet und im Kapitel 1-2.4 erläutert wurde. Als zweite Methode wurde zur Vorhersage der Kurzzeitfestigkeit die im Zuge der Untersuchungen von Hoffmeyer ermittelte Regressionsgleichung verwendet. Da sich die Prognosefähigkeit der Kurzzeitfestigkeit mittels Regressionsgleichung geringer als erwartet darstellte konnte mit der Methode der „equal rank assumption“ ein stabileres Ergebnis erzielt werden. Das heißt, dass die Streuungen der Ergebnisse geringer waren. Im Anschluss dazu, wurden die Daten an vier verschiedenen DoL-Modellen kalibriert, nämlich an jene von Gerhards, Barrett und Foschi, Foschi und Yao und Nielsen. Die besten Ergebnisse konnten mit dem einfachsten DoL-Modell nach Gerhards erzielt werden.

Die Untersuchungen von Wood (1951) haben gezeigt, dass der Einfluss einer Feuchtigkeit zwischen $u = 6\%$ und $u = 12\%$ keine oder nur eine geringe Rolle auf das DoL-Verhalten von merkmalsfreien Kleinproben unter Biegebeanspruchung spielt. Hoffmeyer, welcher einen Holzfeuchtebereich von $u = 11\%$ bis 20% untersuchte, beobachtete hingegen einen deutlichen Einfluss der Feuchtigkeit, insbesondere dann wenn die Feuchtigkeit zyklisch variiert wurde.

In seinen Untersuchungen wurden folgende Beobachtungen gemacht (Hoffmeyer, 1990):

- Der DOL-Effekt bei trockenem Bauholz ist geringfügig geringer als bei der traditionellen Madison-Funktion welche auf Prüfungen an merkmalsfreien Kleinproben basiert.
- Die Feuchtigkeit hat einen signifikanten Einfluss auf die Zeit bis zum Versagen, sodass die Madison Funktion für feuchtes Holz entsprechend zu adaptieren ist.
- Eine Variation des Feuchtigkeitsgehalts führt zu einer weiteren Verkürzung der Versagenszeit.
- Nach 22 Monaten Belastung im 5 %-Quantilbereich hielten 35 %, 15 % und 1 % der trockenen, feuchten und zyklisch-feuchtebeanspruchten Proben der Last stand.
- Es wurden keine Anzeichen für eine Dauerstandfestigkeit gefunden.

Zur Charakterisierung der DoL-Daten erwies sich die lineare Beziehung zwischen Belastungsniveau und logarithmischer Zeit bis zum Versagen, wie formal von Pearson (1972) definiert, als am besten geeignet. Im Folgenden ist eine Auflistung der an die Versuchsdaten kalibrierten Regressionsmodelle angeführt (Hoffmeyer, 1990):

$$SL = 95,0 - 6,36 \cdot \log(t_f) \quad (u \approx 11 \%, \text{ Lastniveau} = 5 \text{ \% -Quantil}) \quad (1.6)$$

$$SL = 84,5 - 5,11 \cdot \log(t_f) \quad (u \approx 20 \%, \text{ Lastniveau} = 5 \text{ \% -Quantil}) \quad (1.7)$$

$$SL = 93,1 - 7,74 \cdot \log(t_f) \quad (u \approx 20 \%, \text{ Lastniveau} = 15 \text{ \% -Quantil}) \quad (1.8)$$

$$SL = 88,5 - 7,58 \cdot \log(t_f) \quad (11 \% \leq u \leq 20 \%, \text{ Lastniveau} = 5 \text{ \% -Quantil}) \quad (1.9)$$

mit:

$$SL \dots\dots\dots \text{Lastniveau [\%]}$$

$$t_f \dots\dots\dots \text{Zeit [Stunden]}$$

In Abbildung 1-9 sind die Regressionsgleichungen graphisch dargestellt. Die Madison Kurve nimmt dabei, bezogen auf eine Belastungsdauer von zehn Jahren, ein Lastniveau des Versagens von 62 % ein. Betrachtet man in Abbildung 1-9 das 100 % Lastniveau, so kann man erkennen, dass es eine Verschiebung in den Referenzpunkten gibt. Da die Prüfzeit im Kurzzeittest immer annähernd gleich war, müssten alle Regressionsfunktionen durch den gleichen Punkt gehen. Daraus lässt sich schließen, dass die Kurzzeitversuche nicht in die Regressionsgleichungen eingeflossen sind.

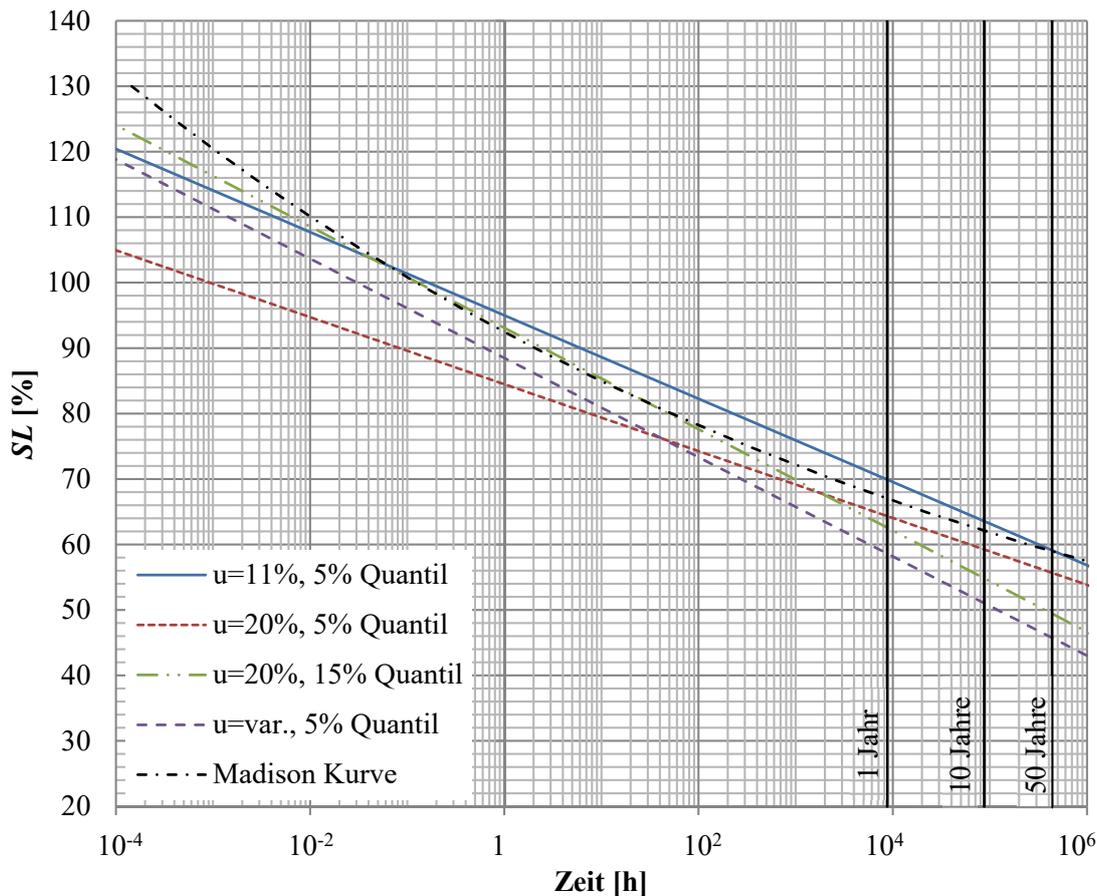


Abbildung 1-9: Graphische Darstellung der Regressionsgleichungen von Hoffmeyer

Setzt man in die obige Regressionsgleichungen eine Belastungsdauer von zehn Jahren ein, so zeigt sich, dass die sich daraus ergebenden Lastniveaus des Versagens bei 64 %, 59 %, 55 % bzw. 51 % der jeweiligen Kurzzeitfestigkeit liegen (Hoffmeyer, 1990).

In Abbildung 1-10 sind die Ergebnisse von Hoffmeyer angeführt. Links oben (a) ist das DoL-Diagramm für einen Feuchtegehalt von $u = 11\%$ und ein Belastungsniveau entsprechend dem 5%-Quantil der Kurzzeitfestigkeit dargestellt.

Als Referenz ist in jedem Diagramm die logarithmisch lineare Version der Madison Funktion angegeben. Diese Funktion lässt sich durch Gl. (1.10) ausdrücken (Thelandersson und Larsen, 2003):

$$SL = 90,4 - 6,3 \cdot \log(t_f) \tag{1.10}$$

mit:

- SLLastniveau (Verhältnis zwischen der Spannung und der Referenzspannung) [%]
- t_f Zeit [h]

Zieht man einen Vergleich zwischen (b) und (c) ist zu erkennen, dass bei gleichem Feuchtegehalt von $u = 20\%$ das höhere Belastungsquantil besser abschneidet. Es ist jedoch zu erwähnen, dass sich einige Durchläufer in Diagramm (b) befinden, welche bei entsprechender Berücksichtigung den Datenverlauf im unteren Bereich noch beeinflussen. Der stärkste DoL-Effekt zeigt sich im Diagramm (d), wo bei den zugrundeliegenden Proben der Holzfeuchtegehalt zwischen $u = 11\%$ und $u = 20\%$ variiert wurde.

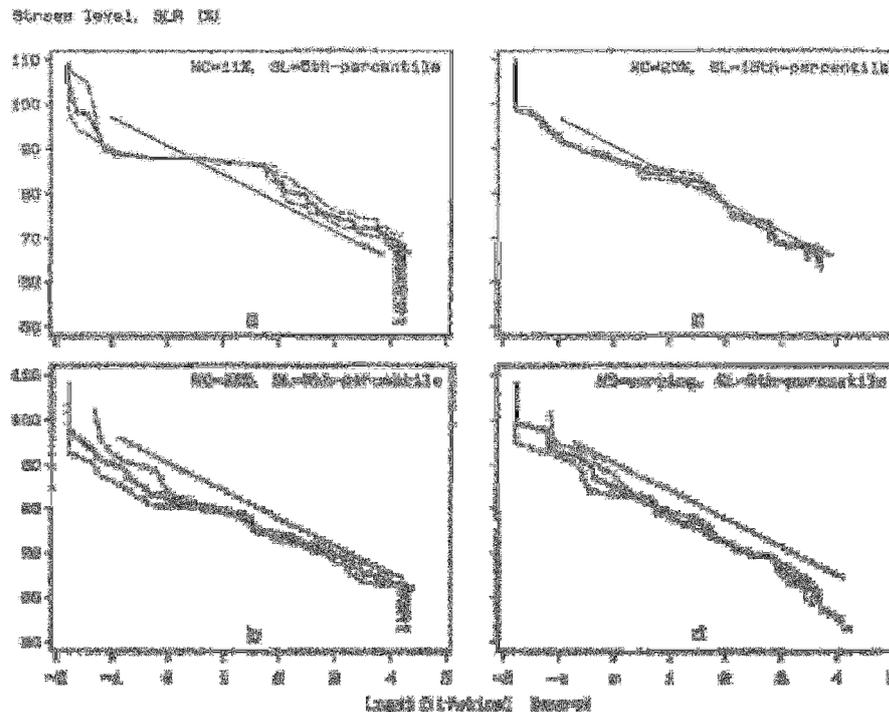


Abbildung 1-10: *DoL-Ergebnisse für Fichtenholz. Strichlierte Verläufe repräsentieren Gruppen von 51 Proben, während der durchgezogene Verlauf die kombinierten Daten aus 102 Proben darstellt. Pfeile definieren Durchläufer. Die durchgezogene gerade Linie repräsentiert die Madison Funktion (Hoffmeyer, 1990).*

1-2.6 ZUSAMMENFASSUNG DER HISTORISCHEN EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN ZUM DoL-EFFEKT

Die bisherig aufgezeigten Untersuchungen beschäftigen sich primär mit biegebeanspruchtem Holz. Dabei ist zu unterscheiden, ob diese Untersuchungen an merkmalsfreien Kleinproben oder an Bauholz durchgeführt worden sind. Besonderes Augenmerk sollte auf die Beanspruchungsart gelegt werden, da diese in der Literatur vernachlässigt wurde. Ein Beispiel für die außer Acht gelassenen Beanspruchungsarten wären die Untersuchungen von Wood (1951) der seine eigenen Untersuchungen, die einer konstanten Belastung zu Grunde liegen, mit jenen Untersuchungen von Liska (1950) in einem Diagramm vermischte. Die Untersuchungen von Liska (1950) wurden mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit durchgeführt. Nach Köhler (2007) ist in Abbildung 1-1 dieser Unterschied graphisch dargestellt. Eine Möglichkeit zur Berücksichtigung der Belastungsarten und die Methodik der Umrechnung werden in Kapitel 1-2.7 als Conclusio der Literaturrecherche zum DoL-Effekt vorgestellt.

In Bezug auf den Einfluss der Holzfeuchte auf den DoL-Effekt gibt es in der Literatur widersprüchliche Angaben. Nach Wood (1951) und Pearson (1972) hat die Holzfeuchte nur einen geringen Einfluss auf den DoL-Effekt. Hoffmeyer (1990) hingegen wählte gezielt Gruppen mit unterschiedlichen Holzfeuchten aus und stellte fest, dass der ungünstigste Fall bei zyklisch variierenden Bedingungen eintritt. Daraus lässt sich schließen, dass der Holzfeuchteeinfluss unterschiedlich stark ermittelt wurde. Es ist jedoch zu beachten, dass der Holzfeuchtebereich und auch die Holzskala (Bauholz, „clear-wood“) stark unterschiedlich waren.

Die Herausforderung von DoL-Versuchen besteht darin, eine mögliche Kurzzeitfestigkeit jedweder langzeitbeanspruchten Probe vorhersagen zu können. Madsen (1992) entwickelte die Methode der „equal rank assumption“, die bei der Auswertung von DoL-Versuchen sehr hilfreich ist, da es somit gelingt, die Streuungen im Material Holz rechnerisch zu berücksichtigen. Diese Methode kam auch bei Hoffmeyer

(1990) zur Anwendung und hatte entscheidende Vorteile gegenüber der Prognostizierung der Kurzzeitfestigkeit über zerstörungsfreie Kennwerte.

1-2.7 CONCLUSIO ZU DEN HISTORISCHEN EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN ZUM DOL-EFFEKT

Da die Motivation für die Wahl der Funktionspunkte von Wood (1951), wie in Abschnitt 1-2.2 erwähnt, nicht nachvollzogen werden kann, wurde im Rahmen dieser Arbeit versucht, die Madison Kurve neu aufzubereiten und gegebenenfalls zu modifizieren. Hierfür wurden die Ergebnisse der Untersuchungen von Wood (1951) und Liska (1950) herangezogen. Da die Daten als Einzelwerte nicht vorlagen, wurden diese aus den entsprechenden Ergebnisdiagrammen (Abbildung 1-2 und Abbildung 1-3) reproduziert und zur weiteren Verwendung aufbereitet. Dabei wurde auch Rücksicht auf die Belastungsart genommen und versucht, die Daten von Liska über eine eigens aufgestellte Schädigungshypothese in eine schädigungsäquivalente Zeit, die einer konstanten Belastung entspricht, zu transformieren. Sofern die getätigten Annahmen und verwendeten Modellansätze zutreffend sind, ist es in Folge zweckmäßig, die Daten aus Versuchen basierend auf einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit („ramp-loading“) sowie einer konstanten Belastung („DoL“) gemeinsam in einem Diagramm darzustellen und zu bewerten. Die Daten von Elmendorf blieben in dieser Neuaufbereitung der Madison Kurve unberücksichtigt. Gründe hierfür sind: (i) die zugrundeliegende Zeit dieser Untersuchung in der Literatur ist nicht eindeutig, (ii) eine 75 prozentige Erhöhung der statischen Kurzzeitfestigkeit in Folge von Stoßbelastungen („impact tests“) erscheint dem Autor dieser Arbeit als zu hoch und (iii) der geringe Probenumfang dieser Untersuchungen.

Für die zu Grunde liegende Form der neu aufbereiteten Madison Funktion wurde der formale Ansatz nach Pearson (1972) gewählt:

$$SL = A - B \cdot \log(t_f) \tag{1.11}$$

mit:

- SL*Lastniveau (Verhältnis zwischen der Spannung und der statischen Kurzzeitfestigkeit) [%]
- t_f*Zeit bis zum Versagen
- A, B*Modellparameter

Nach Umformung der Gl. (1.11) erhält man für *t_f*:

$$t_f = 10^{\frac{A-SL}{B}} \tag{1.12}$$

Wie in Abbildung 1-1 ersichtlich, gibt es einen Unterschied in der Belastungsart zwischen dem Kurzzeittest und dem Langzeittest. Bei den Tests von Liska handelte es sich um Kurzzeittests, durchgeführt bei konstanter Belastungsgeschwindigkeit, wohingegen die Langzeittests von Wood unter konstanter Belastung bewerkstelligt wurden. Um diese verschiedenen Belastungsarten in einem Diagramm zu vereinen, wurden die Tests von Liska unter der Annahme, dass der funktionale Zusammenhang in Gl. (1.11) das reale Verhalten ausreichend beschreibt, schädigungsäquivalent in eine konstante Belastung umgewandelt. Mathematisch gesehen entspricht dies dem Integral über die Zeit. Dabei wird ein Wichtungsfaktor eingeführt, der die Zeiten bis zum Versagen bei Prüfungen mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit jenen bei Prüfungen mit konstanter Belastung gegenüberstellt. Im Zähler wird dabei die Zeit bis zum Versagen bezogen auf das jeweilige Lastniveau bei konstanter Belastung berechnet. Im Nenner wird die Zeit bis zum Versagen in Abhängigkeit vom jeweiligen Lastniveau zwischen *t* = 0 und *t* = *t_f* im Zuge von Prüfungen mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit berechnet. Zu beachten ist, dass das Lastniveau bei *t* = 0 auch Null ist. Das bedeutet, dass bei kleinen Lastniveaus ein kleiner Gewichtungsfaktor resultiert und somit der jeweilige Zeitschritt einen sehr geringen Einfluss aufweist.

$$t_{\text{const}} = \int_{t=0}^{t=t_f} f_{\text{Wichtung}} \cdot dt = \int_{t=0}^{t=t_f} \frac{10^{\frac{A-SL}{B}}}{10^{\frac{A-SL-t}{B}}} \cdot dt \quad (1.13)$$

Durch Auflösen dieses Integrals ergibt sich folgende Gleichung:

$$t_{\text{const}} = \frac{\left(10^{\frac{SL}{B}} - 1\right) \cdot 10^{-\frac{SL}{B}} \cdot B \cdot t_s}{SL \cdot \ln(10)} \quad (1.14)$$

Das bedeutet, dass lt. Gl. (1.14) bei Prüfungen mit konstanter Belastung ein Versagen in wesentlich kürzerer Zeit zu erwarten ist als bei Prüfungen mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit. In Folge dessen kann mittels dieser Beziehung und unter der Annahme, dass der formale Ansatz das reale Schädigungsverhalten von Holz in ausreichender Weise approximiert, eine schädigungsäquivalente Bewertung von unterschiedlich durchgeführten Prüfungen umgesetzt werden.

Wenn man nun diese schädigungsäquivalente Bewertung für die in Abbildung 1-3 dargestellten Daten von Liska (1950) durchführt, kann ein schlüssiger Zusammenhang zwischen den Kurzzeittest und den Langzeituntersuchungen von Wood (1951) hergestellt werden. In Abbildung 1-11 wurde von diesen sechs Gruppen an Untersuchungen jeweils der Mittelwert gebildet; zudem enthalten ist das 95 %-Konfidenzintervall für die Mittelwerte, ermittelt nach der modifizierten COX-Methode (näheres dazu siehe Kapitel 2-2.4).

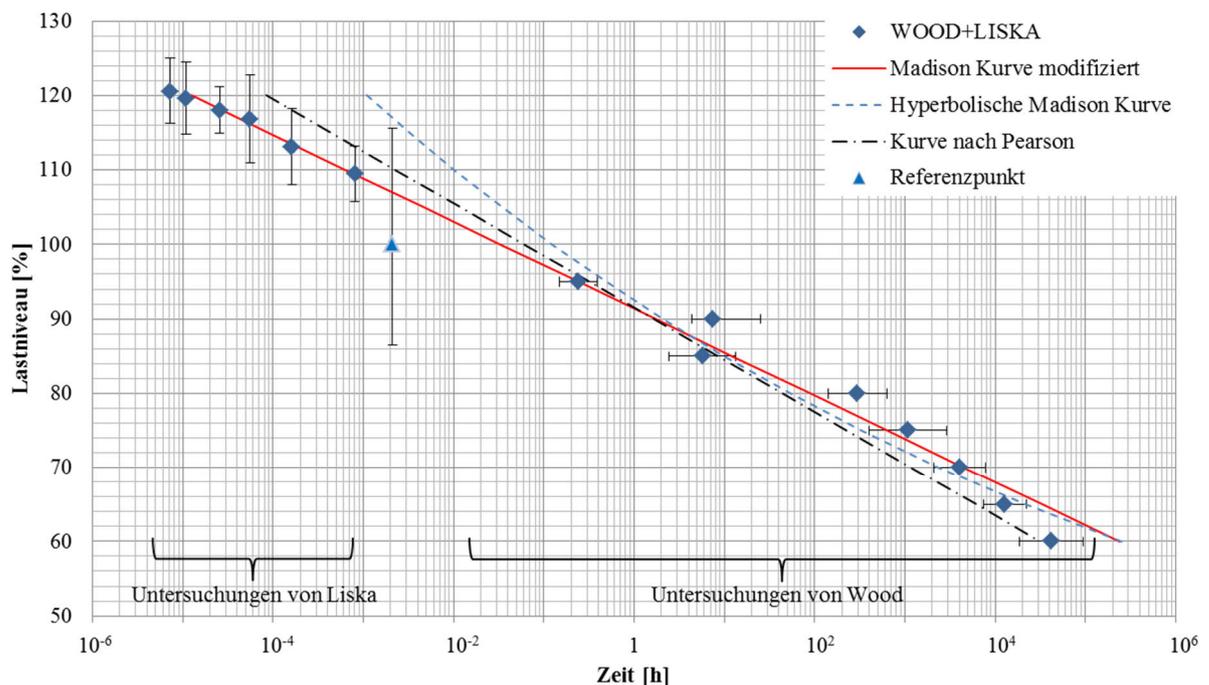


Abbildung 1-11: Modifizierte Madison Kurve im logarithmischen Maßstab

Die durchgezogene rote Linie stellt eine modifizierte Form der Madison Kurve dar. Die Kalibrierung der Parameter dieser Ausgleichsfunktion im logarithmischen Maßstab erfolgte unter Anwendung der Methode der Summe kleinsten Fehlerquadrate und auf Basis der mittels der schädigungsäquivalenten Bewertung modifizierten Daten. Da die Mittelwerte der jeweiligen Serien auf einer unterschiedlichen Anzahl an Untersuchungen basieren, wurde in der Parameterkalibrierung jedem dieser Werte ein entsprechendes Gewicht gegeben. Die Gleichung dieser modifizierten Madison Kurve lautet:

$$SL = 91,37 - 5,84 \cdot \log(t_f) \tag{1.15}$$

Die Referenzprüfungen für alle dargestellten Untersuchungen basieren auf einem statischen Kurzzeitversuch auf Biegung, durchgeführt mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit und einem Versagen, welches sich im Mittel in fünf Minuten einstellte. Der Mittelwert dieser Referenzprüfungen ist ebenfalls im Diagramm dargestellt und definiert das 100 % Lastniveau. Eine schädigungsäquivalente Bewertung dieses Referenzpunktes nach Gl. (1.14) führt zu einer Transformation der Prüfzeit von 300 Sekunden bei konstanter Belastungsgeschwindigkeit auf 7,6 Sekunden bei konstanter Belastung.

In der logarithmischen Darstellung erscheint der Referenzpunkt zudem als nicht durch die Ausgleichsfunktion repräsentiert. Die Funktion ordnet dem Lastniveau von 100 % einen Zeitwert von rd. 120 Sekunden zu. Wenn man hingegen dasselbe Diagramm im linearen Maßstab darstellt (siehe Abbildung 1-12 und Abbildung 1-13), so gelten Abweichungen anderer Mittelwerte von der Ausgleichsfunktion als deutlich ausgeprägter. Der letzte Mittelwert rechts im Diagramm ist zudem mit großer Unsicherheit behaftet, da er sich aus elf Einzelwerten zusammensetzt, wobei sechs Werte als sogenannte Durchläufer gekennzeichnet sind, d.h., dass bei diesen Prüfkörpern am Ende des Untersuchungszeitraumes noch keine Schädigung eingetreten war. Infolge dessen wurden diese Punkte als recht-zensiert in der statistischen Bewertung dieser Serie mittels der Maximum-Likelihood Methode für rechts-zensierte Daten konsistent berücksichtigt.

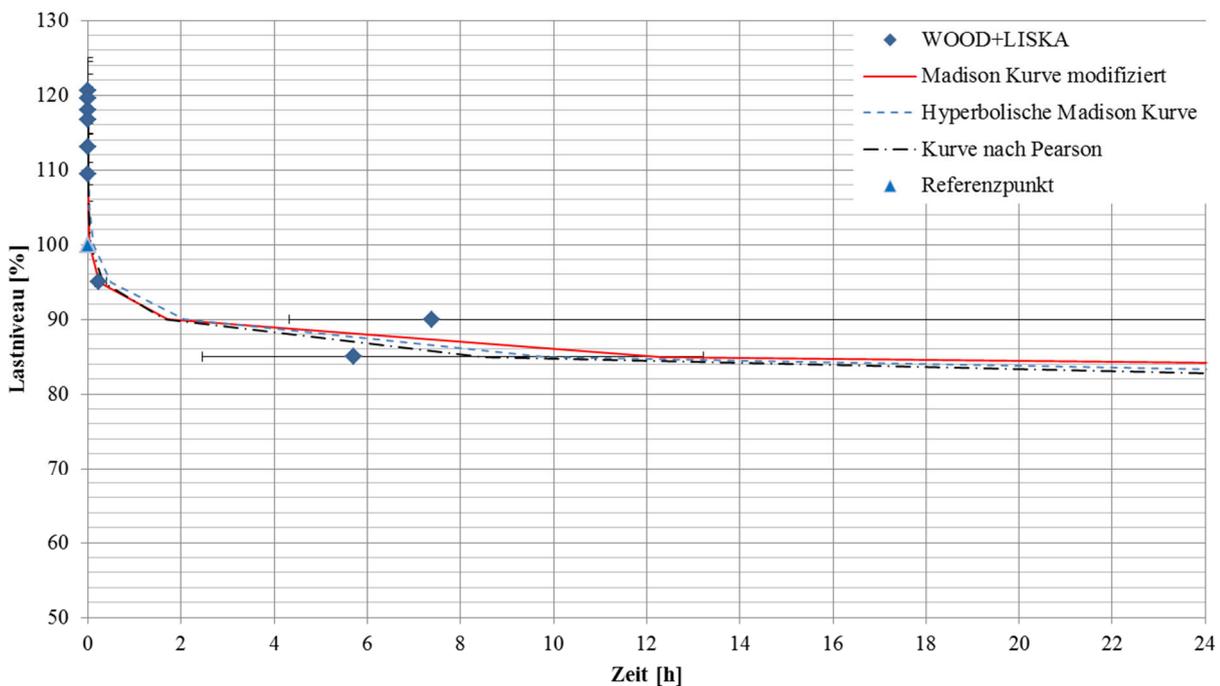


Abbildung 1-12: Modifizierte Madison Kurve für den Bereich zwischen 0 und 24 Stunden

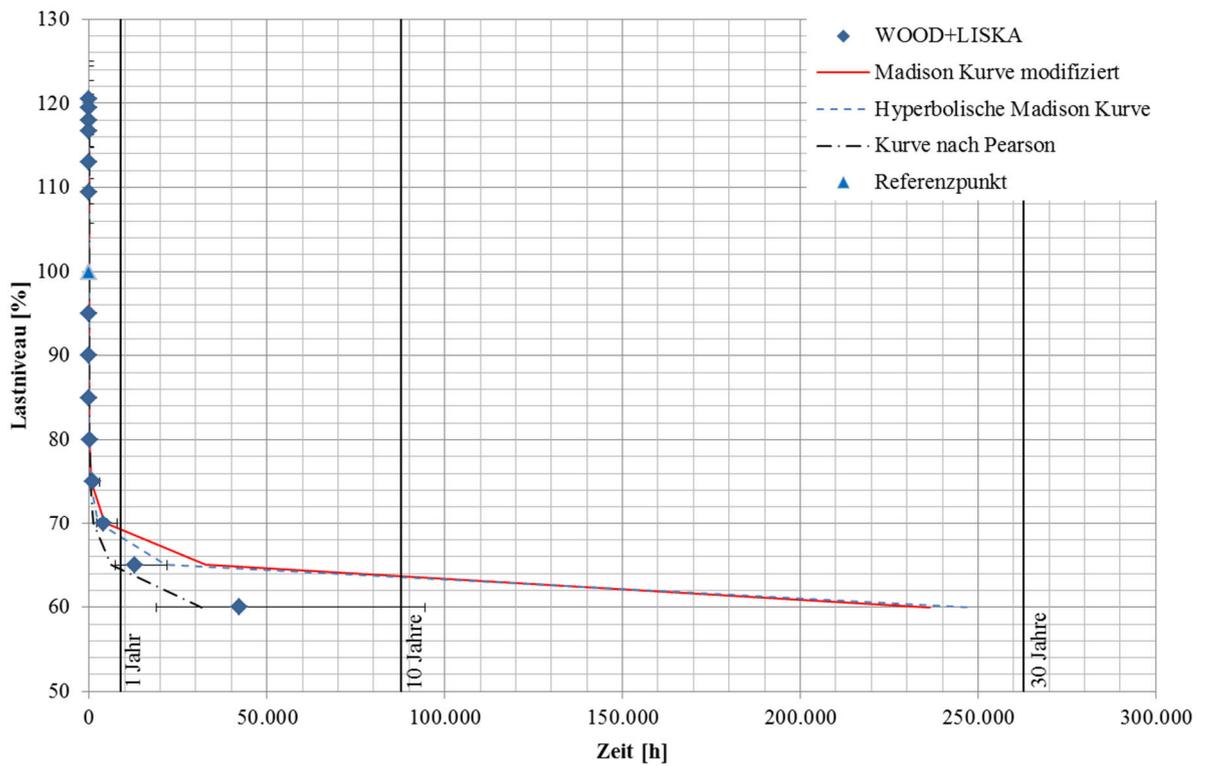


Abbildung 1-13: Modifizierte Madison Kurve im linearen Maßstab

Ergänzend sind in Abbildung 1-14 die Mediane und deren Konfidenzintervalle dargestellt. Man kann erkennen, dass zwar leichte Verschiebungen einzelner Funktionspunkte auftreten, jedoch ergibt sich annähernd dieselbe Gleichung der Ausgleichsgerade, welche wiederum mit der Summe kleinster Fehlerquadrate bestimmt wurde. Die Gleichung dieser modifizierten Madison Kurve lautet:

$$SL = 90,20 - 6,15 \cdot \log(t_f) \quad (1.16)$$

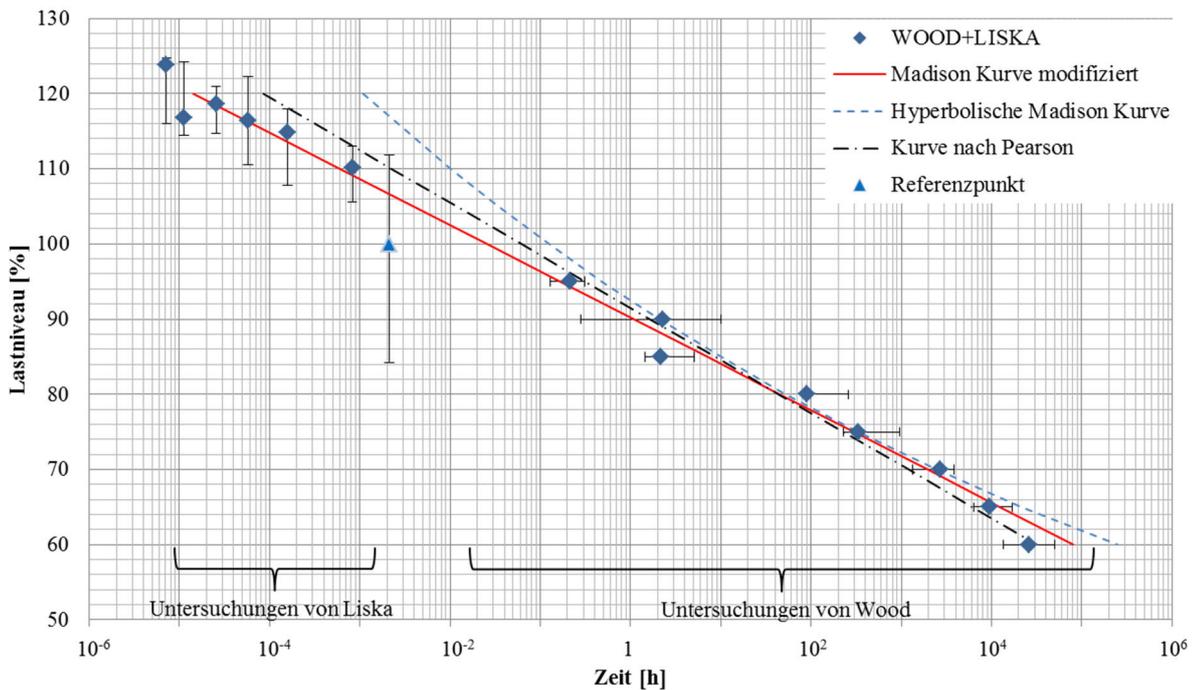


Abbildung 1-14: Modifizierte Madison Kurve der Mediane im logarithmischen Maßstab

1-3 UNTERSUCHUNGEN ZU HOLZBAUSCHRAUBEN

1-3.1 GERNOT PIRNBACHER

Pirnbacher (2012) beschäftigte sich mit der Frage nach dem DoL-Verhalten axial beanspruchter, auf Herausziehen versagender Holzbauschrauben über einen Zeitraum von zwei Jahren. Diese Untersuchungen wurden mittels eines Schraubentypen an zwei Holzarten durchgeführt. Dabei wurde nicht nur das Tragverhalten in Hinblick auf die Modifikation des Faktors k_{mod} , sondern auch das Kriechverhalten in Hinblick auf die Festlegung eines Wertes für k_{def} von Schraubenverbindungen untersucht. Die Versuche wurden in einem einseitig offenen Lagergebäude im Werk der Holzindustrie Leitinger in Wernersdorf, Steiermark durchgeführt (Pirnbacher und Schickhofer, 2012).

Die Versuche wurden an Brettschichtholz der Güteklasse GL28h und an Nadelholz der Güteklasse C24 mit den Einschraubwinkeln (Achse-Faser-Winkeln) von 0° , 45° und 90° durchgeführt. Die Schrauben wurden von der Firma Würth Österreich geliefert. Das verwendete Produkt war eine ASSY II Teilgewindeschraube mit einer Gesamtlänge von 400 mm, einer Gewindelänge (inkl. der Spitze) von 100 mm und einem Gewindeaußendurchmesser d von 8 mm. Die Schrauben wurden ohne Vorbohren eingebracht. Dadurch, dass die Halle einseitig offen war, wurden die Versuche einem nahezu natürlichen, jährlich schwankenden Klima ausgesetzt. Die Situation eines überdachten aber offenen Gebäudes liegt zwischen der Nutzungsklasse 1 und 2 (Pirnbacher und Schickhofer, 2012).

Zur Untersuchung des „Duration of Load“-Effektes kam ein Hebelarmsystem zur Anwendung. Jeder Hebelarm war mit zwei Schrauben mit 8 mm Durchmesser und einer eingeschraubten Gewindelänge von 100 mm bestückt worden. Danach wurde, unter Variation der Lastniveaus (welche sich durch die unterschiedlichen Hebelverhältnisse ergeben), die Zeit bis zum Bruch aufgezeichnet. Es wurde für jeden Probekörper vor Ort eine individuelle Kurzzeitfestigkeit in den Punkten A und B gemäß Abbildung 1-15 bestimmt. An diesen Punkten erfolgte im nachfolgenden Langzeittest die Verankerung des Probekörpers. Im Anschluss wurden diese belastet und die Zeit bis zum Bruch aufgezeichnet. Um für beide Probekörper diese Zeit bis zum Bruch zu ermitteln, wurde die erste Schraube dieses Paares, die auf Herausziehen versagte, durch eine stärkere Schraube mit $d = 12$ mm ersetzt. Betreffend Datenerhebung ist zu erwähnen,

dass ein Kamerasystem zum Einsatz kam, welches in definierten Zeitabständen Fotos aufnahm. Die Hebelarme waren mit farbigen Punkten gekennzeichnet, um das Zuordnen zu den einzelnen Hebelarmen auf den Kamerabildern zu erleichtern. Als Abschluss der Versuche wurden die Kriechserien und jene Proben, bei denen kein Bruch eingetreten war, durch „ramp-loading“ auf ihre Resttragfähigkeit hin untersucht (Pirnbacher und Schickhofer, 2012).

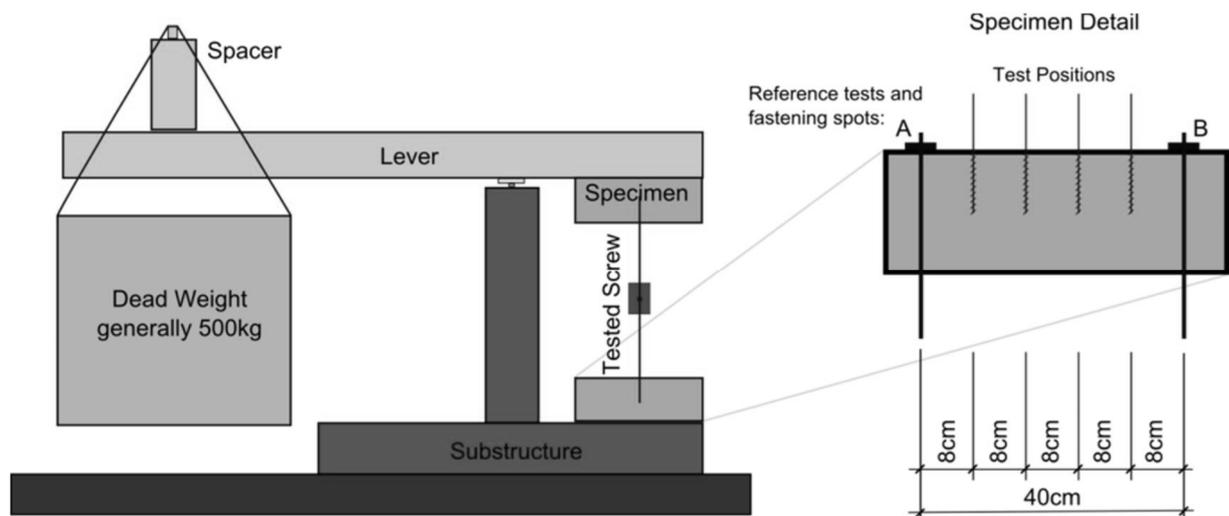


Abbildung 1-15: Hebelarmversuchsaufbau (Pirnbacher und Schickhofer, 2012)

Die Kriechversuche für den Winkel 0° zur Faser (parallel zur Faserrichtung oder in Faserrichtung) wiesen unerwartet ein sehr ausgeprägtes DoL-Verhalten auf. Bei einem Lastniveau von 60 % des Mittelwertes der Kurzzeitfestigkeit kam es bereits zwischen 30 Minuten und 12 Stunden zum Versagen der betreffenden Proben. Als Reaktion darauf wurde die geplanten DoL-Untersuchungen parallel zur Faser abgebrochen und durch weitere DoL-Versuche bei Achs-Faserwinkeln von 45° und 90° ersetzt. Eine Verringerung der Kriechbelastung auf unter 55 % änderte das Verhalten nicht, wohingegen durch die Einbindung des Gewindes im Holz die Standzeit erheblich gesteigert werden konnte. Abbildung 1-16 soll diesen Effekt verdeutlichen. Hier ist zu beachten, dass ein Versenken der Schraube mit einer Einbindelänge l_{emb} von zumindest $2d$ bei einem Achsfaserwinkel von 90° eine Erhöhung der Kurzzeitfestigkeit von 15 % bewirkt, vgl. Pirnbacher (2012). In der Arbeit von Burgschwaiger (2011) wurde festgestellt, dass die Einbindung bei einem Achsfaserwinkel von 0° ebenfalls eine geringfügige Steigung der Kurzzeitfestigkeit verursacht, diese jedoch als nicht signifikant eingestuft wird. Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde bei den Referenz-Kurzzeitversuchen das Verhalten beobachtet, dass sich eine tendenzielle, wenn auch nicht signifikante, Erhöhung der Tragfähigkeit bei den Holzarten Fichte, Buche und Holzwerkstoff BauBuche ergibt (siehe Tabelle 3-5). Nichtsdestotrotz konnten durch eine Einbindung von $l_{emb} \cong 2d$ zumindest die geplanten Kriechserien von Pirnbacher (2012) durchgeführt und ein zusätzlicher Anreiz für weitere diesbezügliche Untersuchungen gegeben werden.

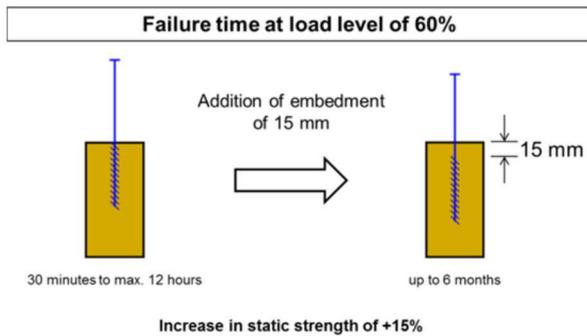


Abbildung 1-16: Qualitative Beurteilung der Auswirkung der Einbindelänge auf die Standzeit von axial beanspruchten, faserparallel eingebrachten Holzbauschrauben (Pirnbacher und Schickhofer, 2012)

In Abbildung 1-17 ist ein Fachwerksmodell angeführt, welches den Unterschied der Lastabtragung zwischen einer Schraube mit eingebundenem Gewinde ($l_{emb} \cong 2d$) und einer mit nicht eingebundenen Gewinde zeigt. In den Diagonalen (struts) herrschen Druckkräfte vor. Damit innerhalb dieses Modelles Gleichgewicht herrscht, müssen diese Druckkräfte kurzgeschlossen werden. In den „ties“ befinden sich somit Zugkräfte. Wenn nun die Einbindelänge immer kleiner wird ($l_{emb} \rightarrow 0$) geht ein Teil des Gewindes zur Lastabtragung „verloren“. Die Konsequenz daraus ist, dass die Tragfähigkeit für nicht eingebundene Gewinde gegenüber eingebundenen Gewinden geringer ist. Pirnbacher (2012) führt in seiner Arbeit an, dass der Effekt der Einbindung von zumindest $2d$ bei einem Achs-Faserwinkel von 90° eine Erhöhung der Kurzzeittragfähigkeit um rd. 15 % im Vergleich zum nicht eingebundenen Gewinde ergibt. Er führt zusätzlich an, dass bei einem Achs-Faserwinkel von 0° eine Einbindung eine Erhöhung der Versagenszeit im DoL-Versuch von 30 min bis 12 h auf bis zu sechs Monate bewirkt. Hier ist jedoch zu erwähnen, dass sich durch eine etwaige Erhöhung der Kurzzeittragfähigkeit auch ein geringeres Belastungsniveau im DoL-Versuch ergibt und sich somit automatisch längere Zeiten bis zum Bruch ergeben. Aus der Sicht des Autors der vorliegenden Arbeit wäre es zielführend individuelle Referenzkurzzeitversuche für unterschiedliche Einbindelängen durchzuführen. Somit kann bei Veränderung der Einbindelänge l_{emb} ein individuelles Lastniveau berechnet werden.

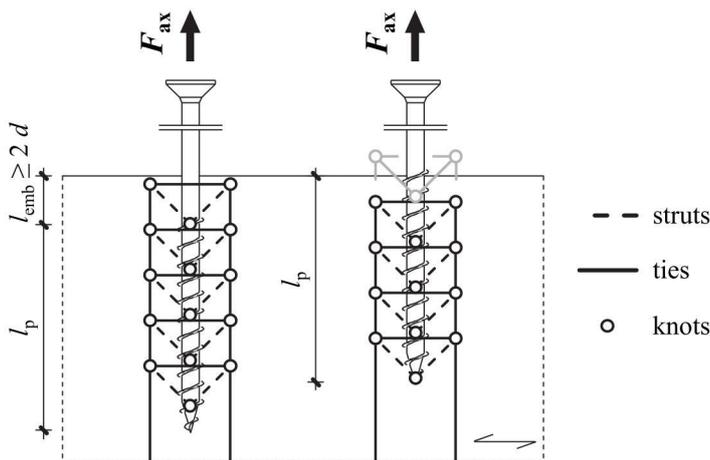


Abbildung 1-17: Fachwerksmodell zur Begründung des positiven Effektes der Einbindung auf die Ausziehfestigkeit von Holzbauschrauben (Ringhofer, 2017)

Im folgenden Absatz werden die Ergebnisse von Pirnbacher (2012) exemplarisch in Abbildung 1-18 vorgestellt. Um den Einfluss von sehr kurzen Belastungsdauern (0,6 s; 45 s; 90 s; 135 s; 300 s) zu erfassen, wurden zusätzlich Tests mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit durchgeführt. Der Umfang

betrug für jede Serie 20 Probekörper. Es ist jedoch zu beachten, dass für die DoL-Tests eine konstante Belastung vorliegt. Eine Umrechnung dieser Tests, wie beispielsweise in Abschnitt 1-2.7 angeführt, wurde nicht durchgeführt. Auch der Referenzpunkt, welcher im Zuge eines rd. 90 s Belastungstests mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit ermittelt wurde, kam ebenfalls ohne Umrechnung bei 90 s und 100 % zu liegen. Pirnbacher (2012) wählte unter anderem einen bilinearen Ansatz, bei dem der Knickpunkt je nach Konfiguration variierte. Zusätzlich verwendete er ein hyperbolisches Modell zur Beschreibung des DoL-Verhaltens. Als Referenz wurde die logarithmisch lineare Madison Funktion verwendet.

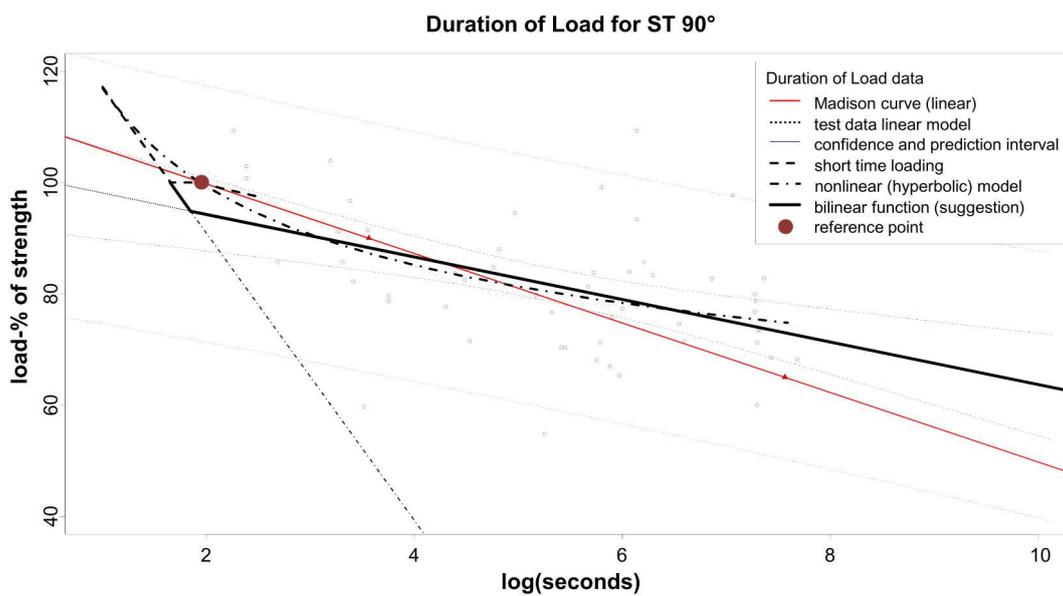


Abbildung 1-18: Exemplarisches DoL-Diagramm für Nadelholz bei einem Einschraubwinkel von 90° (Pirnbacher und Schickhofer, 2012)

1-3.2 THOMAS UIBEL & HANS JOACHIM BLAß

Blaß und Uibel (2007) führten in den Jahren 2006 und 2007 umfangreiche Untersuchungen bezüglich des Tragverhaltens von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsperrholz durch. Dies betraf auch axial beanspruchte, selbstbohrende Holzbauschrauben, welche in den Schmal- und Seitenflächen dieses Holzwerkstoffes appliziert wurden. Dabei resultierte die geringste Tragfähigkeit der Schrauben bei einer faserparallelen Applikation in den Schmalflächen von Brettsperrholz. Da nur wenige Erkenntnisse über das Langzeitverhalten von Verbindungen mit Schrauben, die parallel zur Faserrichtung eingedreht werden, vorlagen, ergänzten Blaß und Uibel ihr Prüfprogramm betreffend die Auswirkung der Lasteinwirkungsdauer und klimatischer Beanspruchungen auf das axiale Tragverhalten solcherart eingebrachter Schrauben (Blaß und Uibel, 2007).

Diese Untersuchungen wurden, um Nutzungsklasse 2-Bedingungen zu erreichen, an einem Prüfstand im Freien unter Dach durchgeführt und umfassten insgesamt 48 Versuche von axial beanspruchten Holzbauschrauben. Wie in Tabelle 1-5 angeführt, variierte der Gewindeaußendurchmesser der Schrauben dabei zwischen 6 und 12 mm. Je nach Schraubendurchmesser lag die Eindrehlänge l_{ef} zwischen 48 und 100 mm (Blaß und Uibel, 2007).

Tabelle 1-5: Langzeitversuche mit Schraubenverbindungen (Blaß und Uibel, 2007)

d [mm]	l_{ef} [mm]	Anzahl der Versuche
6	62	10
8	48	8
8	94	10
12	66	10
12	100	10

Sämtliche Probekörper im Rahmen der Untersuchungen an Holzbauschrauben wurden aus Brettsperrholzplatten hergestellt. Dabei wurden für jeden Langzeitversuch zwei zusätzliche Probekörper angefertigt, deren maßgebende Brettlagen die gleichen Eigenschaften aufwiesen. Die Schrauben wurden dabei an allen Probekörpern zum gleichen Zeitpunkt appliziert. Am ersten dieser beiden zusätzlichen Probekörper wurde die Kurzzeitfestigkeit bestimmt, die jedoch nicht als Eingangsparameter für die Langzeitversuche, sondern lediglich als Vergleich zum zweiten zusätzlichen Probekörper diente. Die zweiten zusätzlichen Probekörper wurden unbelastet unter den gleichen klimatischen Bedingungen wie die Langzeitversuche gelagert. Nach Abschluss der Dauerstandversuche konnte an diesen Prüfkörpern zu Vergleichszwecken ebenfalls noch einmal die Tragfähigkeit im Kurzzeitversuch ermittelt werden. Hier konnte der Einfluss der Klimabedingungen auf den unbelasteten Probekörper im Vergleich der beiden Kurzzeitfestigkeiten bestimmt werden (Blaß und Uibel, 2007).

Wie in Abbildung 1-19 ersichtlich ist, erfolgte eine Applizierung der Holzbauschrauben an gegenüberliegenden Hirnholzseiten. Für den Abstand der Schraubenspitzen gab es leider keine quantitativen Angaben, jedoch wurde dieser ausreichend groß gewählt. Zu den variierenden Parametern zählt neben der wirksamen Einschraubtiefe, dem Schraubendurchmesser und dem Brettsperrholztyp auch die Rohdichte. Aus vier bzw. fünf Probekörpern konnten je Versuchsreihe acht bzw. zehn gleichartige Versuche durchgeführt werden. Um die Verteilung der Rohdichte für die maßgebende Brettlage des jeweiligen Brettsperrholzes bestmöglich zu repräsentieren, wurden die Probekörper innerhalb einer Versuchsserie entsprechend ausgewählt (Blaß und Uibel, 2007).



Abbildung 1-19: Versuchsaufbau der Langzeitversuche axial beanspruchter Holzbauschrauben (Uibel und Blaß, 2013)

Das Belastungsniveau der Probekörper wurde aus den charakteristischen Werten mit dem Modifikationsfaktor $k_{\text{mod}} = 0,8$ und dem Teilsicherheitsfaktor $\gamma_M = 1,3$ bestimmt, wobei die axial belasteten Schrauben mit 70 % des Bemessungswiderstandes belastet wurden (Uibel und Blaß, 2013).

Folgende Gleichung wurde für die Bestimmung der charakteristischen Festigkeitskennwerte herangezogen (Blaß und Uibel, 2007):

$$R_{\text{ax,s,k}} = \frac{0,35 \cdot d^{0,8} \cdot l_{\text{ef}}^{0,9} \cdot \rho_k^{0,75}}{1,35 \cdot \cos^2(\varepsilon) + \sin^2(\varepsilon)} \quad (1.17)$$

mit:

- $R_{\text{ax,s,k}}$ charakteristischer Auszieh Widerstand der Schraube
- d Nenndurchmesser der Schraube (Gewindeaußendurchmesser)
- l_{ef} effektive Gewindelänge
- ρ_k charakteristische Rohdichte
- ε Winkel zwischen Kraft und Faserrichtung

Die Ergebnisse aus Gl. (1.17) wurden wie folgt auf ein modifiziertes Bemessungsniveau gebracht:

$$R_{\text{ax,s,d,mod}} = \frac{R_{\text{ax,s,k}} \cdot k_{\text{mod}} \cdot 0,7}{\gamma_m} \quad (1.18)$$

Um einen Vergleich mit der Literatur und den eigenen Untersuchungen anzustellen, ist es sinnvoll, die berechneten Werte auf ein mittleres Lastniveau bezogen auf den Mittelwert der Kurzzeitfestigkeit zu beziehen.

Der Mittelwert der Kurzzeitfestigkeit errechnet sich wie folgt (Blaß und Uibel, 2007):

$$R_{\text{ax,m}} = \frac{0,44 \cdot d^{0,8} \cdot l_{\text{ef}}^{0,9} \cdot \rho_m^{0,75}}{1,25 \cdot \cos^2(\varepsilon) + \sin^2(\varepsilon)} \quad (1.19)$$

mit:

- $R_{\text{ax,m}}$ Mittelwert des Auszieh Widerstandes der Schraube
- d Nenndurchmesser der Schraube (Gewindeaußendurchmesser)
- l_{ef} effektive Gewindelänge
- ρ_m Mittelwert der Rohdichte
- ε Winkel zwischen Kraft und Faserrichtung

Vergleicht man nun Glg. (1.17) und (1.19) ergibt sich folgender Umrechnungsfaktor η zwischen den charakteristischen Festigkeitskennwerten und dem Mittelwert der Kurzzeitfestigkeit:

$$\eta = \left(\frac{0,35}{0,44} \right) \cdot \left(\frac{1,25}{1,35} \right) \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_m} \right)^{0,75} \quad (1.20)$$

Unter der Annahme einer Vollholz-Festigkeitsklasse von C24 gemäß EN 338 (2016) erhält man für $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ und für $\rho_m = 420 \text{ kg/m}^3$. In Folge ergibt sich der Umrechnungsfaktor zu:

$$\eta = \left(\frac{0,35}{0,44} \right) \cdot \left(\frac{1,25}{1,35} \right) \cdot \left(\frac{350}{420} \right)^{0,75} = 0,642 \quad (1.21)$$

Das Lastniveau bezogen auf den Mittelwert der Kurzzeitfestigkeit ergibt sich ferner zu:

$$SL = \eta \cdot \frac{k_{\text{mod}} \cdot 0,7}{\gamma_m} = 0,642 \cdot \frac{0,8 \cdot 0,7}{1,3} = 0,277 \quad (1.22)$$

Die Langzeittests begannen im Juli 2007 und sind im April 2012 abgeschlossen worden. In Blaß und Uibel (2007) wird angegeben, dass die Langzeittests nach drei Jahren Belastung abgeschlossen und in anschließenden Kurzzeittests die Resttragfähigkeiten bestimmt werden sollten. In Uibel und Blaß (2013) ist hingegen ersichtlich, dass die Probekörper rund fünf Jahre belastet worden sind und im Anschluss die Resttragfähigkeit bestimmt wurde. Während der Prüfdauer wurde das Klima aufgezeichnet. Bei den Langzeitversuchen versagten während der Versuchsdauer 19 von 48 Schrauben. Nach einer Konditionierung bei Normklima (20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte) wurden die im Rahmen der DoL-Prüfungen nicht versagten Proben einem Kurzzeittest zur Bestimmung der Tragfähigkeit unterzogen. Leider liegen zurzeit noch keine vollständigen Ergebnisse in Form eines Berichtes vor, jedoch gibt es einen Zwischenbericht in dem erste Ergebnisse zeigen, dass eine deutlich reduzierte Herausziehtragfähigkeit im Vergleich zu den Resultaten der Kurzzeitversuche beobachtet wurde (Uibel und Blaß, 2013).

1-3.3 CHRISTOPH KOJ & MARTIN TRAUTZ

An der RWTH Aachen wurde in einem eigenen Forschungsprojekt das Tragverhalten von mit Holzbauschrauben hergestellten, biegesteifen Rahmeneck-Verbindungen unter Dauerlast im Außenklima entsprechend Nutzungsklasse 2 untersucht. Aufgrund der komplexen Schraubengeometrie in diesen Eckverbindungen war die Ableitung des Langzeitverhaltens einer einzelnen Schraube nicht möglich. Daher wurde eine zusätzliche Reihe von Prüfungen durchgeführt, um das Kriech- und DoL-Verhalten von Einzelschrauben zu untersuchen. Ziel war es, die Auswirkungen verschiedener Achs-Faserwinkel (0° , 30° und 90°) und unterschiedlicher Belastungsniveaus (40 % und 60 % des Mittelwertes der Kurzzeitfestigkeit) auf das Langzeitverhalten auf Herausziehen herauszufinden. Die Schrauben haben einen Nenndurchmesser von 8 mm und eine effektive Eindrehlänge von 120 mm. Da es sich um Vollgewindeschrauben handelte und explizit keine Gewindeeinbindung angegeben ist, kann davon ausgegangen werden, dass $l_{emb} = 0$ mm war. Im Gegensatz zur Langzeitbelastung der starren Rahmenecken wurde beschlossen, die permanenten Lasten mit Hilfe eines Hebelmechanismus als Totlasten zu applizieren. Dies vermeidet die wiederholte Steuerung und Einstellung der Last, die im Federsystem des vorherigen Testaufbaus erforderlich war. Jede Serie enthält vier Proben. Die Verformungen werden sowohl auf der belasteten Seite der Probekörper als auch auf der Rückseite mit mechanischen Messuhren gemessen, wie in Abbildung 1-20 zu sehen ist (Koj und Trautz, 2016).

Leider liegen derzeit noch keine Ergebnisse zu den Langzeitversuchen der Einzelschraube vor.



Abbildung 1-20: Versuchsaufbau Ausziehversuche (Koj und Trautz, 2016)

1-3.4 FAZIT ZU DEN UNTERSUCHUNGEN ZU HOLZBAUSCHRAUBEN

In der Literatur gibt es nur sehr wenige Untersuchungen zum Einfluss der Belastungsdauer auf die Tragfähigkeit axial beanspruchter Holzbauschrauben. Die in den Abschnitten 1-3.1 bis 1-3.3 zusammengefassten Untersuchungen liegen zum Teil nicht vollständig vor, oder liefern nur qualitative Ergebnisse. Es steht jedoch fest, dass sich ein Festigkeitsverlust im Laufe der Zeit auch bei Schrauben einstellt. Pirnbacher (2012) führt in seiner Arbeit an, dass bei einem Achs-Faserwinkel von 0° die DoL-Untersuchungen zu einem ausgeprägt negativen Verhalten innerhalb kürzester Zeit geführt haben. Eine Einbindung von l_{emb} von zumindest $2d$ machte es möglich, die Belastungsdauer erheblich zu verlängern, um so die geplanten Kriechserien durchzuführen. Die DoL-Untersuchungen hingegen wurden abgebrochen. Die Untersuchungen von Uibel und Blaß (2007) und (2013) wurden im Freien unter Dach durchgeführt und somit wie Pirnbacher (2012) dem jährlich schwankenden Klima ausgesetzt. Betrachtet man das Lastniveau bezogen auf den Mittelwert, so liegt eine geringe Belastung von rund 28 % vor. Auch bei diesem geringen Lastniveau versagten 19 von 48 Schrauben. Dies lässt darauf schließen, dass die Anwendung der Madison Funktion bei Verbindungsmitteln appliziert in Faserrichtung sehr kritisch zu hinterfragen ist. In den gegenwärtigen Zulassungen kommt daher der Modifikationsfaktor k_{ax} zur Anwendung, der in Kapitel 1-5 näher erörtert wird. Die Untersuchungen von Koj und Trautz (2016) liefern derzeit noch keine Ergebnisse. Sie stellten jedoch fest, dass sich bei Federsystemen im Gegensatz zur Belastung mit Totgewichten ein Kraftabfall einstellt, der eine ständige Kalibrierung des Prüfaufbaus erfordert. Deswegen führten Koj und Trautz (2016) ihre Untersuchungen mit Totgewichten durch.

1-4 MODELLE ZU DURATION OF LOAD

In diesem Kapitel werden ausgewählte Modelle vorgestellt, die einen Zusammenhang zwischen der Zeit bis zum Versagen und dem vorherrschenden Lastniveau geben sollen. Es gibt zwei grundlegende Modellansätze zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Holz: Zum einen jene Modelle, die auf physikalischen / mechanischen Ansätzen basieren und nur punktuell durch experimentelle Daten validiert werden und zum anderen solche Modelle, die aus der Beobachtung experimenteller Untersuchungen und daraus abgeleiteter funktioneller Zusammenhänge gebildet werden, wobei ihre Parameter an den Versuchsdaten kalibriert werden. Gegenwärtige Ermüdungsmodelle weisen für beide Gruppen Parameter auf, welche mangels ausreichender Kenntnisse zur analytischen Beschreibung des Materialverhaltens an experimentellen Daten kalibriert werden müssen. Zudem fehlt eine ausreichende Anzahl an vergleichbaren Untersuchungen, welche unabhängig voneinander durchgeführt wurden und eine Validierung derart gebildeter Modelle erlauben. Vorhersagen von Ermüdungsmodellen sind ein Hilfsmittel für das technische Urteilsvermögen, und sie sollten immer in dem Maße verwendet werden, in dem sie sich ihrer Grenzen bewusst sind (Smith et al., 2003).

Die Problematik liegt darin, dass streng genommen bei rein bzw. weitgehend experimentell basierenden Modellen eine Extrapolation nicht zulässig ist, da diese die Modellgrenzen überschreiten würde. Das lässt sich sehr anschaulich durch Diskussion von Konfidenz- und Prognoseintervallen von Regressionsmodellen erläutern. Hierbei bezieht sich das Konfidenzintervall auf die mittlere Schätzung des Prognose- bzw. Regressionsmodells wohingegen das Prognoseintervall sich auf die Schätzung von Einzelwerten mit Hilfe des Regressionsmodells bezieht. An den Rändern der Modell- bzw. Beobachtungsgrenzen werden beide Intervalle immer größer. Wenn nun die Grenzen überschritten werden, weiten sich diese Intervalle überproportional und die Prognosefähigkeit nimmt überproportional ab.

Wie alle Materialien enthalten auch Vollholz und Holzprodukte Vorschädigungen (oft als inhärente Schädigungen bezeichnet), die sich im lebenden Baum während des Fällens, während der Verarbeitung, der Trocknung und im Zuge weiterer Prozessschritte sowie im Zuge der Aussetzung der Umwelt entwickeln. Die Variabilität in der inhärenten Schädigung wird als wesentliche Ursache für die mangelnde Kohärenz der Ermüdungsdaten sowohl innerhalb als auch zwischen Forschungsstudien gesehen (Smith et al., 2003).

Smith et al. (2003) diskutieren schematisch das Vorgehen im Zuge der Modellbildung, welches in Abbildung 1-21 schematisch dargestellt ist: Es beginnt mit einer Darstellung der Rohdaten im halblogarithmischen Maßstab um ihre Anschaulichkeit zu erhöhen. An diese Daten werden die entsprechenden Modelle in der Regel mit der Methode der Summe kleinster Fehlerquadrate kalibriert und somit die jeweiligen Parameter bestimmt. Da die Nutzungsdauer viel größer ist als die Beobachtungszeit der vorliegenden Daten, bedarf es einer Extrapolation, d.h. einer dem Trend der Daten folgenden Prognose, welche aufgrund der zuvor genannten Umstände mit überproportionalen Unsicherheiten behaftet ist.

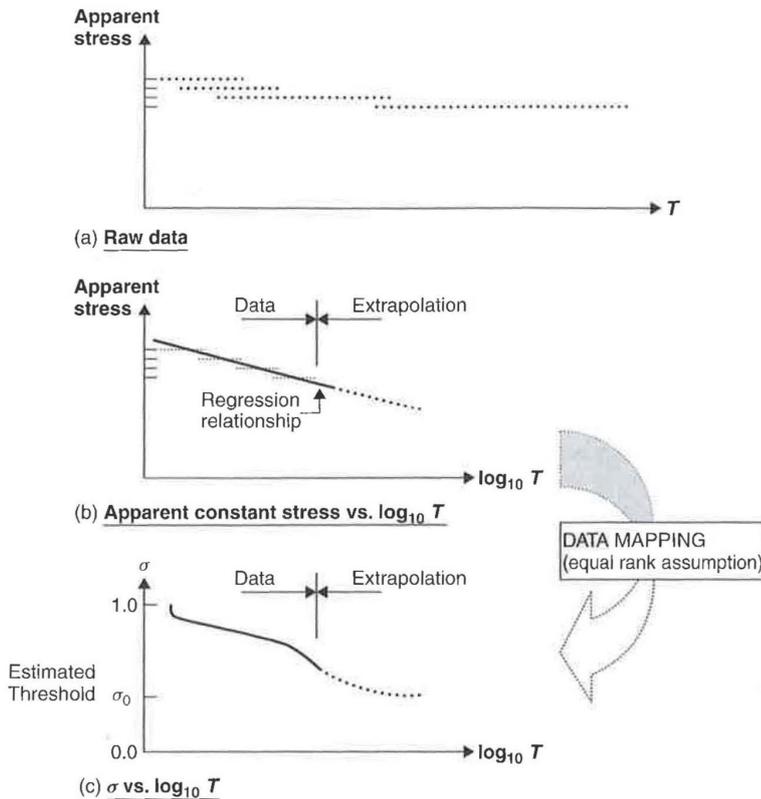


Abbildung 1-21: Schematische Vorgehensweise zur Modellbildung zu Duration of load (Smith et al., 2003)

In den folgenden Unterkapiteln werden ausgewählte Modelle zur Beschreibung des DoL-Effektes vorgestellt. Dabei basieren die meisten Modelle auf der Annahme einer Schadensakkumulation, wobei unterschieden werden muss, ob eine Schwelle im Sinne einer Dauerstandfestigkeit eingeführt wird, unterhalb dieser im Modell keine Schadensakkumulation mehr auftritt.

1-4.1 MODELL NACH GERHARDS

Das erste Schadensakkumulationsmodell wird in Gerhards (1979) vorgeschlagen, wobei das Maß der Schadensakkumulation in Abhängigkeit von der angelegten Belastung ausgedrückt wird (Köhler, 2007).

Gerhards bringt in seiner Arbeit die Begriffe Restlebensdauer, Lebensdauer und Schaden zueinander in folgende Beziehung: Restlebensdauer = Lebensdauer – Schaden. Er erwähnt zusätzlich, dass eine Wiederherstellung von Beschädigungen während unbelasteten Zeiten nicht in Betracht gezogen werden kann. Hier ist zwischen einem lebenden und einem toten Organismus zu unterscheiden. Als lebender Organismus ist der wachsende Baum ständig bemüht, Beschädigungen zu regenerieren. Nach der Fällung ist dieser Selbstheilungseffekt nicht mehr gegeben. Das bedeutet, dass die Schäden über die Belastungshistorie aufsummiert werden müssen. Einzig Instandhaltungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen an bestehenden Tragwerken können hier positive Effekte hinsichtlich des DoL-Verhaltens einer Struktur bewirken, was hier aber nicht weiter betrachtet wird.

Gerhards (1979) verwendet in seinem Modell eine schädigungsäquivalente Kumulation der jeweiligen Lasten über die Belastungshistorie. Jedes Niveau einer konstanten Belastung entspricht einer partiellen Lebensdauer gemessen an einem unbeschädigten Ausgangsmaterial, d.h. Material, das frei von jeglicher Belastungshistorie ist. Baumfällung, Einschnitt, Holzbearbeitung, Trocknen und weitere Prozesse induzieren eine gewisse Vorschädigung in das Holzgewebe bzw. legen Faserstrukturen zu Fehlstellen frei welche im stehenden Baum belastungsoptimiert eingebettet waren. Diese Belastungen sind nicht in einer Belastungshistorie enthalten, aber können aus der Theorie abgeleitet werden. Sie tragen zweifellos zu einer zusätzlichen Variabilität im Sinne einer Unsicherheit in der gemessenen Lebensdauer der Proben bei (Gerhards, 1979).

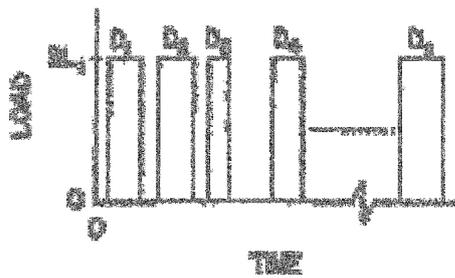


Abbildung 1-22: Verschiedene Lastdauern (D_i) bei gleichem Beanspruchungsniveau (SL_1) (Gerhards, 1979)

Unter der Voraussetzung, dass das Beanspruchungsniveau SL_1 konstant ist, lässt sich aus Abbildung 1-22 folgende Gleichung ableiten (Gerhards, 1979):

$$t_1 = \sum_{i=1}^n D_i \quad (1.23)$$

mit:

t_1 aufsummierter Schaden
 D_i Dauer der i -ten konstanten Beanspruchung

Der Anteil der Restlebensdauer an der gesamten Lebensdauer ergibt sich zu:

$$\gamma = \frac{\text{Lebensdauer} - \text{Schaden}}{\text{Lebensdauer}} \quad (1.24)$$

$$\gamma = 1 - \frac{t_1}{L_1} \quad (1.25)$$

Da in der Belastungshistorie unterschiedliche Lastintensitäten auftreten, lässt sich die Gl. (1.25) entsprechend erweitern. Es kann die Summe gebildet werden über n Lastdauern zu gewissen Lastintensitäten bezogen auf die theoretisch berechnete Lebensdauer, welche sich individuell für die jeweilige Lastintensität ergibt. Wie in Gl. (1.27) angeführt, lässt sich Gl. (1.26) auch als Integral anschreiben.

$$\gamma = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{L_i} \quad (1.26)$$

$$\gamma = 1 - \int_0^t \frac{1}{L} \cdot dt \quad (1.27)$$

Durch Modellannahmen ist es möglich, die Resttragfähigkeit mit der Restlebensdauer zu verknüpfen und somit den Einfluss der Belastungshistorie auf die Festigkeit zu berücksichtigen. Auf der Grundlage von vielen experimentellen Untersuchungen, wird das folgende Modell für die Berechnung der Lebensdauer betrachtet (Gerhards, 1979):

$$L = 10^{\frac{SL-A}{B}} \quad (1.28)$$

mit:

A, B Konstanten
 SL Beanspruchungsniveau („service level“)
 L Lebensdauer

Setzt man dieses Modell nun in Gl. (1.26) bzw. (1.27) ein, erhält man:

$$\gamma = 1 - \sum_{i=1}^n t_i \cdot 10^{\frac{A-SL}{B}} \quad (1.29)$$

$$\gamma = 1 - \int_0^t 10^{\frac{A-SL}{B}} \cdot dt \quad (1.30)$$

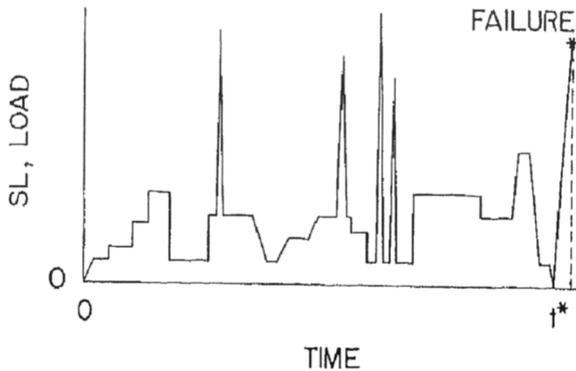


Abbildung 1-23: Schematische Darstellung einer Belastungshistorie die zum Zeitpunkt t^* mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit zum Bruch führt (Gerhards, 1979)

Für die Belastungshistorie, die bei $t = t^*$ endet, wird die Auswirkung einer zusätzlichen Belastung auf die Restlebensdauer bestimmt durch:

$$\gamma = \gamma^* - \int_{t^*}^t 10^{\frac{A-SL}{B}} \cdot dt \quad (1.31)$$

mit:

γ^* Restbruchzeit zum Zeitpunkt t^*

Es ist zu beachten, dass γ^* und γ jeweils mit Null und Eins begrenzt sind. Die Restbruchzeit γ^* wird zu Eins, wenn keine Vorbelastung stattgefunden hat und zu Null, wenn bereits während der Belastungshistorie ein Versagen eingetreten ist.

Nach Umformulierung von Gl. (1.31) erhält man folgendes Integral:

$$\gamma = \gamma^* - \int_0^{K(t-t^*)} \frac{10^{\frac{A-SL}{B}}}{K} \cdot dSL \quad (1.32)$$

$$\Rightarrow \gamma = \gamma^* - \frac{B}{\ln(10) \cdot K} \left[10^{\frac{A}{B}} - 10^{\frac{A-K(t-t^*)}{B}} \right] \quad (1.33)$$

mit:

K Belastungsgeschwindigkeit vom Zeitpunkt t^* bis zum Zeitpunkt t

Unter der Bedingung, dass ein Bruch eintritt, wird $\gamma = 0$ und $K(t_f - t^*) = USL$ (USL = „ultimate strength level“) Somit ergibt sich Gl. (1.33) zu:

$$\gamma^* = \frac{B}{\ln(10) \cdot K} \left[10^{\frac{A}{B}} - 10^{\frac{A-USL}{B}} \right] \quad (1.34)$$

$$USL = A - B \cdot \log \left[10^{\frac{A}{B}} - \frac{\ln(10) \cdot K \cdot \gamma^*}{B} \right] \quad (1.35)$$

Zunächst wurde das Modell für Langzeitprüfdaten von kleinen merkmalsfreien Holzproben entwickelt und an diese kalibriert. In Gerhards und Link (1987) wurde folglich das gleiche Modell an Daten aus Langzeitversuchen an Bauholz kalibriert. Das letztgenannte Modell wird „exponential damage rate model“ (EDRM) genannt und hat die Form:

$$\frac{d\alpha}{dt} = e^{-A+B \frac{\sigma(t)}{\sigma_s}} \quad (1.36)$$

mit:

- α Maß für die Schädigung ($0 \leq \alpha \leq 1$)
- A, B Konstanten
- $\sigma(t)$ Festigkeit in Abhängigkeit der Zeit
- σ_s Kurzzeitfestigkeit

Im Falle einer konstanten Belastung wird $\sigma(t) = \sigma_c$ und im Falle einer totalen Schädigung wird $\alpha = 1$. Wenn das Integral von Gl. (1.36) gebildet wird erhält man die Dauer bis zum Bruch t_f , mit:

$$t_f = e^{\frac{A-B \frac{\sigma(t)}{\sigma_s}}{\sigma_s}} \quad (1.37)$$

1-4.2 MODELL NACH BARRETT UND FOSCHI

In Barrett und Foschi (1978) wird ein Schadensakkumulationsmodell eingeführt, bei dem die Schädigung eine Funktion der aufgebrauchten Spannung, des tatsächlichen Schadens und eines Schwellenwerts für die Spannung ist, unterhalb derer keine weitere Schädigungsakkumulation erwartet wird (Köhler, 2007). Zwei Modelle wurden für die Beschreibung des DoL-Effektes eingeführt: In Modell I wird die Schädigung als Produkt eines spannungsabhängigen und eines schädigungsabhängigen Faktors ausgedrückt. In Modell II ist die Schädigung als Summe aus einem spannungsabhängigen und einem schädigungsabhängigen Term angegeben. Beide Modelle betrachten eine Spannung, unterhalb derer keine weitere Schadensakkumulation eintritt (Barrett und Foschi, 1978).

Im Schädigungsmodell I gilt folgender Zusammenhang:

$$\frac{d\alpha}{dt} = a \cdot (\sigma - \sigma_0) \cdot \alpha^c \quad \text{wenn } \sigma > \sigma_0 \quad (1.38)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = 0 \quad \text{wenn } \sigma \leq \sigma_0 \quad (1.39)$$

mit:

- α Maß für die Schädigung ($0 \leq \alpha \leq 1$)
- a, b, c Konstanten
- σ aufgebrauchte Spannung in Abhängigkeit der Zeit
- σ_0 Grenzspannung unterhalb der keine Schadensakkumulation stattfindet

Wenn T die Bruchzeit in einem bestimmten Spannungsverlauf $\sigma_{(t)}$ ist, führt die Integration der Differentialgleichung (1.38) zu der folgenden Bedingung für T :

$$1 = a \cdot (1-c) \int_0^T (\sigma_{(t)} - \sigma_0)^b dt \quad (1.40)$$

Für eine konstante Belastung ergibt sich t_f zu:

$$t_f = \frac{1}{a \cdot (1-c) \cdot (\sigma - \sigma_0)^b} \quad (1.41)$$

Das Schädigungsmodell II setzt sich wie folgt zusammen:

$$\frac{d\alpha}{dt} = a \cdot (\sigma - \sigma_0) + \lambda \alpha \quad \text{wenn } \sigma > \sigma_0 \quad (1.42)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = 0 \quad \text{wenn } \sigma \leq \sigma_0 \quad (1.43)$$

mit:

α Maß für die Schädigung ($0 \leq \alpha \leq 1$)

a, b, λ Konstanten

σ aufgebrachte Spannung in Abhängigkeit der Zeit

σ_0 Grenzspannung unterhalb der keine Schadensakkumulation stattfindet

Wenn T die Bruchzeit in einem bestimmten Spannungsverlauf $\sigma_{(t)}$ ist, führt die Integration der Differentialgleichung (1.42) zu der folgenden Bedingung für T :

$$1 = e^{\lambda T} \int_0^T a \cdot (\sigma_{(t)} - \sigma_0)^b e^{-\lambda t} dt \quad (1.44)$$

Für eine konstante Belastung ergibt sich t_f zu:

$$t_f = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{\lambda}{a \cdot (\sigma - \sigma_0)^b} \right) \quad (1.45)$$

1-4.3 MODELL NACH FOSCHI UND YAO

Die Basis dieses Modells stellt das zuvor erwähnte Schädigungsmodell II von Barrett und Foschi dar. Neben den Vorteilen dieses Ansatzes, wie dass es sich eignet Daten gut darzustellen und sich in der Anwendung in verschiedenen Studien als gut handhabbar darstellte, sind auch einige Nachteile zu berücksichtigen. Insbesondere bei der Integration von Gl. (1.42) führt der Term $\lambda \cdot \alpha$ zu einem exponentiellen Schadenswachstum. Im Modell von Foschi und Yao wird die Variable λ durch einen lastabhängigen Term ersetzt. Aus diesem Grund wird das exponentielle Schadenswachstum sehr klein, wenn auch die Lasten sehr klein werden (Foschi und Yao, 1986).

Es ergeben sich daher folgende Gleichungen (Köhler und Svensson, 2002):

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \cdot \left(\frac{S_{(t)}}{R_0} - \eta \right)^B + C \cdot \left(\frac{S_{(t)}}{R_0} - \eta \right)^D \cdot \alpha_{(t)} \quad \text{wenn } S_{(t)} > \eta R_0 \quad (1.46)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = 0 \quad \text{wenn } S_{(t)} \leq \eta R_0 \quad (1.47)$$

Darin sind A , B , C und D Modellparameter. Mit dem in Gl. (1.46) ausgedrückten Modell haben die Modellparameter C und D keine Dimension und A und B haben die Dimension $1 / \text{Zeit}$. Dies ist eine Änderung des ursprünglichen Vorschlags, jedoch wird das Modell durch diese Änderung nicht beeinträchtigt. Der Parameter η kennzeichnet jene relative Belastungsschwelle, definiert als Produkt aus dem Kurzzeittragverhalten und dem Schwellenwert, unter dem sich Schädigungen nicht weiter akkumulieren.

Der Modellparameter A wird wie folgt bestimmt:

$$A = \frac{k \cdot (B+1)}{R_0 \cdot (1-\eta)^{B+1}} \quad (1.48)$$

Durch Einsetzen von Gl. (1.48) mit anschließendem Lösen der Differentialgleichung (1.46) ergibt sich die Zeit bis zum Bruch zu (Köhler, 2007):

$$t_f = \frac{\hat{S}}{k} + \frac{1}{C \cdot \left(\frac{\hat{S}}{R_0} - \eta\right)^D} \ln\left(\frac{1+\lambda}{\alpha_0 + \lambda}\right) \quad (1.49)$$

$$\text{mit } \alpha_0 = \left(\frac{\frac{\hat{S}}{R_0} - \eta}{1-\eta}\right)^{B+1} \quad \text{und } \lambda = \frac{k \cdot (B+1)}{C \cdot R_0 \cdot (1-\eta)^{B+1}} \left(\frac{\hat{S}}{R_0} - \eta\right)^{B-D} \quad (1.50)$$

1-4.4 MODELL NACH NIELSEN

Nielsen entwickelte ein Schädigungsmodell zur Modellierung des Materials unter konstanter sowie zyklischer Beanspruchung. Hierbei wird das Kriechen als Risswachstum im Bereich der maximalen Schädigung im viskoelastischen Material über ein Potenzgesetz beschrieben. Als Ansatz für die Rissmodellierung wurde die Form von Dugdale (1960) übernommen, welche sich aufgrund der geringen Sensitivität gegenüber Änderungen in der Beanspruchungsart nicht nur zur Modellierung von zug- sondern auch für druck- und scherbeanspruchte Materialien eignet (Brandner und Schickhofer, 2011).

Im Gegensatz zu den Schadensakkumulationsmodellen, bei denen Schäden als abstrakte Menge ohne direkten physikalischen Hintergrund eingeführt werden, führen die auf Bruchmechanik basierenden Modelle eine Schädigung als Erhöhung der Rissgröße in einem viskoelastischen Material ein. Ein Ansatz, der auf viskoelastischer Bruchmechanik basiert, wird in Nielsen (1979) mit der sogenannten „Damaged Viscoelastic Material (DVM) Theory“ eingeführt. Die Grundidee hinter dem DVM-Modell ist, dass Bauholz, aufgrund bereits beschriebener Prozesseinflüsse, als vorgeschädigtes Material gesehen werden kann. Der Grad der Vorschädigung wird durch Risse bestimmter Dimension dargestellt. Das zeitabhängige Verhalten von Holz unter Last wird infolge durch einen einzigen Riss unter Spannung senkrecht zur Rissebene modelliert. Der Riss wird als Dugdale-Riss mit einem zeitabhängigen Elastizitätsmodul modelliert (Köhler, 2007).

Zunächst werden die viskoelastischen Aspekte analysiert: Es ist bekannt, dass Holz ein viskoelastisches Kriechverhalten aufweist, welches durch das in Gl. (1.51) bzw. Abbildung 1-24 gezeigte einfache Potenzgesetz zusammen mit einer typischen Kriechkurve beschrieben werden kann. Das Ausmaß des Kriechens hängt vom Holzfeuchtegehalt (je feuchter desto ausgeprägter das Kriechen) und von der Temperatur (je wärmer desto ausgeprägter das Kriechen) ab (Madsen und Nielsen, 1992).

$$C_{(t)} = \frac{1}{E} \cdot \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^b \quad (1.51)$$

mit:

- E E-Modul
- τ Relaxationszeit
- b Kriechpotenz

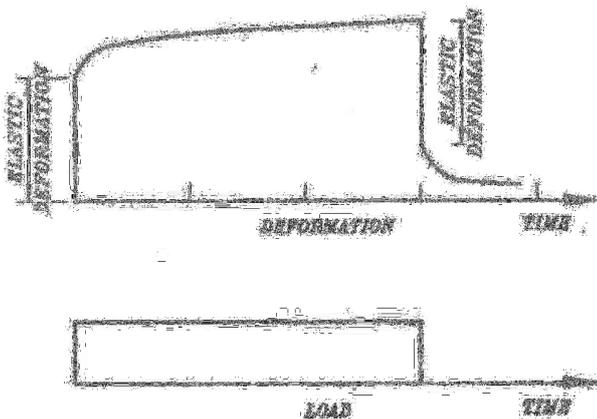


Abbildung 1-24: Typische Kriechkurve unter konstanter Belastung (Madsen und Nielsen, 1992)

In Abbildung 1-25 wird das Dugdale Rissmodell dargestellt. Es zeigt einen Querschnitt eines elastischen Körpers, in dem sich ein Riss entwickelt hat. Das Material wird einer global gleichmäßig verteilten Spannung (σ) senkrecht zur Rissebene unterworfen. Der Riss wird durch eine gleichmäßig verteilte Belastung der Kohärenz (σ_L) an den vorderen Zonen des Risses daran gehindert zu wachsen (d.h. orthogonal zur Belastungsrichtung auszudehnen). Die vordere Zone hat eine Länge von R , während der Riss eine Länge von $2l$ hat. Das Material der Rissfront ist in einem Abstand von δ gestreckt worden. Bei der Bruchmechanik wird angenommen, dass die Festigkeit mit der im Material enthaltenen Risslänge verbunden ist. Je größer die Risse sind, desto schwächer ist das Material (Madsen und Nielsen, 1992).

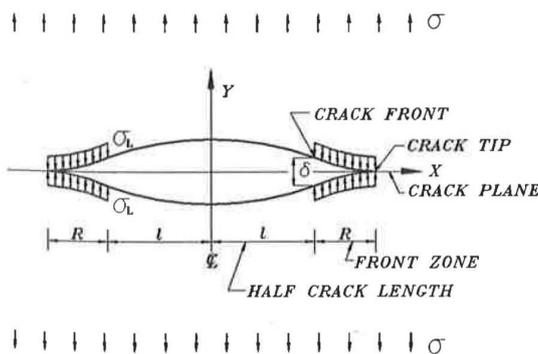


Abbildung 1-25: Dugdale Rissmodell (Madsen und Nielsen, 1992)

In Abbildung 1-26 wird der Riss unter Last in verschiedenen, fortschreitenden Phasen (von links nach rechts) analysiert. Auf der linken Seite ist der Riss unbelastet und weist eine Risslänge von $2l_0$ auf. Zum Zeitpunkt $t = 0$ wird die Last aufgebracht und es stellt sich eine Streckung des Materials von δ_0 ein, was die elastische Verformung darstellt. In Phase I wird im Laufe der Zeit das Material unter gleichbleibender Risslänge immer weiter plastisch gestreckt bis beim Zeitpunkt t_s die kritische Streckung von δ_{cr} eintritt, bei der sich das Material nicht mehr weiter ausdehnen kann. In Phase II beginnt nun das langsame Risswachstum, das heißt, die Risslänge ist jetzt zwischen $2l_0 < 2l < 2l_{cr}$. Bei einer gleichbleibenden

Streckung δ_{cr} und einer Risslänge von $2 l_{cr}$ erfolgt ein schlagartiger Übergang in die Phase III, bei welcher es zum Zeitpunkt t_f zum Bruch kommt (Madsen und Nielsen, 1992).

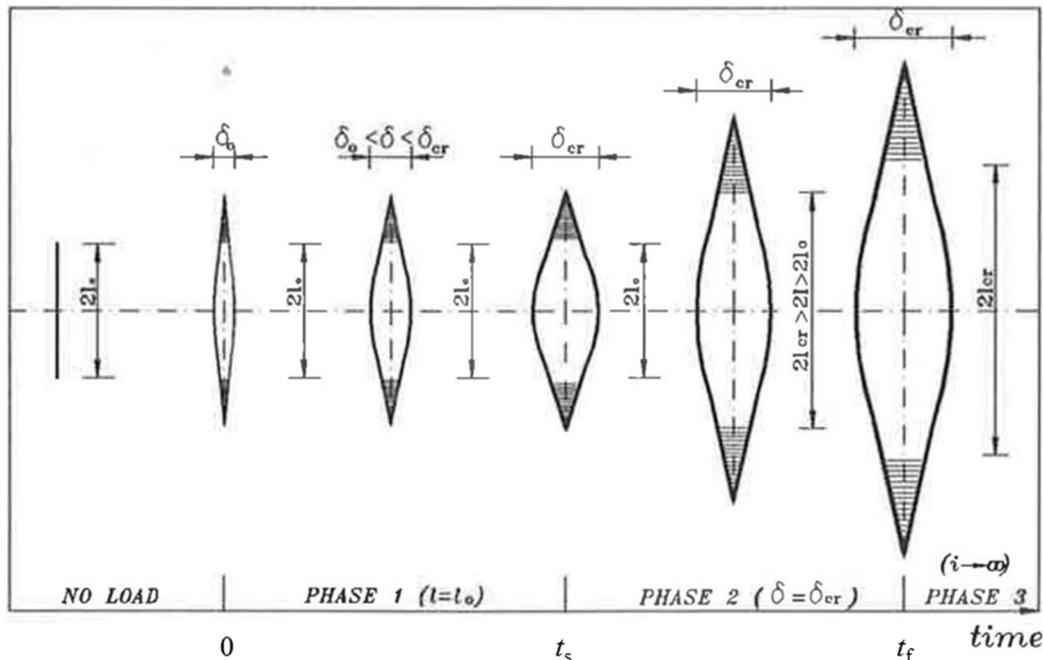


Abbildung 1-26: Risswachstum über 3 Phasen (vgl. Madsen und Nielsen, 1992)

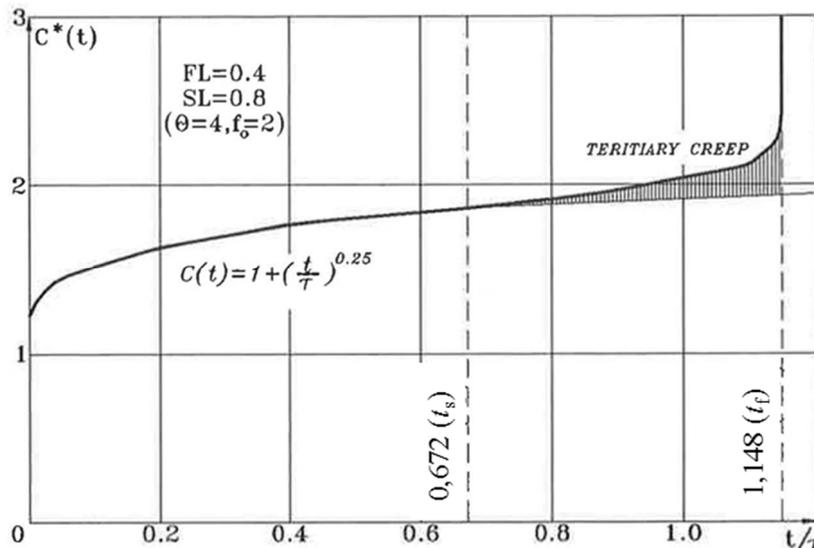


Abbildung 1-27: Tertiäres Kriechen, erklärt am Nielsen Modell (vgl. Madsen und Nielsen, 1992)

In Abbildung 1-27 ist eine typische Kriechkurve nach Clauser (1959) um das tertiäre Kriechen erweitert dargestellt. Das tertiäre Kriechen beginnt zum Zeitpunkt t_s , der durch den Wendepunkt in der Kriechkurve erkennbar ist. Die Risse beginnen zu wachsen und die Dehnung nimmt, im Vergleich zur Clauser-Kriechkurve, überproportional zu. Zum Zeitpunkt t_f kommt es zum sogenannten Kriechbruch, das heißt, dass ein Versagen in Folge des Erreichens der Bruchdehnung eintritt (Madsen und Nielsen, 1992).

Die Berechnung von t_f für eine konstante Belastung wird mit folgender Gleichung durchgeführt (Nielsen, 2005):

$$\frac{t_f}{\tau} = \left(\frac{1}{SL^2} - 1 \right)^{1/b} + \frac{8q}{\pi^2 FL^2 SL^2} \int_0^{\frac{1}{SL^2} - 1} \frac{x^{1/b}}{1+x} dx \quad (1.52)$$

$$\text{mit } q = [0,5 \cdot (1+b) \cdot (2+b)]^{1/b} \quad (1.53)$$

Für verschiedene Kriechpotenzen ergibt sich:

$$\frac{t_f}{\tau} = \mu^{1/b} + \frac{1}{(FL \cdot SL)^2} \cdot \begin{pmatrix} 3,06 \cdot \left[\frac{\mu^3}{3} - \frac{\mu^2}{2} + \mu - \log(\mu+1) \right] & b = \frac{1}{3} \\ 3,17 \cdot \left[\frac{\mu^4}{4} - \frac{\mu^3}{3} + \frac{\mu^2}{2} - \mu + \log(\mu+1) \right] & b = \frac{1}{4} \\ 3,25 \cdot \left[\frac{\mu^5}{5} - \frac{\mu^4}{4} + \frac{\mu^3}{3} - \frac{\mu^2}{2} + \mu - \log(\mu+1) \right] & b = \frac{1}{5} \end{pmatrix} \quad (1.54)$$

$$\text{mit } \mu = \frac{1}{SL^2} - 1 \quad (1.55)$$

mit:

- SL*Lastniveau
- FL*Festigkeitsniveau
- τ Relaxationszeit
- q*Zeitverschiebungsparameter
- b*Kriechpotenz
- t_f Lebensdauer

Vergleichsrechnungen mit der linearen Schädigungsakkumulation nach Palmgren-Miner zeigten, dass im Falle einer Wöhlerfunktion, ermittelt auf Basis der Elastizitätstheorie, eine Überschätzung gegenüber der DVM-Theorie festgestellt wurde. Im Falle einer Wöhlerfunktion, welche ebenfalls auf Basis eines viskoelastischen Materialverhaltens ermittelt wurde, konnte eine sehr gute Übereinstimmung bzw. Deckungsgleichheit mit den Ergebnissen der DVM-Theorie dargestellt werden (Brandner und Schickhofer, 2011).

1-5 MOTIVATION

Die doch sehr komplexe Thematik des DoL-Effektes stellt die Ingenieure vor große Herausforderungen. In Faserrichtung verschraubte Verbindungen kommen z.B. bei Fachwerksknoten immer häufiger zur Anwendung, jedoch wird in den Zulassungen bzw. Bewertungen der Bemessungswert in Faserrichtung auf einen Bruchteil jener der Tragfähigkeit quer zur Faserrichtung reduziert.

Exemplarisch wird hier gemäß der Bewertung ETA 12/0373 (2017) die Berechnungsschritte für die Ermittlung des Bemessungswertes in Faserrichtung vorgestellt. Für den Winkel $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung, wird $f_{ax,k,\alpha}$ wie folgt ermittelt:

$$f_{ax,k,\alpha} = k_{ax} \cdot f_{ax,k,90^\circ} \quad (1.56)$$

mit:

$$k_{ax} = 0,3 + \frac{0,7 \cdot \alpha}{45^\circ} \quad (1.57)$$

Für $\alpha = 0^\circ$ wird $f_{ax,k,\alpha}$ gemäß ETA 12/0373 (2017) auf 30 % der charakteristischen Tragfähigkeit quer zur Faserrichtung reduziert. Der Grund für die ingenieurmäßige konservative Herangehensweise ist das Fehlen ausreichend fundierter Untersuchungen zu diesem Thema. Um die Wirtschaftlichkeit von geschraubten Verbindungen in Faserrichtung zu erhöhen, gilt es entsprechende Untersuchungen durchzuführen und daraus ausreichend zuverlässige Modelle abzuleiten. Zusätzlich kommen auch Harthölzer und Hartholzprodukte – wie die BauBuche – immer öfter zur Anwendung. Bezüglich dieser Produkte gibt es in der Literatur noch keine Untersuchungen über Langzeiteffekte von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben. Zudem gilt es, das Potential einer am Institut für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz im Rahmen des FFG BRIDGE Projektes „hardwood SCREWS“ gemeinsam mit den Projektpartnern speziell für Hartlaubhölzer entwickelte Prototypschraube in dieser Arbeit zu untersuchen.

Da im Rahmen der Masterarbeit leider nicht ausreichend Zeit ist, um die DoL-Versuche bis zu ihrem Abschluss zu verfolgen, werden die Ergebnisse nur erste Trends liefern. Durch die Wahl von höheren Belastungsniveaus, die folglich kürzere Standzeiten bedingen, können jedoch erste Ergebnisse verzeichnet und auf Basis dieser eine erste Einschätzung des DoL Verhaltens getroffen werden.

1-6 ZIELSETZUNG

Im Rahmen der Literaturrecherche zum vorliegenden Thema konnten nur drei Arbeiten gefunden werden, welche sich mit dem Langzeitverhalten von parallel zur Faserrichtung geschraubten Verbindungen beschäftigen, vgl. Abschnitt 1-3. Die Ergebnisse dieser Arbeiten liegen zum Teil noch nicht vor bzw. liefern oftmals nur qualitative Aussagen und sind zudem auf Nadelholzprodukte beschränkt. Diese Arbeit soll einen Beitrag zum besseren Verständnis des Langzeittragverhaltens von faserparallelen applizierten selbstbohrenden Holzbauschrauben in Laubhölzern liefern und stellt somit eine der ersten Publikationen dar, die sich mit dieser Thematik befasst. Da als Referenz die Holzart Fichte für alle vorliegenden Konfigurationen herangezogen wird, ist es ebenfalls möglich, Parallelen bzw. eventuelle Unterschiede zwischen Nadel- und Laubhölzern, aber auch zwischen den neu gewonnenen Erkenntnissen und den Erfahrungen aus der Literatur aufzuzeigen.

1-7 GLIEDERUNG DER ARBEIT

Die weiteren Kapitel dieser Masterarbeit sind wie folgt gegliedert:

Das Kapitel zwei gibt einen Überblick über das verwendete Material und die gewählten Methoden. Beginnend beim Material werden nach Darlegung einer umfangreichen Prüfplanung die verwendeten Holzarten bzw. das –produkt beschrieben. Im Anschluss daran werden die zwei untersuchten Holzbauschraubentypen vorgestellt. Das Unterkapitel Methoden gliedert sich in vier Teile. Beginnend mit der Erörterung der Durchführung der Referenzversuche und der Langzeitversuche, wird zusätzlich die Methodik der ergänzenden Untersuchung zum DoL-Effekt angeführt. Den Abschluss dieses Kapitels stellen die Bestimmung von wesentlichen mechanischen Kenngrößen und die statische Auswertemethodik dar.

In Kapitel drei werden die Ergebnisse der Referenzversuche dargelegt und diskutiert. Dabei wird insbesondere auf die Holzfeuchte, die Rohdichte, die Ausziehfestigkeit und die axiale Verbundsteifigkeit eingegangen. Das Fazit der Referenzversuche stellt im Wesentlichen die Eingangsparameter der Hauptversuche dar.

In Kapitel vier werden die Ergebnisse der Hauptversuche dargelegt und diskutiert. Beginnend bei der Dokumentation der Klimadaten wird im Anschluss auf die ermittelten Prüfergebnisse eingegangen. Diese werden in Form von DoL-Ergebnisdiagrammen in Abhängigkeit der Holzart, der Einbindelänge und des Schraubentyps dargelegt und diskutiert.

Im Kapitel fünf sind die ergänzenden Untersuchungen zum DoL-Effekt angeführt. Die Ausziehfestigkeiten werden ohne Rohdichtekorrektur bzw. rohdichtekorrigiert in Abhängigkeit der Versagenszeit in einem logarithmischen Maßstab der Basis 10 angegeben. Zusätzlich werden die axialen Verbundsteifigkeiten sowie der quasi linear-elastische Anteil gemäß Modell im Kraft-Weg Diagramm dargestellt. Den Abschluss des Kapitels fünf bildet das DoL-Ergebnisdiagramm für Buche, da die ergänzenden Untersuchungen mit einer transformierten Zeit in diesem Diagramm dargestellt werden können.

Die wesentlichen, im Rahmen dieser Arbeit gewonnen Erkenntnisse werden im abschließenden Kapitel sechs nochmals kurz zusammengefasst. Zudem werden auf Basis der vorliegenden Daten vorläufige k_{mod} Faktoren angegeben. Im Conclusio und Ausblick werden diese Faktoren mit den europäischen Bemessungsnormen verglichen und diskutiert.

KAPITEL 2: MATERIAL UND METHODEN

2-1 MATERIAL

2-1.1 PRÜFPLANUNG

Das Ziel der Untersuchung ist es, das Langzeitverhalten von axial beanspruchten selbstbohrenden Schrauben bei Applizierung 0° zur Faser in Probekörpern der Holzarten bzw. -werkstoffe Fichte, Buche und BauBuche zu bestimmen. Um gleichbleibende Klimabedingungen der einzelnen Prüfkörper zu erreichen, erfolgte eine Konditionierung der Probekörper in einer Klimakammer des Institutes für Holzbau und Holztechnologie bei 20° und 85 % relativer Luftfeuchte für mindestens vier Monate. Für Fichte resultiert aus diesen Klimabedingungen eine Ausgleichsfeuchte von rd. 16 -18 %. Bei der Buche und der BauBuche stellt sich eine Ausgleichsfeuchte von rd. 14 % ein. Die Prüfbedingungen stellen somit weitgehend eine Dauerbeanspruchung unter Nutzungsklasse 2 nach Eurocode 5 (2015) dar.

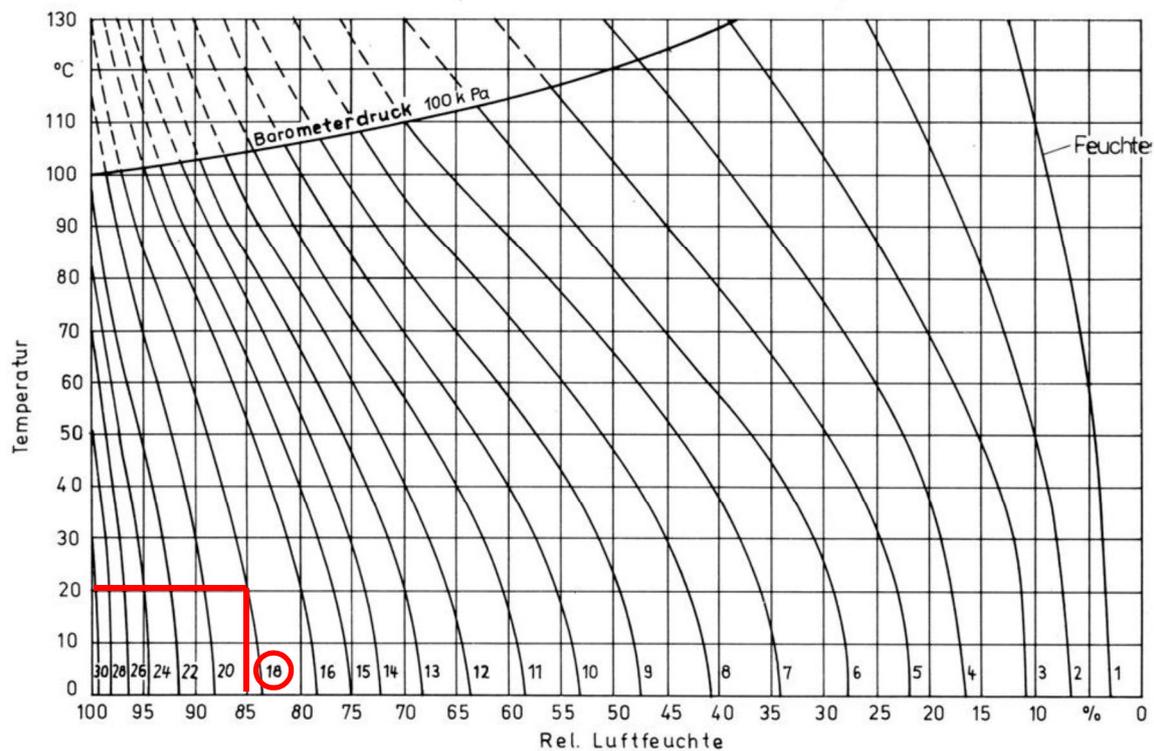


Abbildung 2-1: Sorptionsisotherme von Fichtenholz bei variabler rel. Luftfeuchte und Temperatur (Niemz, 2011)

Im Vorfeld der Langzeitprüfungen wurden Referenzprüfungen zur Feststellung der statischen Kurzzeitfestigkeit von axial beanspruchten Schrauben bei identen Applizierungs- bzw. Prüfbedingungen wie bei den DoL-Prüfungen durchgeführt. Die mittlere Traglast aus diesen Referenzprüfungen dient als Eingangsparameter und als Referenzwert, für alle weiterführenden Langzeitversuche. Bei gleicher Eindrehlänge von 60 mm und gleichem Achsfaserwinkel von 0° wurden folgende Parameter variiert:

- Schraubentyp {Referenzschraube (RF); Prototypenschraube (P1)}
- Holzart {Fichte (FI); Buche (BU); BauBuche (BB)}
- Einbindelänge {0 *d*; 2 *d*; 4 *d*}
- Lastniveau {60 %; 70 %; 80 %}

Daraus ergibt sich eine Vielzahl an Konfigurationen. Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die Anzahl und die untersuchten Konfigurationen bei den Referenzprüfungen, welche wie die DoL-Prüfungen in einer „pull-pull“ Konfiguration (siehe Abschnitt 2-2.2) beansprucht wurden. In Summe wurden 200 Prüfungen durchgeführt und entsprechend 180 Probekörper verwendet.

Tabelle 2-1: Anzahl der Probekörper pro Serie

	0 <i>d</i>		2 <i>d</i>		4 <i>d</i>	
	RF	P1	RF	P1	RF	P1
Fichte (FI)	10	10	10	10	10	10
Buche (BU)	20 ¹	20 ¹	10	10	10	10
BauBuche (BB)	10	10	10	10	10	10

Anmerkungen:

¹... Anmerkung 1: Hier wurde ergänzend zum 1. Versagen auch noch die zweite Schraube im Probekörper in einem folgenden Versuch bis zum Versagen geprüft.

Um die Langzeitversuche durchzuführen, wurde ein Prüfrahmen (siehe Abbildung 2-6) konstruiert, in dem je Prüfkette drei Prüfkörper in einer „pull-pull“ Konfiguration (zwei Holzbauschrauben pro Prüfkörper) in Serie geprüft wurden. In Summe stehen 27 Plätze für Prüfketten zur Verfügung und es können somit 81 Probekörper bzw. 162 Holzbauschrauben gleichzeitig geprüft werden. Pro Konfiguration werden minimal sechs und maximal sieben Probekörper eingesetzt. Um nach erfolgten Ausziehversagen auf einer Prüfkörperseite die zweite Seite ebenfalls bis zu ihrem Versagen weiter prüfen zu können, wurde eine Schraube mit Nenndurchmesser $d = 12$ mm appliziert und der Probekörper erneut eingespannt. Nach insgesamt zehn Versagensfällen innerhalb einer Parameterausprägung wurde kein Probekörper mehr nachgerüstet und der freiwerdende Platz durch Gewindestangen mit dem Durchmesser 12 mm überbrückt. Das bedeutet, dass sich pro Konfiguration minimal zwölf und maximal vierzehn Versagensfälle ergeben können. Da im Prüfrahmen für die Langzeitversuche nicht ausreichend Platz für alle Konfigurationen ist, wurde für die Buche und BauBuche die Konfiguration mit der Einbindelänge 4 *d* – das bedeutet 32 mm – im Rahmen der DoL-Prüfungen aufgrund eines nicht festzustellenden Unterschiedes im Tragverhalten im Vergleich zur Konfiguration mit einer Einbindelänge 2 *d* nicht weiter verfolgt. Somit ergibt sich folgende Anzahl an Probekörpern für die Langzeitversuche:

$$PK_{FI,ges} = \begin{cases} \min : 6PK \cdot 2ST \cdot 3EL \cdot 3SL = 108PK_{ges} \\ \max : 7PK \cdot 2ST \cdot 3EL \cdot 3SL = 126PK_{ges} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$PK_{BU,ges} = \begin{cases} \min : 6PK \cdot 2ST \cdot 2EL \cdot 3SL = 72PK_{ges} \\ \max : 7PK \cdot 2ST \cdot 2EL \cdot 3SL = 84PK_{ges} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$PK_{BB,ges} = \begin{cases} \min : 6PK \cdot 2ST \cdot 2EL \cdot 3SL = 72PK_{ges} \\ \max : 7PK \cdot 2ST \cdot 2EL \cdot 3SL = 84PK_{ges} \end{cases} \quad (2.3)$$

Dabei sind:

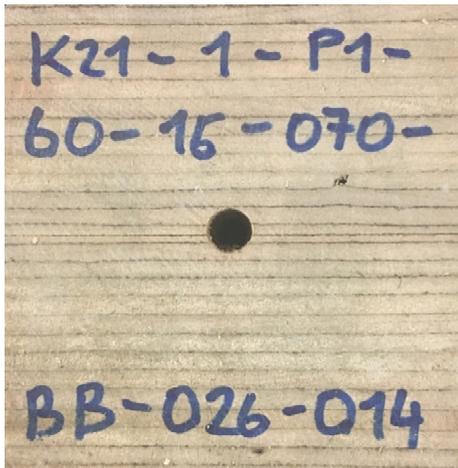
- FI Fichte
- BU Buche
- BB BauBuche
- PK Probekörper
- ST Schraubentypen
- EL Einbindelänge
- SL Lastniveau

Tabelle 2-2: Anzahl der Probekörper gesamt

	Referenzprüfungen		Langzeitprüfungen		Summe	
	min	max	min	max	min	max
Fichte (FI)	60	60	108	126	168	186
Buche (BU)	60	60	72	84	132	144
BauBuche (BB)	60	60	72	84	132	144

Die Probekörper der Holzart Fichte (*Picea abies*) wurden aus Kanthölzern der Firma Hasslacher, welche im August 2016 mit einem Querschnitt von $80 \times 160 \text{ mm}^2$ und einer Länge von 4,0 m gehobelt geliefert wurden, gewonnen. Jene Proben für Buche (*Fagus sylvatica*) und BauBuche (LVL aus *Fagus sylvatica*) wurden aus einer Lieferung vom Juni 2016 von der Firma Pollmeier Massivholz GmbH & Co. KG entnommen. Die BauBuche wiesen Abmessungen von $80 \times 160 \text{ mm}^2$ im Querschnitt und eine Länge von 4,0 m auf und jene der Buche waren $70 \times 160 \text{ mm}^2$ im Querschnitt und hatten eine Länge von 3,4 m. Die Querschnitte wurde in der Holzwerkstatt des Institutes für Holzbau und Holztechnologie jeweils in der Breite halbiert und auf eine Länge von rund 250 mm abgelängt, sodass sich eine Probekörperabmessung von rund $80 \times 80 \times 250 \text{ mm}^3$ ergab. Die Probekörper wurden im Anschluss derart nummeriert, sodass eine eindeutige Zuordnung zum ursprünglichen Balken später möglich war. Das bedeutet, dass jeder Probekörper vorab einen zweistelligen Code bestehend aus Balkennummer und fortlaufender Nummer erhielt.

Zur Beschriftung der endgültigen Probekörper wurde ein neustelliger Code ausgewählt, der sich wie folgt zusammensetzt:



K21	Kettennummer in den DoL-Prüfungen
1	Position in der Kette
P1	Schraubentyp
60	Eindrehlänge
16	Einbindelänge
070	Lastniveau
BB	Holzart
026	Balkennummer
014	laufende Nummer

Abbildung 2-2: Bezeichnung Probekörper (beispielhaft)

2-1.2 HOLZ

In diesem Kapitel werden die Strukturmerkmale und Einsatzgebiete der drei verwendeten Holzarten bzw. Holzproduktes vorgestellt. Im Ingenieurbau werden sehr häufig Nadelhölzer eingesetzt, welche aufgrund ihres geringen Gewichtes im Vergleich zu den Laubhölzern Vorteile in der der Verarbeitung haben.

Fichte (*Picea abies*)

Die Fichte wird in dieser Arbeit als Referenzholzart verwendet, da diese primär in Europa im Holzbau eingesetzt wird. Zusätzlich sind bereits eine Vielzahl an Untersuchungen in der Vergangenheit durchgeführt worden und die Fichte in jeder ETA (Europäisch Technische Bewertung) als zugelassene Holzart für selbstbohrende Schrauben vorkommt. Neben der Verwendung als Grundmaterial für die Produktion von Brettschichtholz (BSH) werden auch keilgezinktes Konstruktionsvollholz (KVH), Brettsperrholz (BSP) und weitere Produkte aus Fichte hergestellt (Reichinger, 2017). Bezüglich der Dauerhaftigkeit schreibt Wagenführ, dass diese eher als gering einzustufen ist, da die Fichte pilz- und insektenanfällig und nicht witterungsbeständig ist (Wagenführ, 2007).

Buche (*Fagus sylvatica*)

Die verwendete Buche weist eine mittlere Rohdichte von 720 kg/m^3 auf und stellt lt. Wagenführ (2007) mit einem Anteil an der Gesamtwaldfläche von 10 % die häufigste Laubholzart in Mitteleuropa. Eine Herausforderung der Buche besteht darin, die hohen Quell- und Schwindmaße in den Griff zu bekommen. Diese wirken sich neben diversen Inhaltsstoffen insbesondere auf die Verklebung aus. Eine dauerhafte Verklebung konnte erst nach langjähriger Forschung (Hübner, 2013) sichergestellt werden und folglich wurde im Jahre 2013 mit der ersten allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-679 (2013) für BSH aus Buche, die Machbarkeit einer dauerhaften Verklebung im Einsatzgebiet der Nutzungsklasse 1 als erbracht angesehen. Die Festigkeitskennwerte der Buche bestechen im Vergleich zur Fichte durch das 1,5 – 2,0 fach höhere Potential (Reichinger, 2017).

BauBuche (LVL aus *Fagus sylvatica*)

Um ein noch höheres Potential des natürlichen Werkstoffes Buche zu nützen, wird diese in Furniere mit 3 mm Stärke geschält und entsprechend sortiert. So können die Fehlstellen im Material Holz zu großen Teilen entfernt bzw. deutlich gestreut/verteilt werden. Danach werden diese Furniere wieder miteinander verklebt und es entsteht ein hochleistungsfähiges Bauprodukt. Die resultierende charakteristische Biegezugfestigkeit liegt bei 70 N/mm^2 . Insbesondere bei Verformungsberechnungen ist der hohe Elastizitätsmodul von 16.700 N/mm^2 , bedingt durch die Sortierung, die Komprimierung im Zuge des Verpressens der Furniere und die Kleberschichten, von Vorteil. Dieses Hochleistungsbauprodukt wird von der Firma Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH produziert, welche seit 2013 zwei Zulassungen für

Bauprodukte aus Buchen-Furnierschichtholz (FSH) hat. Die BauBuche wird gegenwärtig sowohl als Träger (ETA-14/0354, 2015) als auch als Plattenwerkstoff (Z-9.1-838, 2016) vertrieben (Reichinger, 2017).

2-1.3 HOLZBAUSCHRAUBEN

Sowohl für die Referenzversuche als auch für die Langzeitversuche wurden zwei Schraubentypen verwendet. Einer dieser Schraubentypen diente als Referenzprodukt (RF) für die derzeit handelsüblichen selbstbohrenden Vollgewinde-Holzbauschrauben, der zweite Schraubentyp ist jene Prototypenschraube „P1“ welche im Zuge der Masterarbeit von Pöll (2017) entwickelt wurde und speziell für die Anwendung in Hartlaubhölzern konzipiert ist. Da es sich bei dieser Schraube um eine relativ neue Entwicklung handelte, sind nur spärliche Erfahrungswerte, insbesondere zu ihrem Verhalten bei Langzeitbeanspruchung, vorhanden.



Abbildung 2-3: Gewinde und Spitze von Referenzschraube und Prototyp 1 (Reichinger, 2017)

Als Referenzschraube wird ein Produkt der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH gemäß ETA-12/0373 (2012) eingesetzt, welche in ihrer Gewindegeometrie, der Spitzenausführung und sonstiger Merkmale weitgehend der Prototypenschraube entspricht, abgesehen vom Kern- zum Außendurchmesserverhältnis des Gewindes. Die Referenzschraube besteht aus Kohlenstoffstahl und ist vom Typ Rapid[®] mit Vollgewinde (VG), Senkkopf und galvanischer Gelbverzinkung. Der Nenndurchmesser (Gewindeaußendurchmesser) beträgt 8 mm bei einer Gesamtlänge von 240 mm. Im Bereich der Spitze ist ein Verdichter angeordnet.

Man kann mit freiem Auge erkennen, dass der Kerndurchmesser der Prototyp 1 Schraube größer gewählt wurde als bei der Referenzschraube. Das daraus resultierende, größere Torsionswiderstandsmoment erlaubt größere Eindrehtiefen selbst bei selbstbohrender Applikation in hochdichten Hartlaubholzprodukten und aufgrund der ebenfalls damit einhergehenden höheren Stahlzugtragfähigkeit, damit mehr Tragfähigkeit pro Schraube, sofern auf diese auf das max. Potential (Auszieh widerstand > Stahlzugtragfähigkeit) ausgelegt ist. Die ebenfalls von der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH produzierte Teilgewindeschraube mit einem Nenndurchmesser von 8,1 mm und einer Abmessung von 240/100 mm, weist eine Vollspitze mit Verdichter sowie eine galvanische Blauverzinkung (ChromVI-frei) auf. Im Anschluss an das 100 mm lange Gewinde folgt ein 10 mm langer Verdichter, der die Reibung des nachlaufenden Schaftes verringern soll (Reichinger, 2017).

2-2 METHODEN

2-2.1 REFERENZVERSUCHE

Um die Ausziehfestigkeit bei Kurzzeitbeanspruchung für jede einzelne Serie mit unterschiedlicher Parameterausprägung zu bestimmen, wurden Referenzversuche durchgeführt. Die Serien unterscheiden sich in der Holzart, der Einbindetiefe und vom Schraubentyp. Die Einbindetiefe gibt an, wie weit das Gewinde in Bezug auf die Oberfläche versenkt ist. Um ein solches Einbinden auch für die verwendeten Vollgewindeschrauben zu realisieren, wurde für beide Schraubentypen mittels einer Langlochbohrmaschine mit einem Bohrer vom Durchmesser 8 mm im Bereich der Einbindung entsprechend vorgebohrt. Somit ist sichergestellt, dass die Kraftübertragung erst in der gewünschten Tiefe beginnt und somit ein gewisses „Vorholz“ entsteht. Jeweils zehn Probekörper wurden pro Serie geprüft.

Dabei erfolgte eine „pull-pull“ Prüfung, bei der beidseits in den Probekörper jeweils eine Schraube desselben Typs eingedreht wurde, was ein Versagen auf der jeweils schwächeren Seite des Prüfkörpers zur Folge hatte. Die Referenzversuche wurden auf der Universalprüfmaschine lignum_uni_275 durchgeführt, welche eine maximale Prüfkraft von 275 kN erreichen kann. Diese Prüfmaschine besteht aus einer unteren fixen und einer oberen mit Spindeltrieb beweglichen Traverse. Da die Referenzprüfungen an der Einzelschraube durchgeführt wurden, wurde die maximale zur Verfügung stehende Prüfkraft der Prüfmaschine bei weitem nicht erreicht. In Abbildung 2-4 (links) ist der Prüfaufbau der Referenzversuche ersichtlich. Zu beachten ist, dass die Einbindelänge (l_{emb}) variiert, jedoch die Eindrehlänge bei allen Konfigurationen gleich ist. Die effektiv wirkende Gewindelänge (l_{ef}) errechnet sich abzüglich der Schraubenspitze zu $l_{ef} = 52$ mm. Abbildung 2-4 (rechts) zeigt den Prüfaufbau in der Universalprüfmaschine lignum_uni_275.

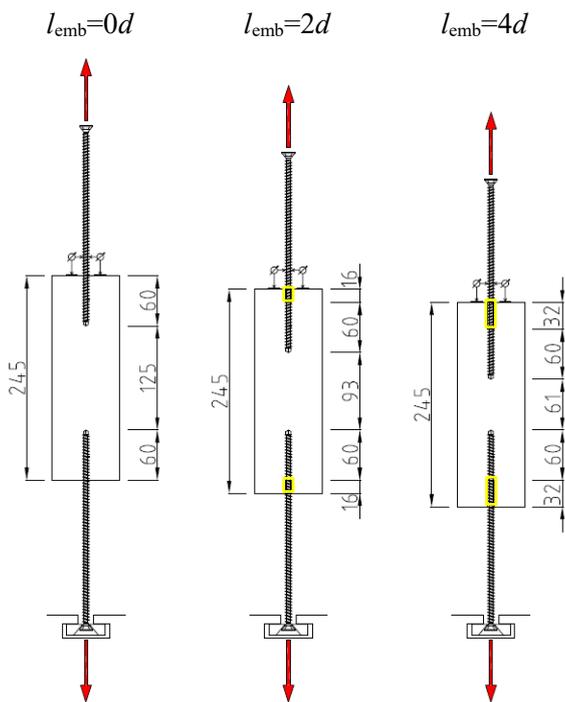


Abbildung 2-4: links: schematische Darstellung des Prüfaufbaus unter verschiedenen Einbindelängen l_{emb} , rechts: Prüfaufbau mit oben angeordneten Wegaufnehmer in der Universalprüfmaschine lignum_uni_275

Wie in Abbildung 2-5 ersichtlich, erfolgte das Eindrehen der Schrauben unmittelbar vor dem Prüfungsvorgang. Dabei wurde eine Schablone verwendet, um bestmöglich einen Achs-Faserwinkel von 0° zu erreichen. Im Anschluss wurde der Probekörper in die Prüfmaschine eingebaut und unter Aufbringung einer konstanten Prüfungsgeschwindigkeit beansprucht sodass sich ein Versagen innerhalb der gemäß ÖNORM EN 1382 (1999) angegebenen Dauer von 90 ± 30 s einstellte. In der aktuell gültigen Fassung der EN 1382 (2016) ist die Vorschubgeschwindigkeit derart zu wählen, dass F_{max} in 60 ± 15 s erreicht wird, jedoch wird aufgrund der Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit älteren Untersuchungen der EN 1382 in der Fassung 1999 der Vorzug gegeben. Die Vorschubgeschwindigkeit variierte in Abhängigkeit von Holzart und Schraubentyp zwischen 1,0 bis 2,5 mm/min. Wie bereits eingangs erwähnt, tritt bei „pull-pull“-Versuchen und identer Bestückung beider Seiten dieses seriellen Systems ein Versagen an der schwächeren Seite ein. Daraus kann man schließen, dass die zweite, noch intakte Seite entsprechend mehr ausgehalten hat. Nachdem die Tragfähigkeit der intakten Seite jedoch nicht messbar ist, liegt eine sog. Rechtszensurierung dieser vor. Um in der späteren Auswertung die Methodik der Rechtszensurierung zu validieren, wurde für die Serie Buche mit der Einbindelänge $0d$ für die Referenzschraube und den Prototyp P1 auch die zweite Seite geprüft. Anstatt der bereits herausgezogenen Schraube wurde eine

Schraube mit dem Nenndurchmesser 12 mm appliziert und etwas tiefer versenkt. Der Prüfkörper wurde erneut geprüft, bis ein Versagen der zweiten Seite mit einer Durchmesser 8 mm Schraube eintrat.

Um den lokalen relativen Weg der Schraube zum Holzkörper während der Prüfung zu bestimmen, wurden zwei induktive Wegaufnehmer (W10TK der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) gegenüberliegend an der oberen Schraube angebracht. Um eine planparallele Oberfläche zwischen Holzkörper und Wegaufnehmer herzustellen, wurden zusätzlich zwei Glasplättchen eingesetzt. Die Wegaufnehmer zeichneten den vertikalen Weg zwischen dem Befestigungspunkt an der Schraube und dem Holzkörper auf, welcher folglich zur Bestimmung der Verbundsteifigkeit des im Holz eingebundenen Gewindes verwendet wurde.

Die weggesteuerte Prüfung wurde nach Erreichen der Maximalkraft bis zu einem Lastabfall auf 25 % des Maximums fortgesetzt, um das betreffende Nachbruchverhalten aufzuzeichnen. Im Anschluss der Prüfung wurde die Schraube im Regelfall wieder maschinell herausgeschraubt. Bei der Prüferie mit der Referenzschraube in BauBuche kam es jedoch gleich beim ersten Probekörper beim Herausdrehen zu einem Torsionsbruch der Schraube. Somit wurde entschieden, dass bei den Serien mit BauBuche ein Herausziehen der Schraube mittels der Prüfmaschine zu erfolgen hat; dies wurde bei der Bestimmung der Rohdichte auch entsprechend durch Abzug des Schraubkanals berücksichtigt. Ein Abzug des Schraubkanals war deswegen erforderlich, da das Gewinde beim Herausziehen komplett mit Holz gefüllt war. Beim Herausdrehen hingegen verblieb das Material in verdichteter Form im Bereich des Schraubkanals im Probekörper.

Die aufgebrachte Kraft in [N], die zugehörige Zeit [s] und der Maschinen- und Traversenweg in [mm] wurde von der internen Messeinrichtung der Prüfmaschine während der Prüfung erfasst. Es kam das Programm testXpert V11.02 der Firma Zwick GmbH & Co. KG zur Anwendung, welches die Prüfdaten mit einer Messfrequenz von 5 [Hz] erfasste.



Abbildung 2-5: Schablone zum Eindrehen der Schrauben

2-2.2 LANGZEITVERSUCHE

Prüfplanung

Die Versuche wurden im konstanten Klima der Nutzungsklasse 2 bei 20 °C und mindestens 80 % relative Luftfeuchte in einer Klimakammer des Instituts für Holzbau und Holztechnologie durchgeführt. Um ebenfalls eine „pull-pull“-Konfiguration in der Klimakammer zu realisieren wurde im Zuge dieser Prüfungen ein entsprechender Prüfrahmen konstruiert (siehe Abbildung 2-6). Um mehr Prüfdaten in kürzerer Zeit zu generieren, wurden drei Probekörper in Serie geschaltet und somit sechs Schrauben

gleichzeitig geprüft. Diese serielle Anordnung an Probekörpern wurde folglich als Kette bezeichnet. Mit dem verfügbaren Prüfrahmen war es möglich, bis zu 28 Ketten, das bedeutet 84 Probekörper und 168 Schrauben, gleichzeitig zu prüfen. Die Abmessungen des Prüfrahmens sind $5900 \times 2900 \times 310 \text{ mm}^3$. Der obere und untere Träger bestehen jeweils aus zwei UPE 400 Profilen mit 80 mm Distanz. Der Rahmen selbst besteht aus sechs Feldern, wobei im letzten Feld (im Bild links) keine Ketten installiert werden. Als Stützen wurden für die Mittelfelder fünf Rechteckrohrhohlprofile mit den Abmessungen $200 \times 100 \times 10 \text{ mm}^3$ und für die Endfelder zwei Rechteckrohrhohlprofile mit den Abmessungen $250 \times 100 \times 10 \text{ mm}^3$ gewählt. Um die Ketten mit dem Rahmen zu verbinden, wurden M16 Gewindestangen verwendet, wobei die obere Gewindestange als Kraftmessstange ausgebildet wird. Die Kraft aus der mittels DMS gemessenen Dehnungen wurde über eine entsprechende Kalibrierfunktion ermittelt und im Sekundentakt aufgezeichnet.

Die Kraft in den Ketten wurde bis zu einem bestimmten Lastniveau hydraulisch vorgespannt, danach erfolgt die Feineinstellung manuell mit Schraubenschlüssel. Um dem Kriechen und somit dem Kraftabfall entgegenzuwirken, wurden im Bereich der unteren Träger Tellerfedern installiert. Die genaue Abstimmung dieser Tellerfedern ist im Kapitel 3: Fazit der Referenzversuche angeführt.

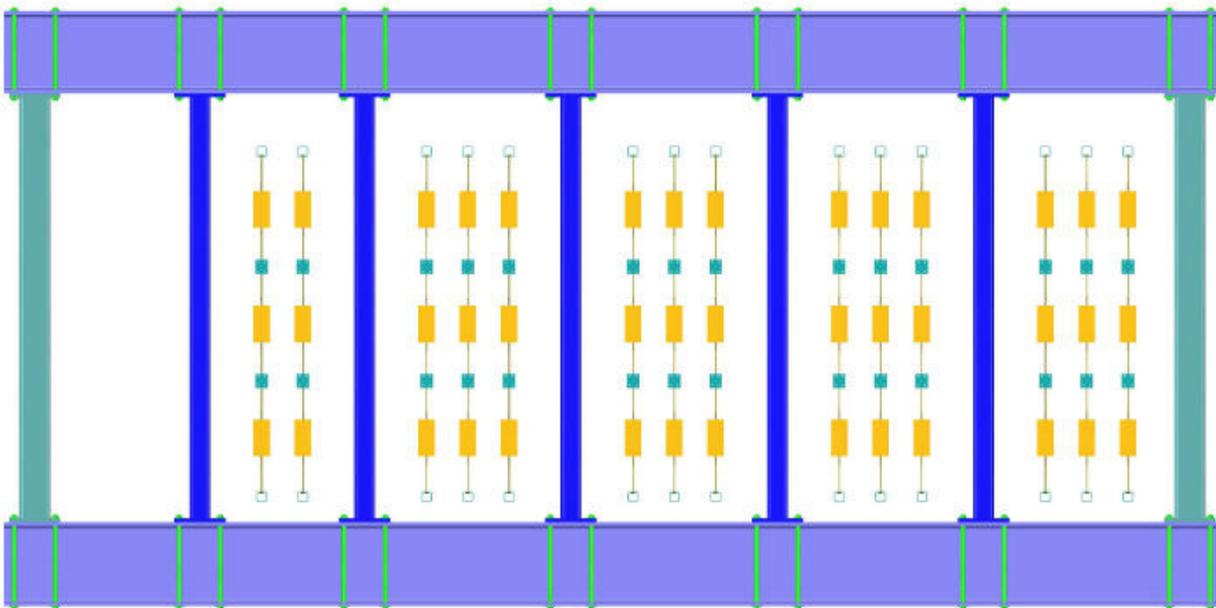


Abbildung 2-6: Visualisierung Prüfrahmen Langzeitversuche; max. 14 Prüfketten vorne und hinten (zweireihig)

Prüfvorbereitung

In den Langzeitversuchen wurden drei Einbindelängen (l_{emb}) geprüft. Diese wurden in Abhängigkeit des Nenndurchmessers der Holzbauschraube definiert und betragen $0 d$, $2 d$ und $4 d$. Bei einer Schraube mit Nenndurchmesser von 8 mm ergaben sich somit Einbindelängen von 0 mm, 16 mm und 32 mm. Um für sämtliche Konfigurationen mit den unterschiedlichen Einbindelängen eine serielle Anordnung von drei Probekörpern zu ermöglichen, mussten die Probekörper im Sinne einer Reduktion der Gesamtlänge (zwei Schrauben plus Holzbauteil) wie folgt optimiert werden: um gleiche Kettenlängen zu erhalten, wurden die $0 d$ Probekörper um 64 mm gekürzt, die $2 d$ Probekörper um 32 mm gekürzt und $4 d$ Probekörper konnten in der Ausgangslänge von 245 mm verbleiben.

In Abbildung 2-7 sind die Probekörper der Langzeitversuche inklusive der applizierten Schrauben noch einmal graphisch dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der Schraubenspitzenabstand bei allen drei Konfigurationen konstant 61 mm beträgt.

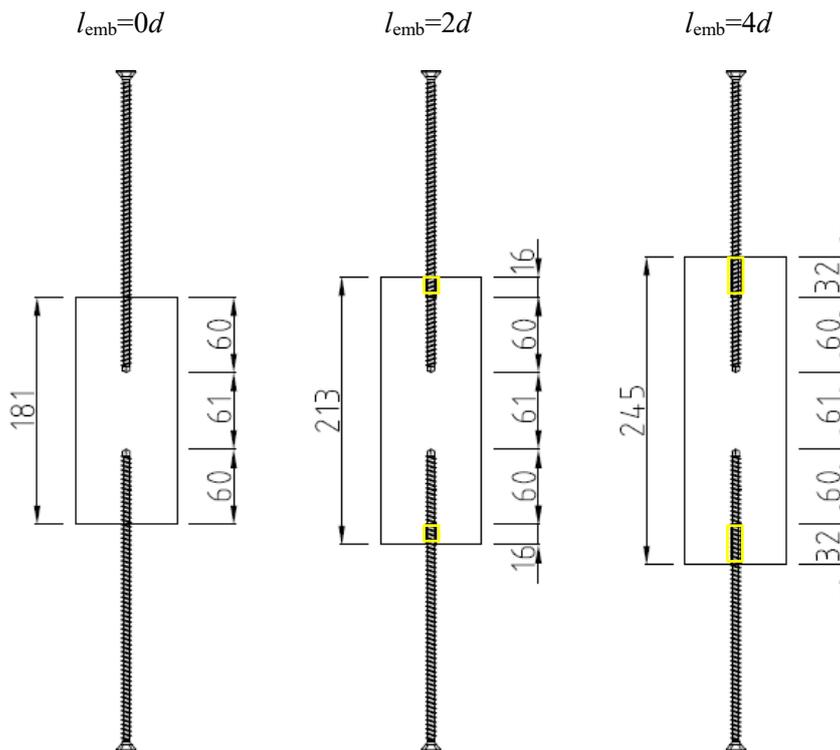


Abbildung 2-7: links: Prüfkörperkonfiguration ohne Einbindelänge, mitte: Prüfkörperkonfiguration bei einer Einbindelänge von $l_{emb} = 16 \text{ mm}$, rechts: Prüfkörperkonfiguration bei $l_{emb} = 32 \text{ mm}$

Die Realisierung der Einbindelänge erfolgte wie bei den Referenzprüfungen mit einer Langlochbohrmaschine mit einem 8 mm-Bohrer. Die Bezeichnung der Probekörper erfolgte sinngemäß wie in Abbildung 2-2 ersichtlich. Im Anschluss wurde an beiden Seiten der Probekörper mittels Schablone eine Durchmesser 8 mm Schraube appliziert. Wie in Abbildung 2-8 ersichtlich, erfolgte die Verbindung der Schrauben mittels speziell angefertigter Stahlteile und die Anbindung an die Gewindestangen mit Hohlprofilen.



Abbildung 2-8: Verbindungselement zur Koppelung der Prüfkörper (links) und als Koppelungselement zur Anbindung der Prüfkörper an die Gewindestangen

Prüfmethode

Um die Ketten auf die Zielkraft (Mittelwert der axialen Tragfähigkeit aus Referenzprüfungen der Einzelschraube multipliziert mit dem jeweiligen Lastniveau) vorzuspannen, war es notwendig, die aktuelle Kraft in der Kette ablesen zu können. Dafür wurde das Programm DAQMaster der Firma Yokogawa verwendet. Mit dieser Desktopanwendung lassen sich von jedem PC im Netzwerk über eine IP-Adresse die aktuellen Kräfte als Messwerte der als Teil der Ketten angeordneten Kraftmessstangen ablesen. Wie bereits eingangs erwähnt, erfolgte der Anspannvorgang hydraulisch und anschließend manuell. Dafür wurde die jeweilige Kette entsprechend vorbereitet. Nach dem Einbau des Zylinders wurde die obere Mutter handfest angezogen. Dadurch wurde eine geringe Vorkraft aufgebracht, sodass sich der hydraulische Anspannweg verringerte. Wie in Abbildung 2-9 ersichtlich, erfolgte das Anspannen im Bereich des oberen Trägers. Es wurde bis zum Erreichen der Zielkraft hydraulisch vorgespannt. Im Anschluss wurde die Mutter zum Untergurt des oberen Trägers nachgedreht und mit Schraubenschlüsseln die Kette um ca. 2-4 % über die Zielkraft manuell nachgespannt. Dies war insofern notwendig, da die Kraft durch das anfänglich stark ausgeprägte Kriechen relativ schnell abnahm. Diese geringfügige Mehrbeanspruchung der Ketten wurde in der Auswertung mit einer Gewichtungsfunktion berücksichtigt. Bereits nach wenigen Stunden wurde die im Mittel angestrebte Zielkraft erreicht.



Abbildung 2-9: links: hydraulischer Anspannvorgang mittels Hydraulikzylinder, Mitte: manuelles Nachspannen mittels Schraubenschlüsseln (der obere Schraubenschlüssel dient zum Kontern), rechts: Ablassen des Hydraulikzylinders (die Kraft bleibt in der Kette, da zuvor manuell nachgespannt wurde)

Bei sämtlichen, bis dato aufgezeichneten Versagen der Kettenglieder wurde ein Versagen der Schrauben auf Herausziehen (ohne Aufspalten des Prüfkörpers oder dgl.) beobachtet. Zudem wurde durch die Wahl einer vergleichsweise geringen Verankerungstiefe der Schraubengewinde auch sichergestellt, dass ein Stahlbruch der Holzbauschrauben als ausgeschlossen gilt. Um nach erfolgten Ausziehversagen auf einer Prüfkörperseite die zweite Seite ebenfalls bis zu ihrem Versagen weiter prüfen zu können, wurde eine Schraube mit Nenndurchmesser $d = 12$ mm appliziert und der Probekörper erneut eingespannt. Die Zeit bis zum Versagen für den Probekörper (sowie für all jene verbleibenden, intakten Schraubenverbindungen der Kette) errechnet sich aus der Summe der jeweiligen Zeiten über alle ertragenen Lastzyklen. Da die Kraft im Sekundentakt ermittelt wird, kann auch der Anspannvorgang exakt abgebildet werden.

Messtechnik

Um auf die Kraft in der Kette zu schließen, wurden Kraftmessstangen (KMS) eingesetzt. Wie man in Abbildung 2-10 erkennen kann, wurde ein Teil des Gewindes dieser Gewindestangen abgedreht. Zur Vorbereitung des Untergrundes der Klebefläche war es erforderlich, diesen Bereich möglichst homogen in kreisenden Bewegungen aufzurauen. Nach dem Vorschleifen mit einem Schleifpapier der Körnung 120 erfolgte der Feinschleifvorgang mit der Körnung 280. Im Anschluss war dieser Bereich mit Aceton zu reinigen und es wurden jeweils 2 T-Rosetten des Typs „1-XY71-3/120“ (insgesamt vier lineare Dehnmessstreifen) gegenüberliegend appliziert und zu einer Vollbrücke verschaltet. Durch diese Art der Schaltung in Kombination mit der gewählten Positionierung, ist diese Brücke in der Lage Dehnungen aus einer Biegebeanspruchung der Kraftmessstange und Temperatureinflüssen großteils zu kompensieren. Zum Applizieren der DMS wurde der Schnellklebstoff Z70 der Firma HBM verwendet. Es kamen sechsadrige Kabel zum Einsatz. Vier dieser Adern dienen der Speisung der DMS bzw. Messung des Widerstandes und zwei Fühleradern sind für die Korrektur der Kabellänge und der Temperatureinflüsse entlang des Kabels zuständig. Zum direkten Schutz der Dehnmessstreifen (DMS) gegenüber Feuchtigkeit wurde Nitrilgummi verwendet. Um die Lötstellen und die DMS vor mechanischen Beschädigungen zu schützen, wurden diese mit einer Abdeckmasse umwickelt und im Anschluss mit einem Schrumpfschlauch fixiert.

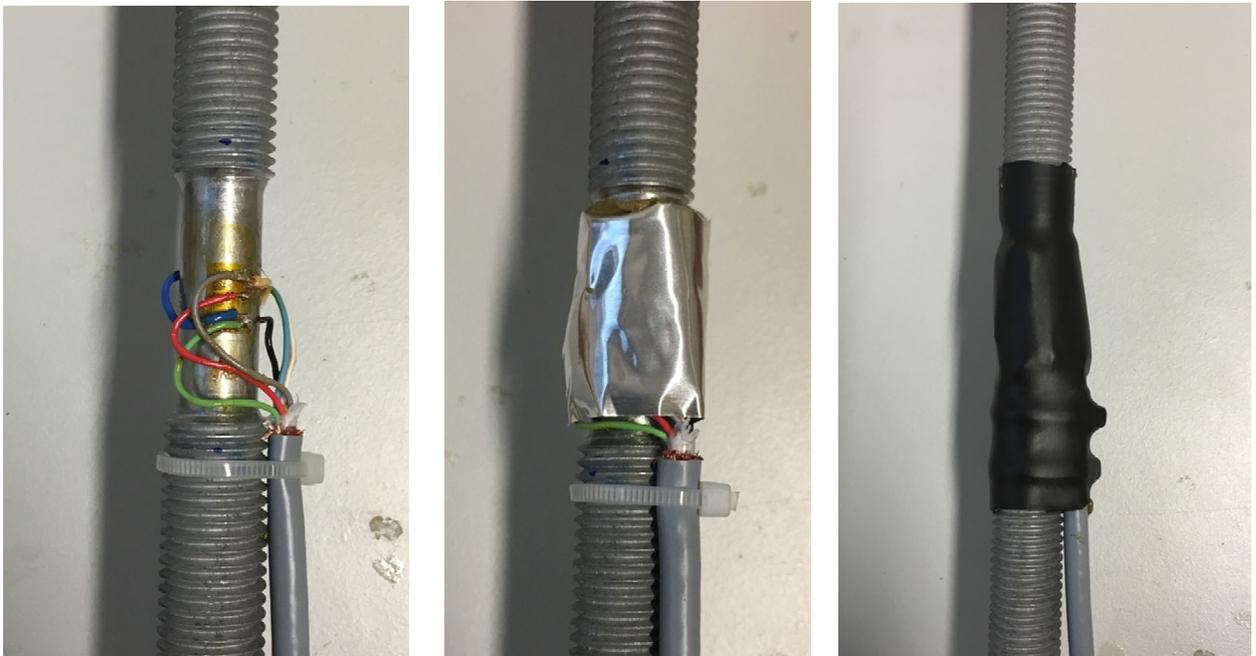


Abbildung 2-10: links: Anlöten der Kabeln am DMS, Mitte: Anbringen einer Abdeckmasse zum Schutz vor mechanischen Beschädigungen, rechts: Fixierung mittels Schrumpfschlauch

Die Kraftmessstangen wurden vor ihrem Einsatz im DoL-Prüfrahmen mit der Universalprüfmaschine lignum_uni_275 kalibriert (siehe Abbildung 2-13). Um das Gewinde nicht zu beschädigen, wurden Langmuttern an den Enden der Kraftmessstangen befestigt. Danach erfolgte die Einspannung dieser Langmuttern mittels hydraulischer Klemmsbacken. Im Anschluss wurde in der Universalprüfmaschine ein vorher definierter Lastzyklus durchfahren. Wie in Abbildung 2-11 ersichtlich wurde dreimal bei kontinuierlicher Laststeigerung bis auf eine Last von 30.000 [N] belastet und anschließend nach kurzer Haltezeit wieder entlastet. Dabei wurde der DMS an den Messverstärker „Quantum MX410“ angeschlossen und dessen Dehnung in der Einheit μStr ($1 \mu\text{Str} = 1 \mu\text{m}/\text{m} = 1 \text{ppm}$) gemessen. Durch die erhaltenen Messwerte konnte ein Zusammenhang zwischen der Widerstandsänderung im DMS und der aufgetragenen Kraft hergestellt werden.

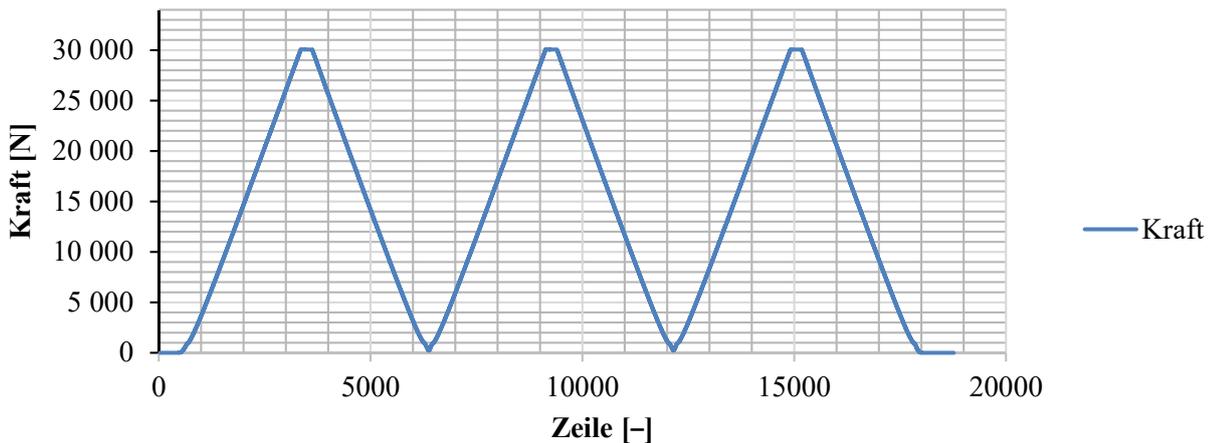


Abbildung 2-11: Lastzyklus zur Kalibrierung der Kraftmessstangen an der Universalprüfmaschine lignum_uni_275

Zur Bestimmung der Kennlinie der Kraftmessstangen wurde der letzte Be- und Entlastungsast herangezogen, wobei allgemein anzumerken ist, dass die Differenzen zwischen den einzelnen Zyklen als vernachlässigbar einzustufen waren. Das Bestimmtheitsmaß gibt dabei jenen Anteil an der Varianz der diskreten Messwertpaare an, welcher durch das zugrunde gelegte lineare Regressionsmodell erklärt werden kann. Bei allen Ketten stellte sich heraus, dass eine sehr gute Korrelation besteht und das Bestimmtheitsmaß den Wert von $R^2 = 1,0$ annimmt. Auf Basis dieses Vorgehens resultierte aus den somit ermittelten Regressionsmodellen für jede Messstange eine individuelle Kennlinie. In Abbildung 2-12 ist beispielhaft eine Kennlinie einer Kraftmessstange abgebildet. Die gemessene Dehnung in μStr sind auf der Abszisse aufgetragen und die Kraft auf der Ordinate. Die Steigung der linearen Regressionsgerade entspricht der Kennlinie des DMS. Der Offset (= Ordinatenabstand) kann dabei vernachlässigt werden, da stets relative Messungen bzw. alle Messungen vom Kraftniveau $F_N = 0 \text{ N}$ gestartet werden.

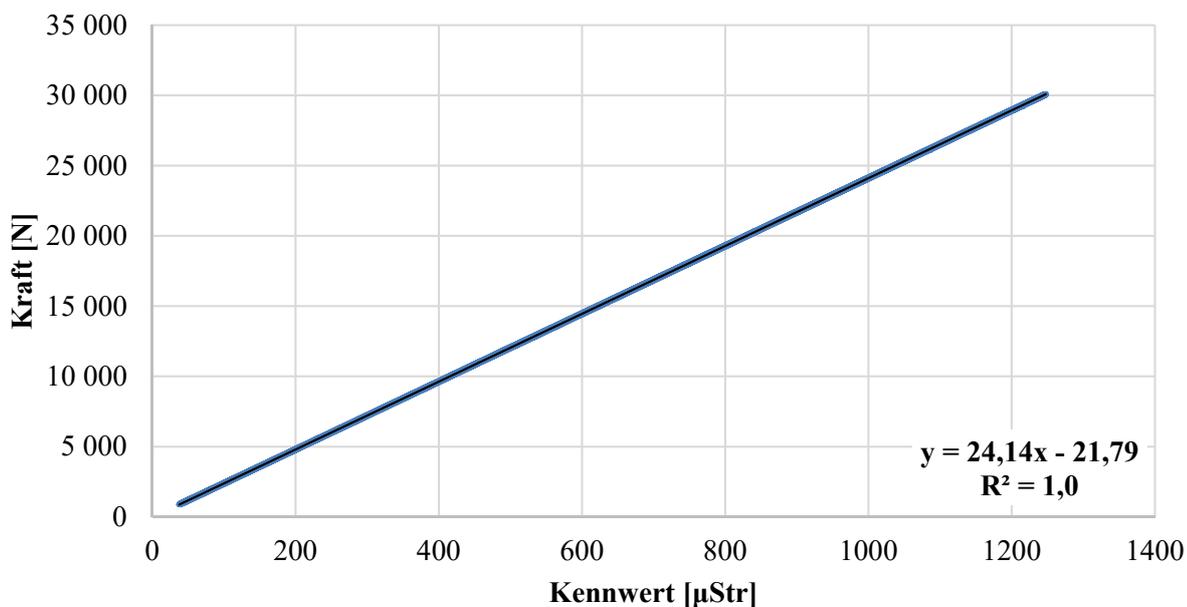


Abbildung 2-12: Beispiel einer Kennlinie einer Kraftmessstange in μStr

In der Klimakammer wurde aus Kostengründen ein anderer Messverstärker vom Typ MW100 der Firma Yokogawa eingesetzt. Dieser besteht aus 8 Messmodulen vom Typ MX112-B12-M04, wodurch ein

gleichzeitiger Anschluss von 32 Kraftmessstangen möglich ist. Da sich der Messverstärker außerhalb der Klimakammer befand, war es erforderlich, Verbindungskabeln mit einer Länge von 16 m zwischenschalten. Bei dem Messverstärker der Firma Yokogawa besteht jedoch nicht die Möglichkeit eine Vollbrücke mittels 6-Leiter Technik anzuschließen, dadurch sind eine automatische Korrektur der Kabellänge und Temperatureinflüsse durch den Messverstärker entlang des Kabels nicht möglich. Somit war es notwendig die Kennlinien der Kraftmessstangen in-situ erneut zu kalibrieren. Dazu wurde ein "Prüfgewicht" mit einer Gewichtskraft von exakt 10.074 N an jede KMS einzeln aufgebracht und die gemessene Kraft damit verglichen, sowie in Folge die Kennlinie im Messverstärker entsprechend adaptiert um dem tatsächlichen Gewicht zu entsprechen.

Bei der Nachkalibrierung von später gefertigten Kraftmessstangen am 29.08.2017 (ca. 3 Monate nach dem Versuchsbeginn der ersten Ketten) wurde festgestellt, dass mit dieser Kalibrieremethode, vermutlich aufgrund von geringen Momentenbeanspruchungen in den Stangen, welche durch die DMS nicht komplett kompensiert werden konnten, keine exakt reproduzierbaren Ergebnisse lieferte. Daraufhin wurden alle KMS erneut kalibriert. Dabei wurde anstelle der Prüfkörperkette eine Gewindestange eingehängt und jede Kraftmessstange mithilfe eines Hydraulikzylinders auf rund 18.000 N belastet. In den Koppelstangen wurde die Anspannkraft gemessen (Quantum Messverstärker) und mit dem Messwert des Yokogawa Messverstärkers verglichen und korrigiert. Mit dieser Methode konnten stabile, reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden.

In der endgültigen Konfiguration betrug die Kabellänge zwischen dem Messverstärker Yokogawa und dem Dehnmessstreifen rund 19 m. Es stellte sich heraus, dass der Einfluss der Kabellänge eine Korrektur der Kennlinie von ca. 3,8 % bedingt. Sämtliche Messwerte die vor dem 29.08.17 gewonnen wurden, sind entsprechend adaptiert worden. Aus der Tabelle 2-3 sind die Werte der Kalibrierung sämtlicher Stangen zu entnehmen:

Tabelle 2-3: Kennlinien der Kraftmessstangen

	Kalibrierung mit Universalprüfmaschine ¹⁾ [N/μStr]	Nachkalibrierung mit Prüfgewicht ²⁾ [N/μStr]	Nachkalibrierung im Prüfrahmen ³⁾ [N/μStr]	Differenzfaktor ⁴⁾ [-]
K01	24,254	24,264	24,893	1,026
K02	24,301	25,823	25,177	1,036
K03	24,169	25,179	25,061	1,037
K04	24,076	24,820	24,842	1,032
K05	24,086	24,854	25,016	1,039
K06	24,283	25,988	25,204	1,038
K07	23,998	24,466	24,991	1,041
K08	24,412	24,360	25,228	1,033
K09	24,306	24,859	25,185	1,036
K10	24,173	25,323	25,017	1,035
K11	24,002	25,010	25,002	1,042
K12	24,118	25,351	24,995	1,036
K13	24,318	24,318	25,331	1,042
K14	24,151	24,151	25,084	1,039
K15	24,031	24,031	24,936	1,038
K16	23,900	23,900	24,759	1,036
K17	24,132	24,132	25,028	1,037
K18	24,113	24,113	25,088	1,040
K19	24,003	24,003	24,849	1,035
K20	24,217	24,217	25,121	1,037
K21	24,291	24,291	25,238	1,039
K22	23,998	23,998	24,878	1,037
K23	defekt	defekt	defekt	defekt
K24	24,090	24,090	25,051	1,040
K25	24,138	25,398	25,108	1,040
K26	24,173	25,196	25,303	1,047
K27	24,090	25,458	25,150	1,044
K28	24,320	26,269	25,282	1,040

Anmerkungen:

- ¹⁾... Kennlinie für Quantum Messverstärker (Kabellänge wird durch Messverstärker korrigiert)
- ²⁾... Kennlinie für Yokogawa Messverstärker; Basis: Belastung mit Prüfgewicht (Kabellängenkorrektur in Kennlinie enthalten)
- ³⁾... Kennlinie für Yokogawa Messverstärker; Basis: Belastung der KMS im Prüfrahmen und Messung der auftretenden Kraft über Quantum Messverstärker (Kabellängenkorrektur in Kennlinie enthalten; Durchführungsdatum 29.08.2017)
- ⁴⁾... Differenzfaktor zwischen Quantum- und Yokogawa-Kennlinie

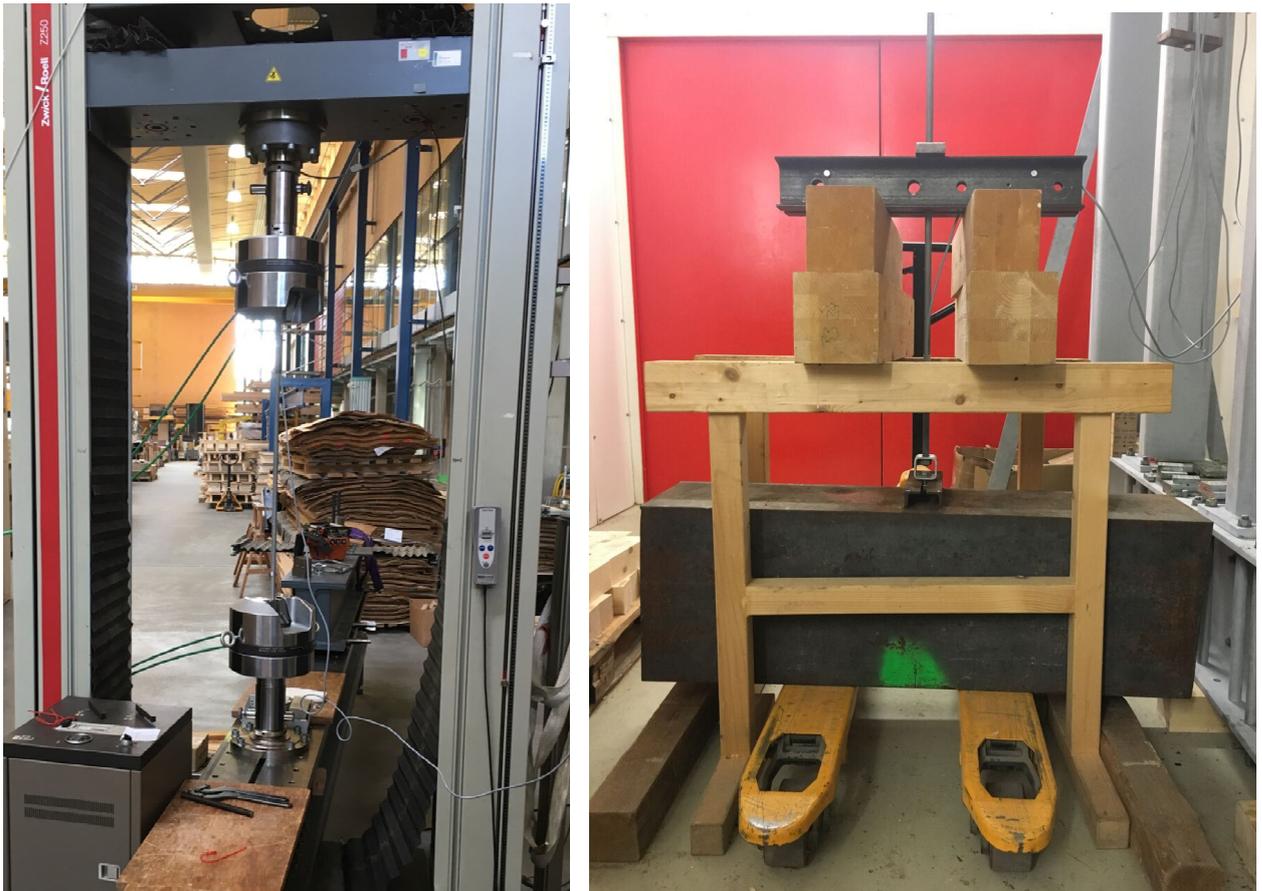


Abbildung 2-13: links: Kalibrierung der Kraftmessstangen an der Universalprüfmaschine lignum_uni_275; rechts: Nachkalibrierung mittels Prüfgewicht

In Tabelle 2-4 sind die verwendeten Kennlinien des Yokogawa Messverstärkers inkl. der Kabellängenkorrektur über den gesamten Versuchszeitraum zusammengefasst.

Tabelle 2-4: verwendete Kennlinien (Einstellungen Yokogawa) während des Langzeitversuches

	bis zum 29.08.17 ¹⁾ [N/μStr]	ab dem 29.08.17 ¹⁾ [N/μStr]	Korrekturfaktor ²⁾ [-]
K01	24,264	24,893	1,026
K02	25,823	25,177	0,975
K03	25,179	25,061	0,995
K04	24,820	24,842	1,001
K05	24,854	25,016	1,007
K06	25,988	25,204	0,970
K07	24,466	24,991	1,021
K08	24,360	25,228	1,036
K09	26,111	25,185	0,965
K10	25,323	25,017	0,988
K11	25,010	25,002	1,000
K12	25,351	24,995	0,986
K13	24,318 ¹⁾	25,331	1,042
K14	24,151 ¹⁾	25,084	1,039
K15	24,031 ¹⁾	24,936	1,038
K16	23,900 ¹⁾	24,759	1,036
K17	24,132 ¹⁾	25,028	1,037
K18	24,113 ¹⁾	25,088	1,040
K19	24,003 ¹⁾	24,849	1,035
K20	24,217 ¹⁾	25,121	1,037
K21	25,325 ¹⁾	25,238	1,039
K22	23,998 ¹⁾	24,878	1,037
K23	defekt	defekt	0,000
K24	24,090 ¹⁾	25,051	1,040
K25	25,398	25,108	0,989
K26	25,196	25,303	1,004
K27	25,458	25,150	0,988
K28	26,269	25,282	0,962

Anmerkungen:

¹⁾... Kennlinie ohne Kabellängenkorrektur
(wurde später im Messverstärker adaptiert)

²⁾... Korrekturfaktor, ermittelt über $F_{\text{tat}} = F_{\text{vor 29.08.17}}$

Aufbereitung der Messdaten

In diesem Abschnitt wird die Aufbereitung der gewonnenen DoL-Messdaten beschrieben. Wie bereits erwähnt wurden die Kräfte in den Ketten im Sekundentakt gemessen, um den Belastungs- und Entlastungsvorgang der Prüfkörper detailliert erfassen zu können. Demzufolge würden sich in einem Jahr rund 31 Millionen Datenpunkte pro Kette ergeben. Da die Verarbeitung solcher Datenmengen als herausfordernd anzusehen ist, war es notwendig, die Daten entsprechend aufzubereiten. Vor allem in Abschnitten mit annähernd konstanter Last können die Rohdatensätze stark reduziert werden und eine Messfrequenz von deutlich unter einem Hz als ausreichend angesehen werden, um den Kraftverlauf in den Prüfkörpern adäquat zu beschreiben. Zeiträume in denen die Ketten unbelastet blieben oder eine Nachkalibrierung der Kraftmessstangen erfolgte, wurden als definierte Zeiträume („Exclusion times“) aus den Rohdaten herausgeschnitten. Da es aufgrund von Störeinflüssen zu einem Drift im Messsignal gekommen war, mussten die Messdaten durch lineares Aufaddieren über den Beobachtungszeitraum des Drifts (Zeitraum zwischen Kontrollen siehe Abschnitt Prüfmethode) korrigiert werden. Die Nachkalibrierung der KMS im Prüfraumen mit dem Messverstärker Quantum erfolgte am 29.08.2017. Alle zuvor gemessenen Werte mussten daher zudem mittels eines Korrekturfaktors lt. Tabelle 2-4 multipliziert werden.

Sämtliche angeführten Modifikationen der Rohdaten wurden in Wolfram Mathematica 11 durchgeführt. Der Ablauf der Datenaufbereitung wird folgend kurz erläutert:

- Konvertieren der Yokogawa Messfiles in ein ASCII-File:
Die programminternen Files des Datenloggers mussten in ein Textfile umgewandelt werden. Da beispielsweise beim Nullsetzen einer Kette die Messung gestoppt werden musste, ergaben sich mehrere Messfiles (je ein Messfile pro Messabschnitt), welche mit der Softwareapplikation MW100 Viewer nicht zusammengefügt werden konnten. Um die Messdaten in weiterer Folge verarbeiten zu können, wurden diese vom vorliegenden proprietären Dateiformat in ASCII-Dateien konvertiert.
- Zusammenfügen der einzelnen Messfiles:
Im nächsten Schritt wurden die ASCII-Dateien in Binary-Files konvertiert. Dies ermöglichte einerseits eine Reduktion der Datengröße und andererseits ein schnelleres Einlesen der Daten in Mathematica. In weiterer Folge wurden die Daten der einzelnen Messfiles zu einem einzigen Binary-File (über gesamte Versuchsdauer) je Kette zusammengefügt.
- Vorfilter der Daten:
Beim Vorfilter wurde grundsätzlich nur jeder 60te Wert (alle 60 s) betrachtet, mit der Ausnahme, dass im Fall eines Kraftunterschiedes zweier aufeinanderfolgender Werte ($\Delta t = 60$ s) von mehr als 20 N alle Werte in diesem Bereich abgespeichert wurden. Das Messintervall veränderte sich daher je nach Kraftverlauf zwischen einer Sekunde und einer Minute. In Abbildung 2-14 ist die Anwendung des Vorfilters graphisch dargestellt.

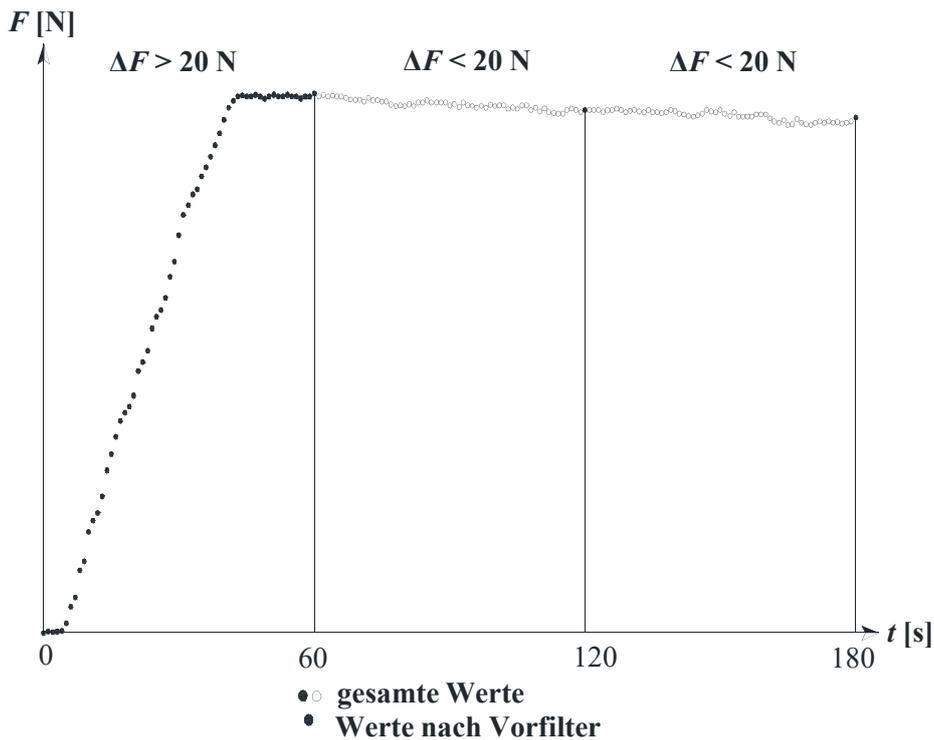


Abbildung 2-14: Anwendung des Vorfilters auf die Messdaten

- Herausschneiden von unbelasteten Zeiten:
Wie bereits eingangs erwähnt, kamen nun die „Exclusion times“ zur Anwendung. Dabei wurden die Daten während definierten Zeiten herausgeschnitten.
- Kraftkorrektur:
Wurde beim Ablassen der Kraft in den Ketten festgestellt, dass kein vollständiger Rückgang des Messsignals auf null erfolgte, musste die Kraft manuell wieder auf null gestellt werden. Die Differenz zu null wurde linear über den jeweiligen Beobachtungszeitraum (seit letztem „Null-Stellen“) aufgeteilt. In Abbildung 2-15 ist die Vorgehensweise der Kraftkorrektur graphisch dargestellt.

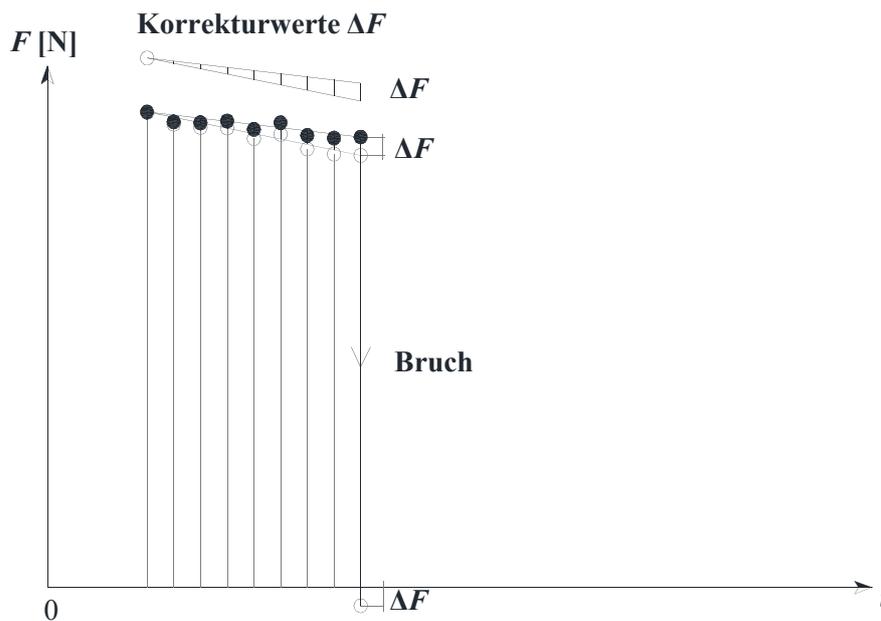


Abbildung 2-15: Anwendung der Kraftkorrektur auf die Messdaten

Im nächsten Schritt wurde die Korrektur der Kennlinien (siehe Abschnitt Messtechnik) durchgeführt. Dabei wurden alle Werte vor 29.08.2017 mit den entsprechenden Korrekturfaktoren gemäß Tabelle 2-4 multipliziert.

- **Dynamisches Filtern der Daten:**
Da das Messintervall somit nun zwischen einer Sekunde und einer Minute schwankte und bei einer konstanten Belastung selbst das Intervall von einer Minute sehr fein ist, wurden die Daten erneut gefiltert. Dies wurde derart bewerkstelligt, sodass der Kraftunterschied einzelner Werte mehr als 10 N betrug. Ausgehend von einem Referenzwert (zu Beginn der erste Messwert) wurde der Kraftverlauf über die Zeit beobachtet. Sobald sich der Messwert um mehr als 10 N von der Referenz unterschied, wurde dieser abgespeichert, als neuer Referenzwert festgelegt und der beschriebene Ablauf erneut gestartet. Dabei konnten sowohl der Anspannvorgang als auch der Zeitpunkt des Bruches in der Regel mit einem Messintervall von einer Sekunde abgebildet und Messwerte innerhalb quasi konstanter Kraftbereiche noch stärker reduziert werden. In Abbildung 2-16 wird die Methodik des dynamischen Filters gezeigt.

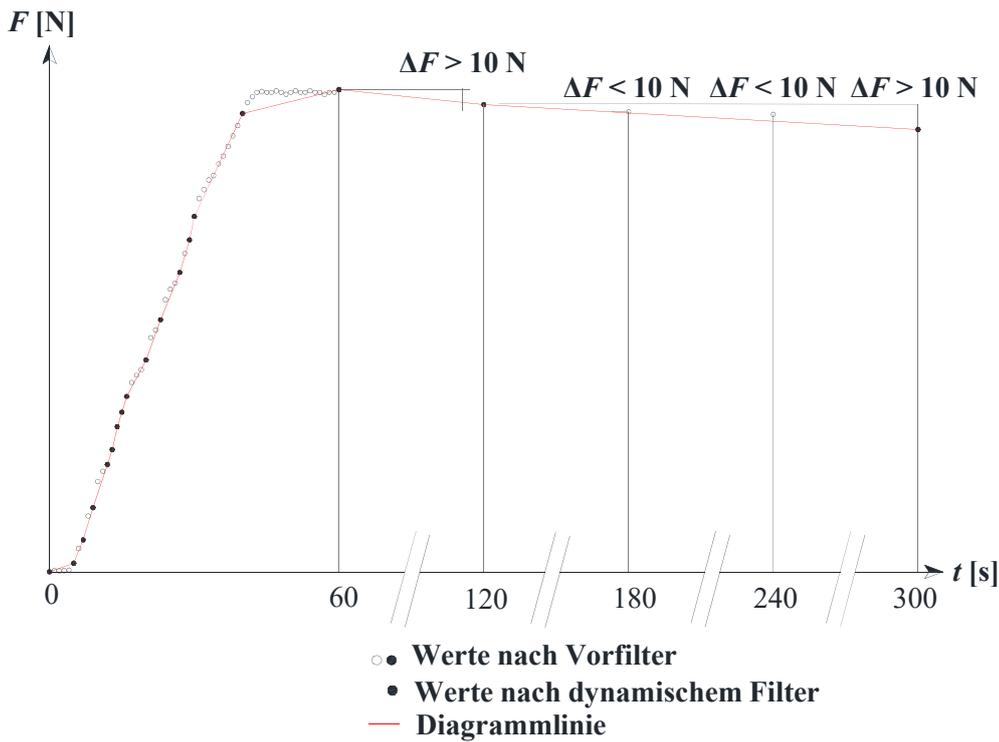


Abbildung 2-16: Anwendung des dynamischen Filters auf die Messdaten

- Exportieren der Daten in ein XLS-File pro Kette
Zum Abschluss dieser Prozedur der Datenaufbereitung liegen die Messdaten mit ausreichender Genauigkeit und gut handhabbarer Anzahl vor. Abschließend erfolgt das Exportieren der Daten pro Kette in ein XLS-File. Dieses dient nun als Basis für die weiteren DoL Auswerteschritte, wie z.B. die schädigungsäquivalente Bewertung der Ergebnisse.

Auswertung der Langzeitversuche

Da in der Literatur bis dato fast ausschließlich Versuche mit Totmassen durchgeführt wurden bei welchen es zu einem rein kraftgesteuerten Versuchsaufbau kommt, musste für diesen Versuchsaufbau und der immanenten geringen Reduktion der Prüflasten über die Zeit eine Gewichtungsfunktion eingeführt werden. Da das DoL-Verhalten sehr sensibel auf eine Änderung des Lastniveaus reagiert, wurde hierfür eine schädigungsäquivalente Herangehensweise gewählt. Es wurden mehrere Funktionen zur Gewichtung herangezogen. Als erste Annäherung wurde die Madison Funktion dafür als Basis verwendet. Dabei wurde der jeweilige Zeitschritt mit einem Faktor multipliziert und die Summe aller gewichteten Zeitschritte im Anschluss gebildet.

$$f_{\text{Wichtung}} = \frac{t_{\text{ref}}}{t} = \frac{\left(\frac{108,4}{SL_{\text{ref}} - 18,3} \right)^{\frac{1}{0,04635}}}{\left(\frac{108,4}{SL - 18,3} \right)^{\frac{1}{0,04635}}} \quad (2.4)$$

mit:

SL Lastniveau (Verhältnis zwischen der Spannung und der Referenzspannung) [%]

SL_{ref} Referenzlastniveau [%]

f_{Wichtung} ...Gewichtungsfaktor [-]

Mit Gl. (2.4) ist es auch möglich, Entlastungs- und Wiederbelastungsvorgänge schädigungsäquivalent zu berücksichtigen. Die Abbildung 2-17 bildet Gleichung (2.4) grafisch ab und stellt einen Bereich von $\pm 5\%$ der verwendeten drei Laststufen dar. Man kann erkennen, dass bereits eine geringe Abweichung des geplanten Lastniveaus zu einem hohen Gewichtungsfaktor führt. Zudem wurden die Ketten bei Unterschreitung der Zielkraft um rd. 100 N nachgespannt. Um ein Driften des Messsignals durch akkumulierte Störeinflüsse zu begrenzen, werden ferner alle drei Monate alle Ketten entlastet, das Kraftsignal im Bedarfsfall auf null gesetzt und die Ketten wiederum auf die Zielkraft belastet. Die dabei trotzdem auftretenden geringen Abweichungen im Messsignal wurden in der Auswertung der Messdaten mit dem zuvor dargelegten Gewichtungsfaktor gegenkorrigiert.

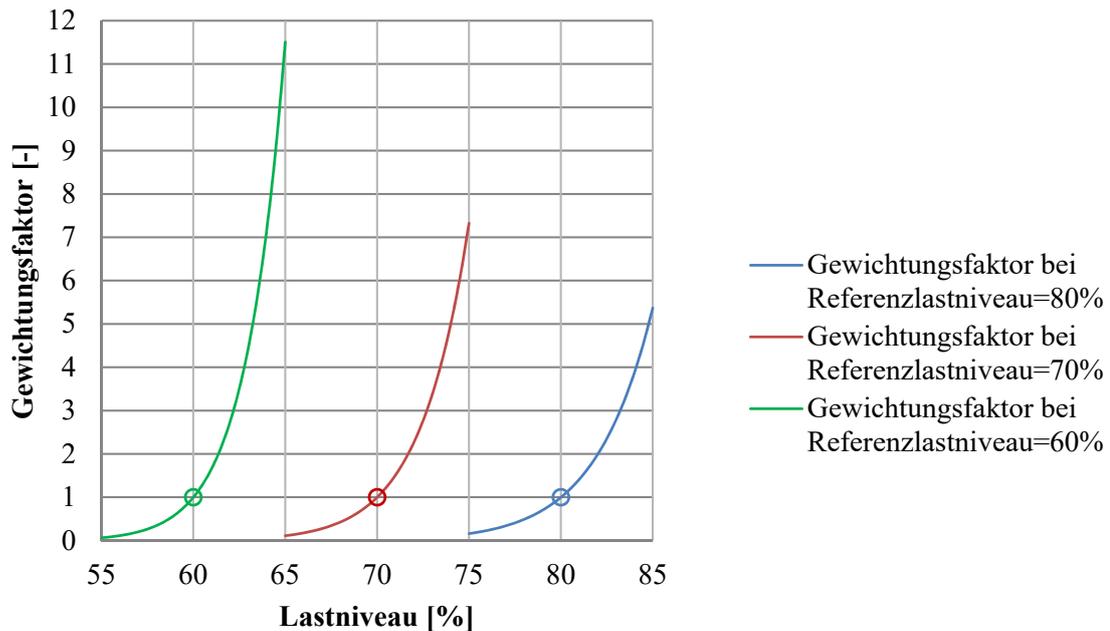


Abbildung 2-17: Gewichtungsfunktionen bei unterschiedlichen Lastniveaus

Es ergab sich daher für jeden Probekörper eine gewichtete Zeit bis zum Bruch. Innerhalb der einzelnen Ketten wurde im Anschluss die Probekörper nach der gewichteten Versagenszeit aufsteigend gereiht. Es ergab sich, in Abhängigkeit der bereits beobachteten Versagensfälle, ein individueller Rang für jeden einzelnen Probekörper. Nach der bereits beschriebenen Methodik der „equal rank assumption“ (siehe Kapitel 1-2.4) wurde jedem Probekörper, in Abhängigkeit seines Ranges, eine Kurzzeitfestigkeit zugeordnet. Probekörper, die sehr kurze gewichtete Zeiten bis zum Bruch hatten, wurde deshalb auch eine niedrigere Kurzzeitfestigkeit zugewiesen. Daraus ergibt sich für jeden Probekörper ein individuelles Lastniveau SL , welches von der Ursprungsdefinition eines auf den Mittelwert basierenden, für sämtliche Probekörper einer Serie konstanten Lastniveaus abwich. Unter der Voraussetzung, dass es keine relevanten Einflüsse seitens der geringen Unterschiede in Rohdichte und Holzfeuchte zwischen den Proben einer Holzart gibt und auch die Einbindelänge keinen relevanten Einfluss auf das Langzeitverhalten bewirkt, wurden mit der Methode der Summe der kleinsten Fehlerquadrate („least square method“; LSM) für alle sechs verbleibenden Gruppen (drei Holzarten bzw. Holzprodukte und zwei Schraubentypen) die Parameter A und B für die Regressionsgleichung nach Pearson (1972) durch Kalibrierung an die Versuchsdaten bestimmt. Mit diesen Regressionsgleichungen wurden erneut die gewichteten Zeiten bis zum Bruch berechnet und in Folge iterativ die Parameterwerte an die Versuchsdaten bestmöglich adaptiert. Folgende, abgeänderte Gewichtungsfunktion kam somit zur weiteren Anwendung:

$$f_{\text{Wichtung}} = \frac{t_{\text{ref}}}{t} = \frac{10^{\frac{A-SL_{\text{ref}}}{B}}}{10^{\frac{A-SL}{B}}} \quad (2.5)$$

mit:

- SL Lastniveau (Verhältnis zwischen der Spannung und der Referenzspannung) [%]
- SL_{ref} Referenzlastniveau [%]
- $f_{Wichtung}$...Gewichtungsfaktor [-]

Da die Versuche im Zuge dieser Arbeit nicht bei allen Ketten bis zum Ende verfolgt werden können, sich jedoch der Rang bei diesen noch nicht abgeschlossenen Ketten durch z.B. das Nachrüsten von Probekörpern, verändern kann, sind für die betroffenen Auswertungen gegebenen Lastniveaus SL als vorläufige Ergebnisse anzusehen. Diese vorläufigen Ergebnisse werden jedoch nicht zur Bestimmung der Regressionsparameter herangezogen. Erst wenn der Rang innerhalb der Kette fixiert ist (wenn z.B. die Kette bei maximal 14 Versagensfällen abgeschlossen ist, oder wenn nur noch einzelne Versagensfälle ausständig sind) gehen die Versuchsdaten vollumfänglich in die Berechnung ein.

2-2.3 ERGÄNZENDE UNTERSUCHUNGEN ZU DOL

Bei den ergänzenden Untersuchungen handelte es sich um sogenannte „ramp-loading“ Tests. Die Bezeichnung dieser ergänzenden Untersuchung ist möglicherweise etwas irreführend, da sich die Dauer dieser Versuche auf eine Referenzzeit von rund 100 s bezieht. Ergänzend sei hier noch einmal angeführt, dass diese Untersuchungen mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit durchgeführt worden sind. Dabei wurde die Belastungsgeschwindigkeit derart verändert, dass ein Versagen im Mittel zwischen $t_{s,mean} = 0,28$ s bei den „Ultrakurzzeitversuchen“ und $t_{s,mean} = 17,25$ h bei den „Ultralangzeitversuchen“ eintrat. Primär sollte herausgefunden werden, ob sich ein abfallender Trend mit sinkender Belastungsgeschwindigkeit einstellt. Ringhofer (2017) führte im Zuge seiner Arbeit auch Belastungstests mit unterschiedlicher Belastungsgeschwindigkeit durch. Er untersuchte dabei einen Bereich von $t_s = 0,5$ s bis $t_s = 300$ s und konnte zeigen, dass bei seinen „Ultrakurzzeituntersuchungen“ eine höhere Ausziehfestigkeit f_{ax} im Vergleich zu den Referenzversuchen auftrat.

Zusätzlich wurden noch Referenzversuche ($t_{s,mean} = 100$ s) und Langzeitversuche ($t_{s,mean} = 53$ min) durchgeführt. Alle Versuche wurden mit der Universalprüfmaschine lignum_uni_275 mit unterschiedlichen Messfrequenzen bewerkstelligt. Dabei wurde für die „Ultrakurzzeitversuche“ eine Messfrequenz von 2500 Hz und für die Ultralangzeitversuche eine Messfrequenz von einem Hertz gewählt. Bei den Referenz- und Langzeitversuchen kam eine Messfrequenz von fünf Hertz zum Einsatz. Bei den Ultrakurzzeitversuchen ($t_{s,mean} = 0,28$ s) wurde die maximale Vorschubgeschwindigkeit der Universalprüfmaschine von 500 mm/min gewählt, vgl. Tabelle 2-5.

Tabelle 2-5: Überblick wesentlicher Parameter der ergänzenden Untersuchungen zu DoL

Serie	mittlere Zeit bis zum Versagen $t_{s,mean}$	Messfrequenz [Hz]	Prüfgeschwindigkeit [mm/min]
Ultrakurzzeitversuche (UKZ)	0,28 s	2500	500
Referenzversuche (REF)	100 s	5	1,1
Langzeitversuche (LZ)	53 min	5	0,031
Ultralangzeitversuche (ULZ)	17,25 h	1	0,0016

Die Prüfkfiguration wurde in Anlehnung an die Referenzversuche gewählt. Entsprechend kam wieder eine „pull-pull“ Konfiguration zur Anwendung. Alle „ramp-loading“ Untersuchungen wurden an Buchenprobekörpern mit $l_{emb}=0$ d durchgeführt. Um mögliche Fehlereinflüsse, im Sinne der Methodik der Rechtszensierung zu vermeiden und um ein vordefiniertes Versagen herbeizuführen, wurde auf einer Seite eine Schraube mit dem Nenndurchmesser $d = 8$ mm und auf der anderen Seite eine Schraube mit dem Nenndurchmesser $d = 12$ mm appliziert. Dadurch konnte bei jeder Prüfung durch Anbringen der induktiven Wegaufnehmer an der Schraube mit dem Nenndurchmesser $d = 8$ mm, für welche mit

hinreichender Wahrscheinlichkeit das Versagen zu erwarten war, das Kraft-Verformungsverhalten bis zum Bruch einschließlich Nachbruchverhalten abgebildet werden. Dieses Verhalten war insofern von hoher Relevanz, weil es dadurch möglich war, das Modell zur Repräsentanz des Kraft-Verformungsverhaltens von axial-beanspruchten Schrauben beim Herausziehen gemäß Brandner (2017) auf alle untersuchten Probekörper anzuwenden. Dieses Modell beinhaltet fünf Parameter, wobei vier physikalisch begründet und nur ein Parameter zur Anpassung der Funktion an die Krümmung im Bereich der Maximallast dient. Dieses Modell wurde in Folge an jeden Probekörper angepasst, wobei insbesondere jener Punkt von Relevanz erschien, welcher den Übergang vom linear-elastischen Bereich in den plastischen Bereich charakterisiert. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass dieser Übergang einen Hinweis auf die Dauerstandfestigkeit gibt. Dabei wurde der Quotient zwischen dem Kraftwert beim Übergang in den nichtlinearen Bereich und der ermittelten Maximalkraft gebildet. Dieses Lastniveau wurde als $\eta_{F,lin}$ bezeichnet und das Produkt aus $\eta_{F,lin}$ und F_{max} beschreibt laut der Hypothese die Dauerstandfestigkeit. Der Hintergrund für diese Hypothese ist die Vermutung, dass das nicht-lineare, plastische Verhalten aus einer sukzessiven Schädigungsakkumulation resultiert, was in Folge zu einem DoL Versagen führt. Hingegen gilt der Bereich des linear-elastisches Verhaltens als (weitgehend) schädigungsfrei, zumindest in dem Maße, dass bei gegebenem Lastniveau und Belastungsdauer es zu keiner weiteren Akkumulation von Mikro- und Makroschädigungen kam.

Im Gegensatz zu den Referenzversuchen und den Dauerstandversuchen in der vorliegenden Arbeit wurde bei diesen ergänzenden DoL Versuchen eine Korrektur der Ausziehfestigkeit um den Rohdichteinfluss vorgenommen, da diese Versuche unabhängig durchgeführt worden sind. Dabei kamen die Potenzfaktoren zur Rohdichtekorrektur, welche von Reichinger (2017) ermittelt wurden, zur Anwendung. Da diese erhobenen Potenzfaktoren mit Unsicherheiten behaftet sind, wurde aus diesem Grund von einer Rohdichtekorrektur bei der Hauptserie bestehend aus Referenz- und Dauerstandversuchen abgesehen, um die Prüfergebnisse weitgehend unbeeinflusst zu erhalten.

2-2.4 AUSWERTEMETHODIK

2-2.4.1 Bestimmung von Kenngrößen

Im folgenden Kapitel wird die Methodik zur Bestimmung wichtiger mechanischer Kenngrößen erläutert.

Rohdichte

Im Anschluss der Prüfungen wurde die Rohdichte und Holzfeuchte bestimmt. Diese beiden Parameter wurden nur von der Seite bestimmt, die im Versuch auch tatsächlich versagt hat. Zur Bestimmung dieser beiden Parameter wurde der Teil vom Probekörper hergenommen, in dem das Gewinde eingebunden war. Mit einer konstanten Eindrehlänge von 60 mm und einer Einbindelänge von 0, 16 und 32 mm ergaben sich Abschnitte von 60, 76 und 92 mm. Von diesen Abschnitten wurden zur Bestimmung der Rohdichte sechs Maße mit einem elektronischen Messschieber auf 1/100 Millimeter genau genommen und anschließend das Volumen berechnet. Die Masse dieser Probekörper wurde mit einer Standwaage auf 1/100 Gramm genau bestimmt.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{b \cdot h \cdot l} \quad (2.6)$$

mit:

- ρ Rohdichte
- m Masse des Probekörpers
- V Volumen des Probekörpers
- b Probekörperbreite
- h Probekörperhöhe
- l Zuschnittlänge (60, 76, 92 mm)

Zur Bestimmung der Holzfeuchte wurde die Darmmethode in Anlehnung an die ÖNORM EN 13183 (2004-02) für die Probekörper herangezogen. Der gewogene Prüfkörper wurde dafür bei einer Temperatur von $(103 \pm 2^\circ\text{C})$ getrocknet. Der Prüfkörper wird als darrtrocken bezeichnet, wenn der Masseunterschied zwischen zwei Wägevorgängen im Abstand von zwei Stunden geringer als 0,1 % ist.

$$u = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 [\%] \quad (2.7)$$

mit:

- 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

Trotz langer Lagerung in einer Klimakammer des Instituts für Holzbau und Holztechnologie stellten sich unterschiedliche Ausgleichsfeuchten der Holzarten ein. Um einen Vergleich der Holzarten durchführen zu können, wurden die ermittelten Rohdichten auf eine Referenzholzfeuchte von $u = 12 \%$ korrigiert. Diese Rohdichtekorrektur erfolgte gemäß ÖNORM EN 384 (2016) mittels Gl. (2.8):

$$\rho = \rho_u \cdot (1 - 0,005 \cdot (u - u_{\text{ref}})) \quad (2.8)$$

mit:

- ρ Rohdichte
- u Holzfeuchte bei der Prüfung ($8 \% \leq u \leq 18 \%$)
- u_{ref} die Bezugsholzfeuchte, üblicherweise $u_{\text{ref}} = 12 \%$

Ausziehfestigkeit

Hier ist zu erwähnen, dass es in der Literatur abweichend zur Ausziehfestigkeit f_{ax} einen weiteren Kennwert gibt, welcher zur Bestimmung der Tragfähigkeit axial beanspruchter Holzbauschrauben verwendet wird. Dieser sogenannte Ausziehparameter f_1 [N/mm^2], welcher teilweise auch als f_{ax} bezeichnet wird, bezieht sich erstens auf eine andere Fläche und zweitens wird dieser auch anders berechnet. Für die vorliegende Arbeit kommt allerdings die Ausziehfestigkeit f_{ax} [N/mm^2] zur Anwendung, welche sich auf die Mantelfläche der effektiven Gewindelänge bezieht und nach Gl. (2.9) berechnet wird:

$$f_{\text{ax}} = \frac{F_{\text{max}}}{d \cdot \pi \cdot l_{\text{ef}}} \quad (2.9)$$

mit:

- f_{ax} Ausziehfestigkeit [N/mm^2]
- F_{max} maximale Ausziehungskraft [N]
- d Nenndurchmesser der Schraube [mm]
- l_{ef} effektiv wirksame Gewindelänge abzüglich der Schraubenspitze [mm]

axiale Verbundsteifigkeit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die axiale Verbundsteifigkeit $K_{\text{ser,ax}}$ (kurz K_{ser}) mithilfe eines linearen Regressionsmodelles der Kraft-Verformungsbeziehung im linear-elastischen Bereich, wie bereits von Brandner et al. (2017) vorgeschlagen, ermittelt. Dieser Bereich muss dabei für jeden Probekörper individuell festgelegt werden und wird daher abweichend von der ÖNORM EN 26891 (1991) nicht exakt

für die Grenzen 10 % und 40 % von F_{\max} angewendet. Die Berechnung von K_{ser} erfolgt über eine Regressionsanalyse, mit der Bedingung, dass die Korrelation einen Wert von $> 0,990$ ergibt.

$$K_{\text{ser}} = \frac{\Delta F}{\Delta w_{\text{netto}}} \quad (2.10)$$

mit:

ΔF Differenzkraft zweier Zeitschritte [N]

Δw_{netto} ... Differenzweg zweier Zeitschritte [mm]

und

$$w_{\text{netto},i} = \frac{\delta_{1,i} - \delta_{2,i}}{2} - w_i(l_{\text{sk}}) = \frac{\delta_{1,i} - \delta_{2,i}}{2} - \frac{\sigma_{\text{ax},i}}{E_s} \cdot l_{\text{sk}} \quad (2.11)$$

$$\sigma_{\text{ax},i} = \frac{F_i}{\frac{d_i^2 \cdot \pi}{4}} \quad (2.12)$$

mit:

$w_{\text{netto},i}$ Nettoweg zum Zeitschritt i [mm]

$\delta_{1,i}, \delta_{2,i}$... gemessener Weg der induktiven Wegaufnehmer zum Zeitschritt i [mm]

$w_i(l_{\text{sk}})$. Stahldehnung der freien Schaftlänge zum Zeitschritt i [mm]

$\sigma_{\text{ax},i}$ Spannung in der Schraube zum Zeitschritt i [N/mm²]

E_s Elastizitätsmodul der Schraube [N/mm²]

l_{sk} freie Schaftlänge (Holzoberfläche bis zur Achse der Messvorrichtung inklusive l_{emb}
(Schraubenkompensationslänge) [mm]

d_i Kerndurchmesser der Schraube [mm]

2-2.4.2 Statistische Auswertemethodik

Zur statistischen Charakterisierung der Variablen Ausziehfestigkeit, Verschiebemodul, Rohdichte und max. Ausziehkraft wurde die Lognormalverteilung (LND) als theoretisches Verteilungsmodell gewählt. In Brandner (2013) ist angeführt, dass eine Variable X lognormalverteilt ($X \sim \text{LND}$) ist, wenn der Logarithmus dieser Variable $Y = \ln(X)$ normalverteilt ist ($Y \sim \text{ND}$).

$$X \sim \text{LND falls } Y = \ln(X) \sim \text{ND} \quad (2.13)$$

Für die Berechnung des Konfidenzinterfalls für den Mittelwert, als Schätzer für den Erwartungswert, muss für lognormalverteilte Daten im Vergleich zu normalverteilten Daten, eine modifizierte Vorgangsweise gewählt werden. Beim Konfidenzintervall, welches im Rahmen der vorliegenden Arbeit weiterhin zur Anwendung kommt, wird davon ausgegangen, dass die Varianz unbekannt ist. Daraus folgt für die Verteilung des Mittelwertes von Y eine Student t-Verteilung. Im ersten Schritt werden für die logarithmierten Daten der Mittelwert und die Standardabweichung, als Schätzer für die Parameter der Lognormalverteilung von X berechnet. Im Anschluss ist unter Anwendung der modifizierten COX-Methode von Olsson (2005) eine Rücktransformation des Konfidenzintervalls vom logarithmischen Raum in den linearen Raum möglich.

Dieses sodann näherungsweise bestimmte und rücktransformierte Konfidenzintervall wird in den Glg. (2.14) und (2.15) gezeigt (Olsson, 2005):

$$CI_{1,2,COX-mod} \left(\bar{y} \right) = \bar{y} + \frac{s_y^2}{2} \pm t_{1-\alpha/2;n-1} \cdot \sqrt{\frac{s_y^2}{n} + \frac{s_y^4}{2 \cdot (n-1)}} \quad (2.14)$$

Eine Umrechnung in den linearen Raum wird mit Gl. (2.15) durchgeführt:

$$CI_{1,2,COX-mod} \left(\bar{x} \right) = \exp \left(CI_{1,2,COX-mod} \left(\bar{y} \right) \right) \quad (2.15)$$

mit:

$CI_{1,2,COX-mod}$ Konfidenzintervall für den Mittelwert auf Basis der modifizierten COX-Methode

\bar{y} Mittelwert der logarithmierten Stichprobe

s_y Standardabweichung der logarithmierten Stichprobe

$t_{1-\alpha/2;n-1}$ $(1 - \alpha)$ -Quantil der Student t- Verteilung mit $(n - 1)$ Freiheitsgraden

n Probenumfang

α Signifikanzniveau (in der vorliegenden Arbeit mit $\alpha = 5 \%$ gewählt)

Maximum-Likelihood Methode für rechts-zensierte Daten („maximum likelihood estimation for right-censored data“; MLerc)

Die MLerc bezieht sich auf eine Auswertung voneinander unabhängiger Ereignisse. Folgende Gleichungen werden zur Schätzung der Modellparameter θ herangezogen (Brandner, 2017):

$$\ln \left[L(\hat{\theta} | x_i) \right] = \max_{\theta} \left[\ln \left[L(\theta | x_i) \right] \right] \quad (2.16)$$

mit:

$$L(\hat{\theta} | x_i) = \prod_{i=1}^n f_{x_i} (x_i | \theta)^{d_i} \cdot \left[1 - F_{x_i} (x_i | \theta) \right]^{1-d_i} \quad (2.17)$$

und mit der Indikatorvariable d_i :

$$d_i = \begin{cases} 1 & , \text{ bei Eintritt des Zielereignisses} \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (2.18)$$

Mit diesen Gleichungen ist es somit möglich z.B. Prüfwerte von Proben welche ein Versagens vor dem Zielversagensmechanismus aufweisen gemeinsam mit jenen Proben zu bewerten welche gemäß dem Zielversagensmechanismus versagten. Somit kann die in den zensierten Daten gegebene Information in der statistischen Auswertung berücksichtigt werden. Gl. (2.17) kann zudem auch für Durchläufer, d.h. Abbruch der Prüfung vor Eintritt des Zielereignisses, angewendet werden. Dies ist von erheblicher Bedeutung für die eigenen bzw. in der Literatur angeführten DoL-Versuche. Um mit dieser Methode für solche Anwendungsfälle noch entsprechende Ergebnisse zu erzielen, sollte, als Faustformel, zumindest die Hälfte der Prüfdaten den gewollten Versagensmechanismus aufweisen.

Rechts-zensierte Datenanalyse für equi-korrelierte Daten

Im Gegensatz zur MLerc wurde für die Referenzversuche eine rechts-zensierte Datenanalyse für equi-korrelierte Daten angewandt. Da bei diesen Versuchen eine „pull-pull“ Konfiguration mit beidseits prinzipiell gleich bestückten Anschlussbereichen zur Anwendung kommt, ist es erforderlich, die Daten rechtszensiert auszuwerten, weil die ermittelte Kraft immer die Tragfähigkeit der schwächeren Seite liefert. Dabei erfolgt eine möglichst verträgliche Schätzung mit der den Daten zugrundeliegenden Verteilungsfunktion. Die ermittelten Kräfte stellen dabei den unteren Schätzer dar. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- es handelt sich um eine serielle Kette aus $M = 2$ Kettengliedern;
- für die Prüfdaten wird eine Lognormalverteilung angenommen;
- für die Equikorrelation wird gemäß (Brandner et al., 2015) ein Wert von $\rho_{\text{equi}} = 0,7$ angenommen.

Es wurde das Modell aus Brandner (2013) für serielle, equikorrelierte Systeme herangezogen und entsprechend zur Schätzung der Parameter für $M = 1$ aus $M = 2$ benutzt. Dieses Modell musste entsprechend adaptiert werden, da in Brandner (2013) von $M = 1$ auf $M > 1$ gerechnet wurde. Die Berechnung der Modellparameter $\alpha_{p,p}$ und $\beta_{p,p}$ wurde ebenfalls aus Brandner (2013) übernommen.

Damit man einen stabileren Schätzer für die Verteilungsparameter erhält, wurde die Gl. (2.19) für die 45 %-, 50 %- und 55 %-Quantile ausgewertet. Danach erfolgte eine modifizierte Mittelwertbildung.

$$Y_{p,M=2} = \frac{Y_{p,M=1}}{(\ln(M) \cdot \beta_{p,p} + 1)^{\alpha_{p,p}}} \quad (2.19)$$

mit:

p Wahrscheinlichkeit

M Anzahl equikorrelierter, gleichverteilter serieller Elemente

$\alpha_{p,p}, \beta_{p,p}$ Parameter des Modells zur Beschreibung der Verteilungsparameter bzw. von ausgewählten Statistiken serieller Systeme in Abhängigkeit von M

ρ_{equi} Equikorrelationsmaß

KAPITEL 3: ERGEBNISSE UND DISKUSSION DER REFERENZVERSUCHE

In diesem Kapitel werden die wichtigsten ermittelten Kenngrößen aus den Referenzversuchen aufgelistet und diskutiert. Das betrifft insbesondere die Holzfeuchte u , die Rohdichte ρ , die Ausziehfestigkeit f_{ax} sowie die axiale Steifigkeit im Sinne des Verschiebungsmoduls K_{ser} , welcher bei den Referenzprüfungen aus den Last-Verschiebungs-Kurven der Schrauben zufolge lokaler Wegmessung (induktive Wegaufnehmer) bestimmt wurde. Als abschließendes Fazit werden die Mittelwerte der axialen Tragfähigkeit auf Herausziehen, $F_{ax,mean}$, in Abhängigkeit von der Holzart, der Einbindelänge und des Schraubentyps, angegeben, da diese folglich die Eingangsparameter der Langzeitversuche sind.

Holzfeuchte

Obwohl die Probekörper über mehrere Monate hinweg in einer Klimakammer des Instituts für Holzbau und Holztechnologie bei gleichbleibenden Bedingungen (20 °C bei 85 % relativer Luftfeuchte) gelagert wurden, stellte sich nicht für alle Serien die gleiche, mittlere Ausgleichsfeuchte ein. Bei Fichte kann man laut Tabelle 3-1 erkennen, dass die Ausgleichsfeuchte, wie für Fichte erwartet, mit $u \approx 16\%$ erreicht ist, wohingegen bei der Buche und BauBuche geringere Holzfeuchten beobachtet wurden. Dies ist auf den für Laubhölzer z.T. beobachtbaren ausgeprägteren Hystereseeffekt zurückzuführen. Generell lässt sich sagen, dass sich bei der Fichte eine Ausgleichsfeuchte von rd. 16,0 % einstellt und diese bei der Buche und BauBuche einen Wert von rd. 15,0 % annimmt. Interessant zu beobachten ist, dass der Variationskoeffizient bei der Buche und BauBuche in etwa den doppelten Wert im Vergleich zur Fichte annimmt was darauf schließen lässt, dass die Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Holzfeuchtebestimmung eventuell noch nicht vollständig gleichmäßig über den Querschnitt verteilt war.

Tabelle 3-1: Holzfeuchte u in Abhängigkeit von der Holzart, der Einbindelänge und des Schraubentyps

	l_{emb} [mm]	Referenzschraube					Prototyp 1				
		n [-]	mean [%]	CV [%]	min [%]	max [%]	n [-]	mean [%]	CV [%]	min [%]	max [%]
FI	0 d	10	16,1	2,4	15,2	16,5	10	16,1	1,8	15,6	16,4
	2 d	10	16,1	1,4	15,8	16,4	10	16,1	1,6	15,6	16,5
	4 d	10	16,3	1,7	15,8	16,7	10	16,2	1,4	15,8	16,5
BU	0 d	20	15,0	3,1	14,2	15,8	20	15,0	3,9	13,8	15,8
	2 d	10	15,1	3,0	14,1	15,8	10	15,2	2,8	14,6	15,8
	4 d	10	14,6	4,1	13,8	15,5	10	14,8	3,1	13,8	15,5
BB	0 d	10	15,1	2,3	14,5	15,7	10	15,3	2,1	14,9	15,9
	2 d	10	15,1	2,0	14,2	15,1	10	14,6	3,7	13,8	15,5
	4 d	10	14,5	3,2	13,7	15,1	10	14,3	2,9	13,9	15,2

Dabei sind:

FIFichte

BUBuche

BBBauBuche

l_{emb} Einbindelänge

Die Boxplots in Abbildung 3-1 zeigen die beobachtete Verteilung der Holzfeuchtigkeit. Für jede Holzart (Fichte, Buche, BauBuche) ist dabei ein eigener Boxplot in Abhängigkeit der Einbindelänge und des Schraubentyps abgebildet. Die Boxplots verdeutlichen erneut die höhere Streuung der Holzfeuchte für Buche und BauBuche. Im Gegensatz zum globalen Verhalten in Abhängigkeit der Holzart, ist für sämtliche Serien einer Holzart kein signifikanter Unterschied der Holzfeuchte zu erkennen.

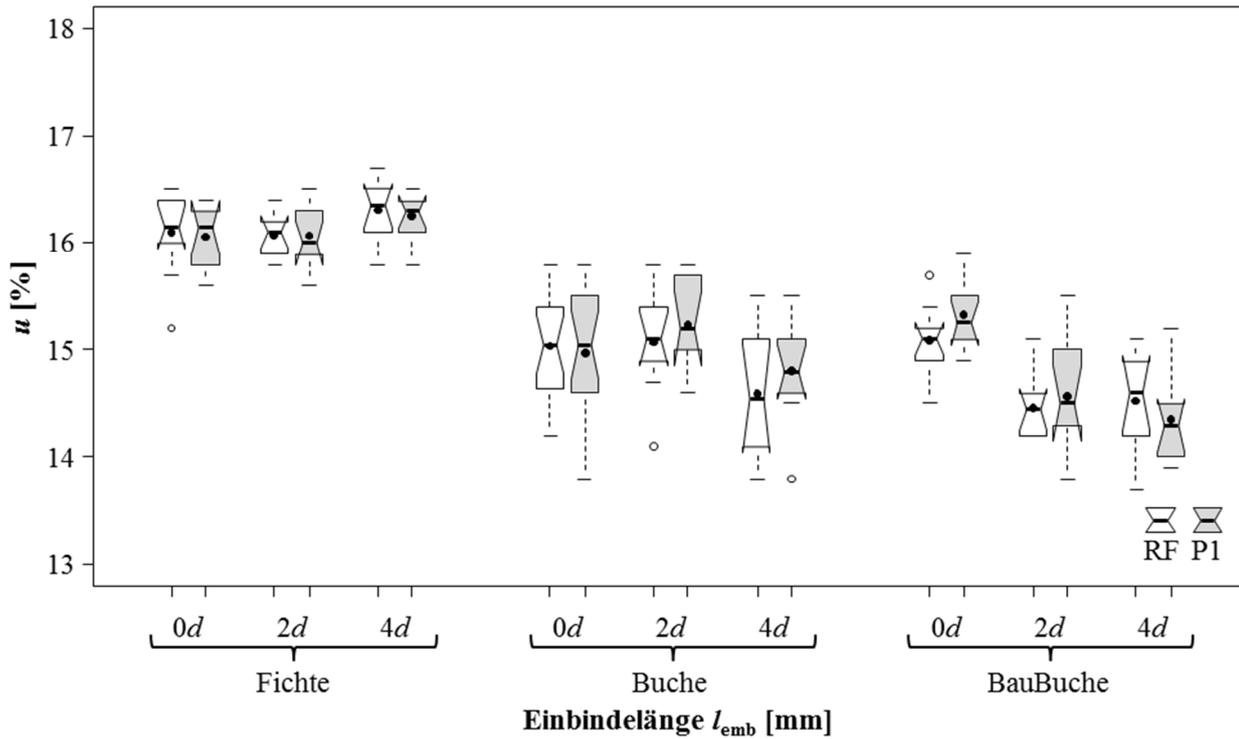


Abbildung 3-1: Boxplot Holzfeuchte u [%] in Abhängigkeit von der Holzart, der Einbindelänge und des Schraubentyps

Rohdichte

Wie in Tabelle 3-2 ersichtlich, liegt der Wert der minimalen Rohdichte aller Probekörper der Referenzprüfungen bei 423 kg/m^3 , während der maximale Wert der Rohdichte bei der Buche mit 867 kg/m^3 auftritt. Da es sich bei der BauBuche um einen Furnierwerkstoff handelt und sich in Folge der hohen Anzahl an Furnieren im Probekörper eine ausgeprägte Homogenisierung einstellt kommt der Variationskoeffizient bei einem sehr niedrigen Wert im Vergleich zu den natürlichen Hölzern zwischen 0,9 % und 1,6 % zu liegen.

Tabelle 3-2: Rohdichte ρ_{12} in Abhängigkeit von der Holzart, der Einbindelänge und des Schraubentyps

	Referenzschraube						Prototyp 1				
	l_{emb} [mm]	n [-]	mean [kg/m ³]	CV [%]	min [kg/m ³]	max [kg/m ³]	n [-]	mean [kg/m ³]	CV [%]	min [kg/m ³]	max [kg/m ³]
FI	0 d	10	450	3,3	429	479	10	447	3,4	433	480
	2 d	10	442	2,2	423	456	10	451	3,5	429	475
	4 d	10	451	4,0	427	477	10	460	4,7	434	510
BU	0 d	20	718	5,1	637	764	20	723	6,5	664	843
	2 d	10	749	7,3	687	867	10	719	4,8	665	760
	4 d	10	750	6,7	683	864	10	724	7,1	679	852
BB	0 d	10	810	1,2	792	827	10	800	1,1	786	815
	2 d	10	803	1,0	790	815	10	801	0,9	788	813
	4 d	10	810	1,0	802	828	10	801	1,6	776	817

Dabei sind:

FIFichte

BUBuche

BBBauBuche

l_{emb} Einbindelänge

In Abbildung 3-2 ist die Rohdichteverteilung der einzelnen Serien in Form von Boxplots graphisch dargestellt. Man kann erkennen, dass eine weitgehende Homogenität innerhalb der Gruppen einer Holzart herrscht. Einzig bei der Buche gibt es eine größere Variabilität in der Rohdichte.

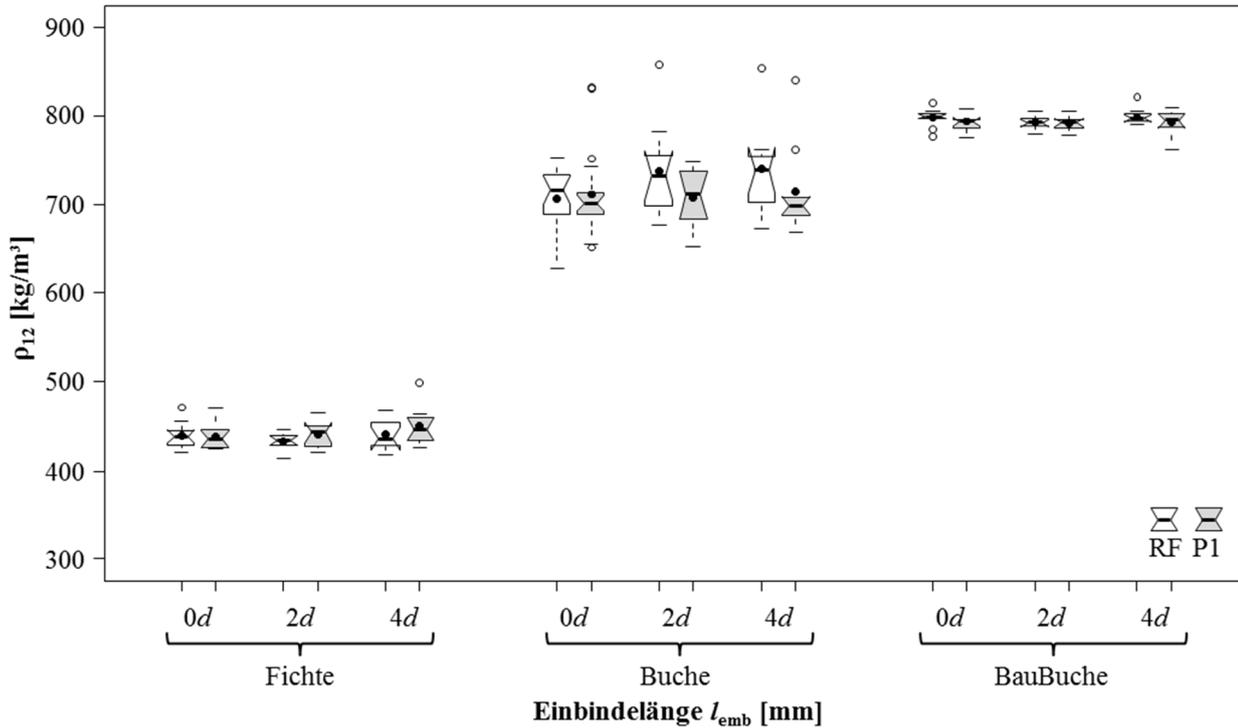


Abbildung 3-2: Boxplot Rohdichte ρ_{12} [kg/m³] in Abhängigkeit von der Holzart, der Einbindelänge und des Schraubentyps

Ausziehfestigkeit

In Tabelle 3-3 sind die Ergebnisse der Ausziehfestigkeit f_{ax} in Form der statistischen Lageparameter Mittelwert, Variationskoeffizient, Minimum und Maximum in Abhängigkeit des Schraubentyps, des Holzwerkstoffes und der Einbindetiefe ausgewiesen. In Abbildung 3-3 sind zur graphischen Veranschaulichung Boxplots aller Serien dargestellt. Bei Betrachtung des Medians, kann man erkennen, dass die Einbindelänge, bei den Serien Fichte und Buche nahezu keinen Effekt auf die Ausziehfestigkeit f_{ax} hat. Bei der BauBuche hingegen, kann sowohl für die Referenzschraube als auch für die Prototypschraube eine Zunahme von f_{ax} im Vergleich der Einbindelängen beobachtet werden. Zudem ist in Abbildung 3-3 ein höhere Variabilität in der Ausziehfestigkeit f_{ax} bei der Serie Buche zu beobachten. Wie in Tabelle 3-3 ersichtlich ist, liegen die Mittelwerte der Ausziehfestigkeiten f_{ax} für die Referenzschraube zwischen 4,2 N/mm² und 11,7 N/mm² und für den Prototyp 1 zwischen 3,4 N/mm² und 11,9 N/mm². Es sei ausdrücklich erwähnt, dass diese Festigkeiten bei einer Holzfeuchte der Probekörper lt. Tabelle 3-1 ermittelt wurden. Die Streuung der Festigkeiten in Form des Variationskoeffizienten ist bei der Serie mit den Referenzschrauben appliziert in Buchen-Vollholz mit einer Einbindelänge von 4 d am höchsten und nimmt einen Wert von 23,1 % an. Im Schnitt ist der Variationskoeffizient bei der Serie BauBuche am niedrigsten. Dies deckt sich auch mit der Streuung der Rohdichte, welche auch für die BauBuche-Probekörper den geringsten Wert aufweist. Dies ist auf Homogenisierungseffekte zufolge des Zerlegungsgrades des Materials zurückzuführen.

Der Vergleich der Schraubentypen zeigt, dass der Prototyp 1 im Wesentlichen eine niedrigere Ausziehfestigkeit im Vergleich zu der Referenzschraube hat. Dies lässt sich durch das geringere Gewinde- zu Kerndurchmesser Verhältnis des Gewindes der Referenzschraube begründen, wodurch eine etwas bessere Einbindung bzw. Verankerung des Gewindes erwartet werden kann. Hingegen weist der Prototyp 1 bei der Serie BauBuche unter den gegebenen Randbedingungen bei einer Einbindelänge von 2 d und 4 d im Mittel sogar etwas höhere Ausziehfestigkeiten auf.

Tabelle 3-3: Ausziehfestigkeit f_{ax} in Abhängigkeit von der Holzart, der Einbindelänge und vom Schraubentyp

	l_{emb} [mm]	Referenzschraube					Prototyp 1				
		n [-]	mean [N/mm ²]	CV [%]	min [N/mm ²]	max [N/mm ²]	n [-]	mean [N/mm ²]	CV [%]	min [N/mm ²]	max [N/mm ²]
FI	0 d	10	4,2	11,8	3,3	4,8	10	3,4	6,5	3,0	3,7
	2 d	10	4,5	14,4	3,7	5,7	10	3,8	11,2	3,3	4,4
	4 d	10	4,9	8,6	4,1	5,6	10	4,2	15,4	3,3	5,3
BU	0 d	20	7,9	12,8	6,0	10,1	20	7,2	13,9	5,8	9,7
	2 d	10	8,7	20,4	7,0	12,3	10	7,7	15,1	6,2	10,3
	4 d	10	8,8	23,1	7,2	13,7	10	7,9	15,4	6,7	10,6
BB	0 d	10	10,8	8,8	9,8	12,6	10	9,8	7,8	8,4	11,1
	2 d	10	11,7	6,8	10,0	13,1	10	11,9	8,4	9,9	13,5
	4 d	10	11,6	5,3	10,5	12,5	10	11,7	9,8	9,2	13,2

Dabei sind:

FIFichte

BUBuche

BBBauBuche

l_{emb} Einbindelänge

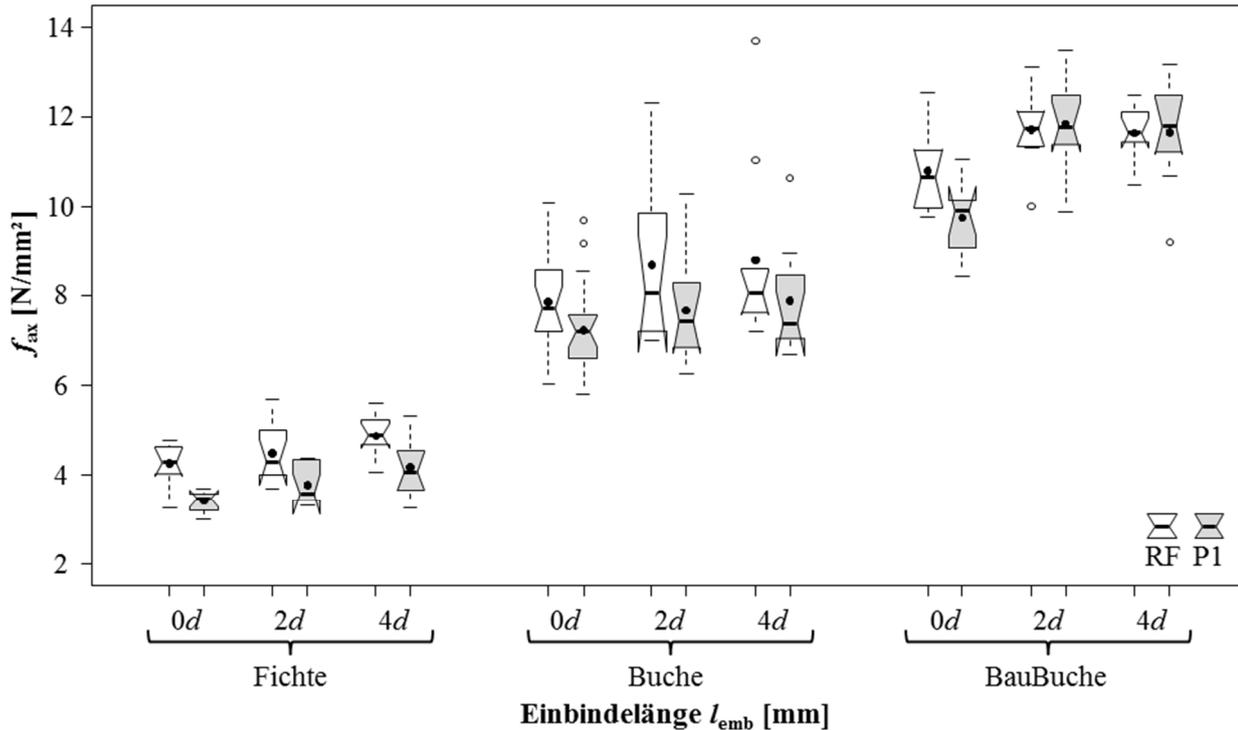


Abbildung 3-3: *Boxplot Ausziehfestigkeit f_{ax} [N/mm²] in Abhängigkeit von der Holzart, der Einbindelänge und des Schraubentyps*

Da ein Einfluss der Holzart bzw. des Holzwerkstoffes auf den Zusammenhang zwischen Rohdichte und Ausziehfestigkeit zu erwarten ist, werden diese in den Abbildung 3-4, Abbildung 3-5 und Abbildung 3-6 für jedes untersuchte Produkt individuell analysiert. Grundsätzlich sei festgehalten, dass mit steigender Rohdichte, bezogen auf das gleiche Feuchtigkeitsniveau, die Ausziehfestigkeit zunimmt, was in der Regel mittels Potenzfunktionen beschrieben wird. Dabei wurde für jede Konfiguration eine eigene Potenzfunktion ermittelt und das Bestimmtheitsmaß angegeben. Das Bestimmtheitsmaß nimmt für die Holzarten Fichte (Abbildung 3-4) und BauBuche (Abbildung 3-6) einen relativ geringen Wert an. Dies ist zum einen auf den abgedeckten geringen Rohdichtebereich zurückzuführen, zum anderen auch durch die geringe Anzahl an Prüfungen je Serie und Sub-Serie begründet. Des Weiteren ist aus der Literatur eine geringe Abhängigkeit der Ausziehfestigkeit von der Rohdichte bei einer Applizierung 0° zur Faser bekannt; siehe Ringhofer (2017), Reichinger (2017). Bei der Buche (Abbildung 3-5) wird ein viel größerer Bereich der Rohdichte abgedeckt und das Bestimmtheitsmaß steigt somit deutlich an.

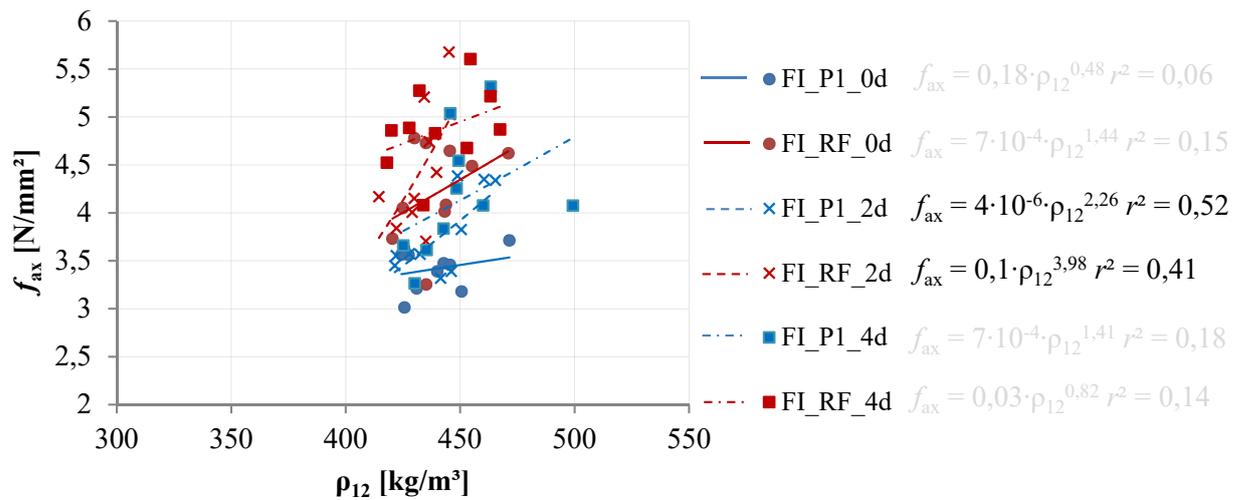


Abbildung 3-4: Zusammenhang zwischen f_{ax} [N/mm²] und ρ_{12} [kg/m³] für Fichte

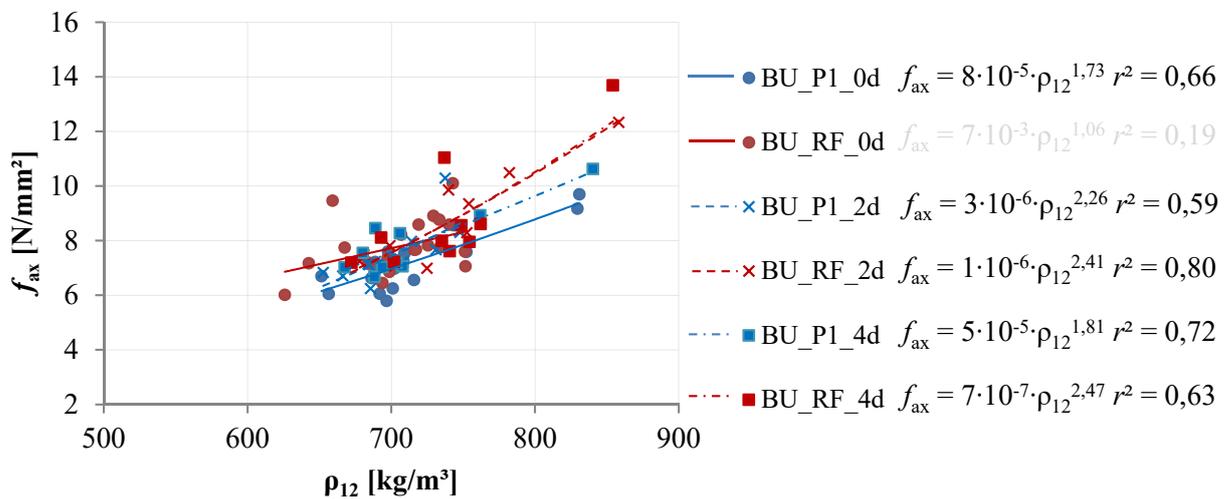


Abbildung 3-5: Zusammenhang zwischen f_{ax} [N/mm²] und ρ_{12} [kg/m³] für Buche

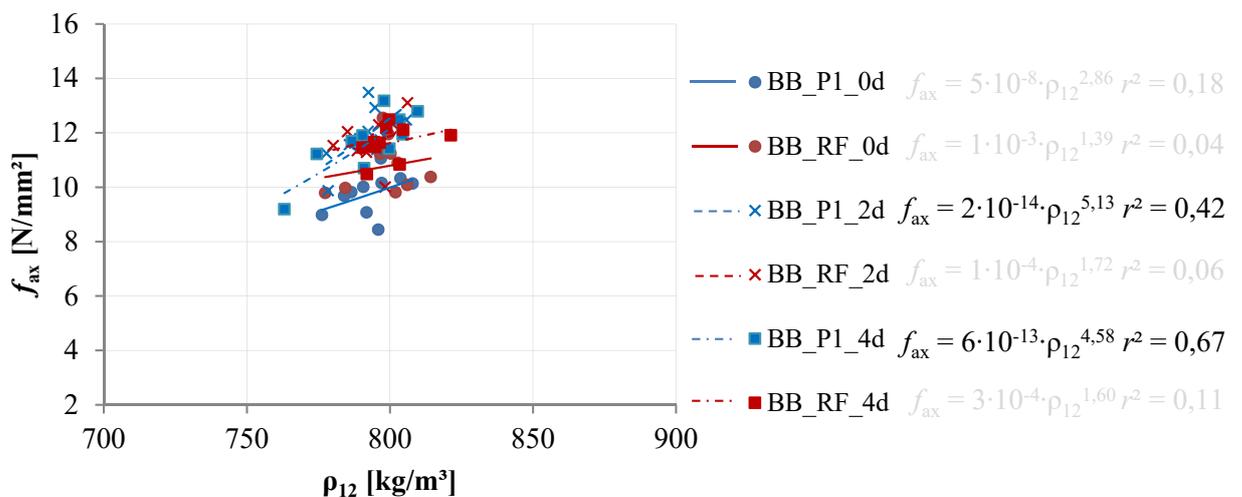


Abbildung 3-6: Zusammenhang zwischen f_{ax} [N/mm²] und ρ_{12} [kg/m³] für BauBuche

Steifigkeit

In Tabelle 3-4 sind die Ergebnisse der axialen Verbundsteifigkeit K_{ser} in Form der statistischen Lageparameter Mittelwert, Variationskoeffizient, Minimum und Maximum in Abhängigkeit des Schraubentyps, des Holzwerkstoffes und der Einbindetiefe ausgewiesen. In Abbildung 3-7 sind die Boxplots der axialen Verbundsteifigkeit K_{ser} dargestellt. Der Mittelwert der Steifigkeit K_{ser} nimmt den geringsten Wert bei der Serie Fichte mit einer Einbindelänge von $0 d$ an. Die höchste mittlere Steifigkeit tritt bei der Serie BauBuche bei einer Einbindelänge von $4 d$ auf. Grundsätzlich lässt sich aufgrund dieser Ergebnisse sagen, dass der Mittelwert innerhalb der untersuchten Holzprodukte nicht von der Variation der Einbindelänge beeinflusst wird. Im Vergleich der Schraubentypen lässt sich zeigen, dass der Prototyp 1 über alle Serien einen höheren Wert der Steifigkeit aufweist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Prototyp 1 an sich aufgrund des größeren Kerndurchmessers steifer ist. In den Boxplots in Abbildung 3-7 kann man zudem die zum Teil hohe Variabilität innerhalb der einzelnen Serien erkennen.

Tabelle 3-4: Steifigkeit K_{ser} in Abhängigkeit von der Holzart, der Einbindelänge und vom Schraubentyp

	l_{emb} [mm]	Referenzschraube					Prototyp 1				
		n [-]	mean [kN/mm]	CV [%]	min [kN/mm]	max [kN/mm]	n [-]	mean [kN/mm]	CV [%]	min [kN/mm]	max [kN/mm]
FI	0 d	10	47,3	20,8	33,5	61,2	10	62,5	12,5	51,9	75,8
	2 d	10	49,3	16,6	40,3	66,9	10	65,4	28,5	39,2	92,2
	4 d	9	52,9	48,1	34,9	102,6	10	74,9	53,3	28,5	158,5
BU	0 d	10	84,1	29,6	60,5	141,8	10	99,8	16,3	76,9	132,0
	2 d	10	79,0	18,0	63,7	110,7	10	105,1	34,7	57,6	182,6
	4 d	10	89,6	18,1	65,8	119,4	10	114,9	42,0	61,8	203,6
BB	0 d	10	77,0	12,1	55,9	87,5	10	101,5	18,0	79,3	140,1
	2 d	10	77,0	16,7	60,6	100,4	10	81,3	13,8	66,0	102,5
	4 d	10	77,3	30,2	58,6	135,2	10	115,8	39,0	74,3	185,9

Dabei sind:

- FIFichte
- BUBuche
- BBBauBuche
- l_{emb} Einbindelänge

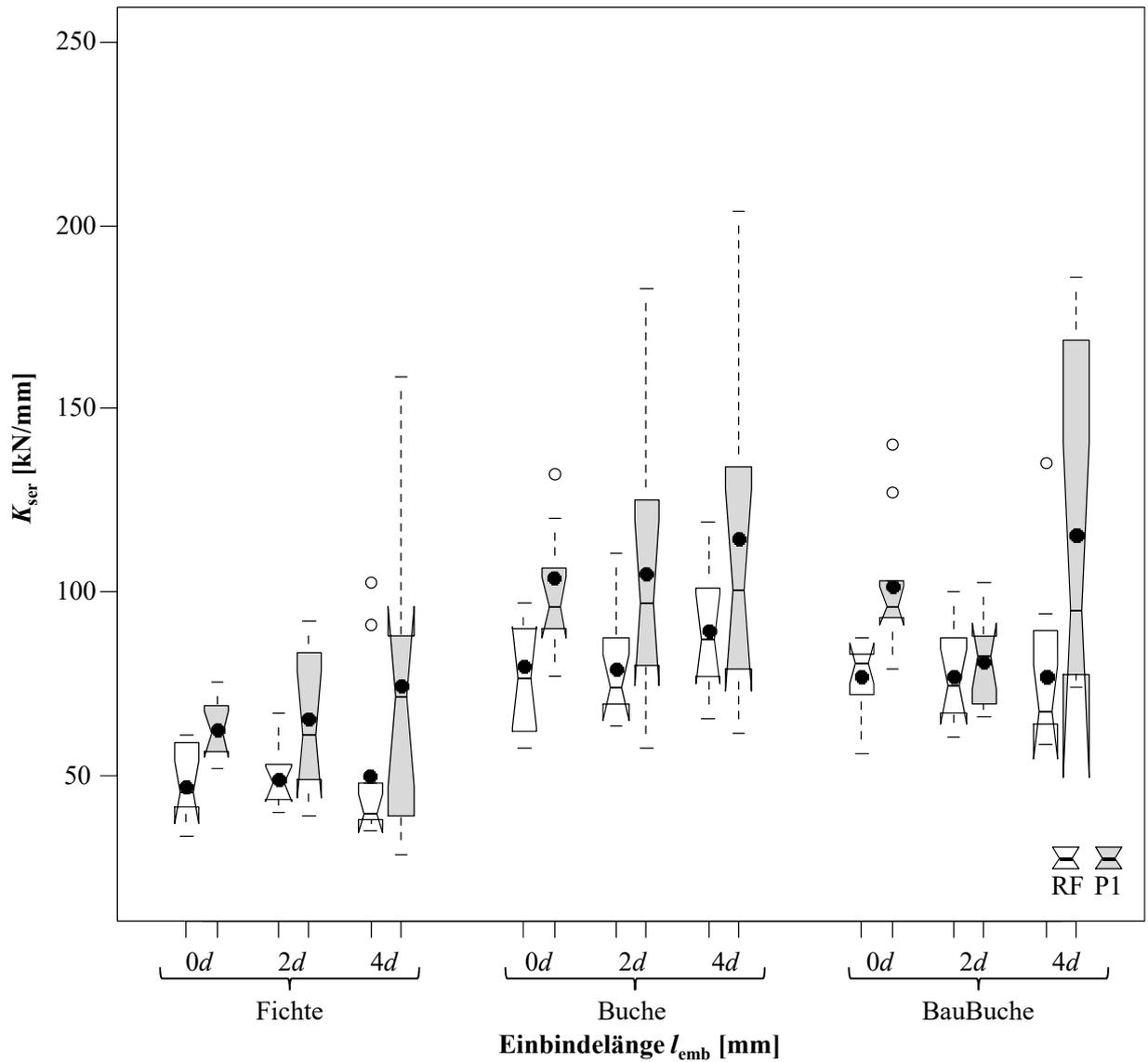


Abbildung 3-7: Boxplot Steifigkeit K_{ser} [kN/mm] in Abhängigkeit von der Holzart, der Einbindelänge und des Schraubentyps

Fazit der Referenzversuche

Zuerst war es erforderlich, die Zielkraft, die als Eingangsparameter der Langzeitversuche diente, zu ermitteln. Als Basis der einzelnen Ketten wurde der arithmetische Mittelwert der Tragfähigkeiten aus den Referenzversuchen festgelegt. Da es sich bei „pull-pull“-Versuchen um eine serielle Kette handelt, bei der es eine Equikorrelation zwischen den beiden Seiten gibt und immer nur ein Versagen der schwächeren Seite eintritt, lassen sich diese Daten statistisch rechtszensiert aufbereiten, vgl. Abschnitt 2-2.4. Tabelle 3-5 zeigt eine Gegenüberstellung der arithmetischen Mittelwerte auf Basis von jeweils 10 Prüfungen mit den modifizierten Mittelwerten auf Basis der oben genannten Randbedingungen. Man kann erkennen, dass bei Erhöhung der Mittelwerte auch der Variationskoeffizient zunimmt. Diese modifizierten Mittelwerte werden in weiterer Folge als 100 % Lastniveau definiert.

Tabelle 3-5: *Axiale Tragfähigkeit auf Herausziehen bestimmt in den Referenzversuchen in Abhängigkeit von der Holzart, der Einbindelänge und des Schraubentyps: Mittelwerte $F_{ax,mean}$ und Variationskoeffizienten $CV[F_{ax}]$ aus den Prüfungen einer seriellen Kette („pull-pull“) und modifizierte Mittelwerte $F_{ax,mean,mod}$ und Variationskoeffizienten $CV[F_{ax,mod}]$ bezogen auf das Potential der Einzelschrauben*

	Referenzschraube						Prototyp 1				
	l_{emb} [mm]	n [-]	$F_{ax,mean}$ [N]	CV [F_{ax}] [%]	$F_{ax,mean,mod}$ [N]	CV [$F_{ax,mod}$] [%]	n [-]	$F_{ax,mean}$ [N]	CV [F_{ax}] [%]	$F_{ax,mean,mod}$ [N]	CV [$F_{ax,mod}$] [%]
FI	0 d	10	5.543	11,8	5.787	12,9	10	4.527	6,5	4.636	7,1
	2 d	10	5.702	15,2	6.027	16,7	10	4.995	11,2	5.205	12,4
	4 d	10	6.379	8,6	6.585	9,5	10	5.515	15,4	5.835	17,0
BU	0 d	10	9.600	11,1	9.998	12,2	10	9.199	14,7	9.708	16,2
	2 d	10	11.362	20,4	12.239	22,4	10	10.153	15,1	10.729	16,5
	4 d	10	11.508	23,1	12.517	25,4	10	10.437	15,4	11.043	16,9
BB	0 d	10	14.106	8,8	14.569	9,7	10	12.929	7,8	13.303	8,6
	2 d	10	15.323	6,8	15.714	7,5	10	15.691	8,4	16.180	9,2
	4 d	10	15.194	5,3	15.490	5,8	10	15.422	9,8	15.984	10,7

Dabei sind:

FI, BU, BBFichte, Buche, BauBuche

l_{emb} Einbindelänge

$F_{ax,mean}$ Mittelwerte der Referenzversuche

$F_{ax,mean,mod}$ modifizierte Mittelwerte der Referenzversuche

$CV[F_{ax}]$ Variationskoeffizient auf Basis der Mittelwerte

$CV[F_{ax,mod}]$ Variationskoeffizient auf Basis der modifizierten Mittelwerte

In Tabelle 3-6 erfolgt eine Umrechnung auf die Lastniveaus 80 %, 70 % und 60 %. Wie bereits oben erwähnt, beziehen sich diese Eingangswerte der Langzeitversuche auf das Potential der Einzelschraube und somit ist als 100 % Lastniveau (SL) durch $F_{ax,mean,mod}$ bestimmt.

Tabelle 3-6: *Axiale Tragfähigkeit auf Herausziehen bestimmt in den Referenzversuchen in Abhängigkeit von der Holzart, der Einbindelänge und des Schraubentyps: modifizierte Mittelwerte $F_{ax,mean,mod}$ bezogen auf das Potential der Einzelschrauben; Umrechnung auf die Lastniveaus 80 %, 70 %, 60 %*

	l_{emb}	Referenzschraube				Prototyp 1			
		$F_{ax,mean,mod}$ [N]	$F_{ax,mean,80}$ [N]	$F_{ax,mean,70}$ [N]	$F_{ax,mean,60}$ [N]	$F_{ax,mean,mod}$ [N]	$F_{ax,mean,80}$ [N]	$F_{ax,mean,70}$ [N]	$F_{ax,mean,60}$ [N]
FI	0 d	5.787	4.630	4.051	3.472	4.636	3.709	3.245	2.781
	2 d	6.027	4.822	4.219	3.616	5.205	4.164	3.643	3.123
	4 d	6.585	5.268	4.609	3.951	5.835	4.668	4.085	3.501
BU	0 d	9.998	7.998	6.998	5.999	9.708	7.767	6.796	5.825
	2 d	12.239	9.791	8.568	7.344	10.729	8.583	7.510	6.437
	4 d	12.517	10.014	8.762	7.510	11.043	8.834	7.730	6.626
BB	0 d	14.569	11.655	10.198	8.741	13.303	10.643	9.312	7.982
	2 d	15.714	12.571	11.000	9.428	16.180	12.944	11.326	9.708
	4 d	15.490	12.392	10.843	9.294	15.984	12.787	11.189	9.590

Dabei sind:

FI, BU, BB Fichte, Buche, BauBuche

l_{emb} Einbindelänge

$F_{ax,mean,mod}$ modifizierte Mittelwerte der Referenzversuche $SL = 100 \%$

$F_{ax,mean,80}$ modifizierte Mittelwerte der Referenzversuche $SL = 80 \%$

$F_{ax,mean,70}$ modifizierte Mittelwerte der Referenzversuche $SL = 70 \%$

$F_{ax,mean,60}$ modifizierte Mittelwerte der Referenzversuche $SL = 60 \%$

Bevor die Ketten installiert werden konnten, war es erforderlich, die Konfiguration der Tellerfedern auf die einzelnen Lastniveaus abzustimmen. Es wurden Schnorr 51 CrV 4 Tellerfedern mit den Abmessungen $40 \times 18,3 \times 2 \text{ mm}^3$ verwendet. Die Berechnung der Federsteifigkeiten erfolgte mittels eines Excel-Arbeitsblattes der Firma Schnorr. Wie in Abbildung 3-8 ersichtlich, musste die Anzahl der Tellerfedern parallel und seriell zueinander berechnet werden. Je mehr Federn parallel angeordnet werden, desto höher ist die maximal übertragbare Kraft, jedoch dürfen maximal 75 Prozent von F_{max} der Tellerfedern angesetzt werden, weil sich sonst die Federn plastisch verformen und demzufolge den linear elastischen Bereich verlassen würden. Im Gegensatz dazu wird das gesamte Federpaket immer weicher, je mehr Federn seriell angeordnet werden. Um eine möglichst kraftgesteuerte Prüfkongfiguration zu erhalten, ist es erforderlich, die Federpakete weich abzustimmen, damit die auftretenden Kriechverformungen und die miteinhergehende Längenänderung der Prüfkette nur zu einem geringen Kraftabfall führen. Es wurde

versucht die Tellerfedersteifigkeit so zu adjustieren, dass eine Wegänderung von einem Millimeter zu einem Kraftabfall von rund 2 – 4 % führte. Wie in Tabelle 3-7 ersichtlich, wurde für die Prüfketten mit den Fichten-Probekörpern eine Federsteifigkeit k von rd. 105 N/mm, für jene mit den Buchen-Probekörpern rd. 240 N/mm und für jene mit BauBuche-Probekörpern rd. 500 N/mm gewählt. Für die Serie BauBuche mit einem Lastniveau von 60 % wurden zusätzlich im Bereich des oberen Trägers Federn installiert, um eine zusätzliche Reduzierung der Federsteifigkeit auf ca. 120 N/mm zu erhalten.

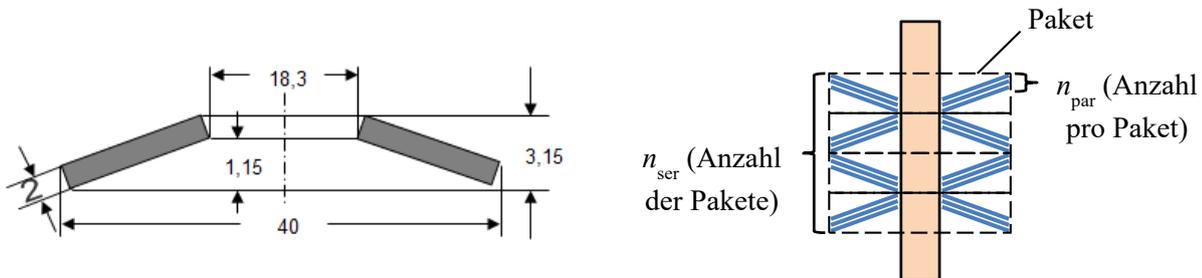


Abbildung 3-8: Skizze Tellerfedern

Tabelle 3-7: Kennwerte der installierten Tellerfedern in Abhängigkeit von der Holzart, des Lastniveaus und vom Schraubentyp

	Referenzschraube						Prototyp 1					
	<i>SL</i> [%]	<i>F</i> _{75 %} [N]	<i>k</i> [N/mm]	ΔF [%]	<i>n</i> _{par} [-]	<i>n</i> _{ser} [-]	<i>F</i> _{75 %} [N]	<i>k</i> [N/mm]	ΔF [%]	<i>n</i> _{par} [-]	<i>n</i> _{ser} [-]	
FI	80	5.656	103	2,22	1	56	5.656	110	2,96	1	56	
	70	5.656	103	2,55	1	58	5.656	110	3,39	1	58	
	60	5.656	104	3,01	1	60	5.656	111	3,98	1	60	
BU	80	11.312	235	2,40	2	48	11.312	245	2,86	2	48	
	70	11.312	236	2,75	2	50	11.312	245	3,27	2	50	
	60	11.312	247	3,36	2	50	11.312	256	3,98	2	50	
BB	80	16.968	495	3,94	3	36	16.968	491	3,79	3	36	
	70	16.968	516	4,69	3	36	16.968	511	4,51	3	36	
	60	11.312	119	1,26	2	96 ¹	11.312	118	1,21	2	96 ¹	

Anmerkungen:

¹⁾... Anmerkung 1: Hier wurden im Bereich des oberen und unteren Trägers Federn installiert.

Dabei sind:

FI, BU, BB Fichte, Buche, BauBuche

SL Lastniveau

*F*_{75 %} 75 % von *F*_{max} der Tellerfedern entspricht dem maximalen Beanspruchungsniveau

k Federsteifigkeit des Federpaketes

ΔF prozentueller Kraftabfall bei 1 mm Dehnung

*n*_{par} Anzahl der Tellerfedern parallel

*n*_{ser} Anzahl der Tellerfedern seriell

KAPITEL 4: ERGEBNISSE UND DISKUSSION DER HAUPTVERSUCHE DOL

4-1.1 ALLGEMEINES

In diesem Kapitel werden die ersten Ergebnisse und Tendenzen, wie sie auf Basis der bisher vorliegenden Daten der Langzeituntersuchungen erhoben wurden, dargelegt und diskutiert. Der bereits beobachtete Zeitraum betrug in etwa ein Jahr. Im ersten Schritt werden die klimatischen Randbedingungen dargestellt. Hierbei soll gezeigt werden, dass die Versuche im konstanten Klima entsprechend den Randbedingungen Nutzungsklasse 2 stattgefunden haben. Im nächsten Schritt wird auf die Probekörper eingegangen. Dabei wird insbesondere die Rohdichte ρ und die Holzfeuchte u der einzelnen Serien untersucht. Im letzten Teil dieses Kapitels werden die bisher gewonnen Ergebnisdiagramme der einzelnen Serien dargestellt und diskutiert.

4-1.1.1 Klimadaten

In Abbildung 4-1 sind die aufgezeichneten Verläufe der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit für den Beobachtungszeitraum dargestellt. Man kann erkennen, dass sich im Wesentlichen annähernd konstante klimatische Verhältnisse während der Beobachtungsdauer einstellten. Gemäß Tabelle 4-1 lag der Mittelwert der Temperatur bei 20,3 °C und jener der relativen Luftfeuchtigkeit bei 85,9 %. Der Variationskoeffizient beider Parameter mit nur rund 2,4 % bestätigt die weitgehend konstanten klimatischen Verhältnisse.

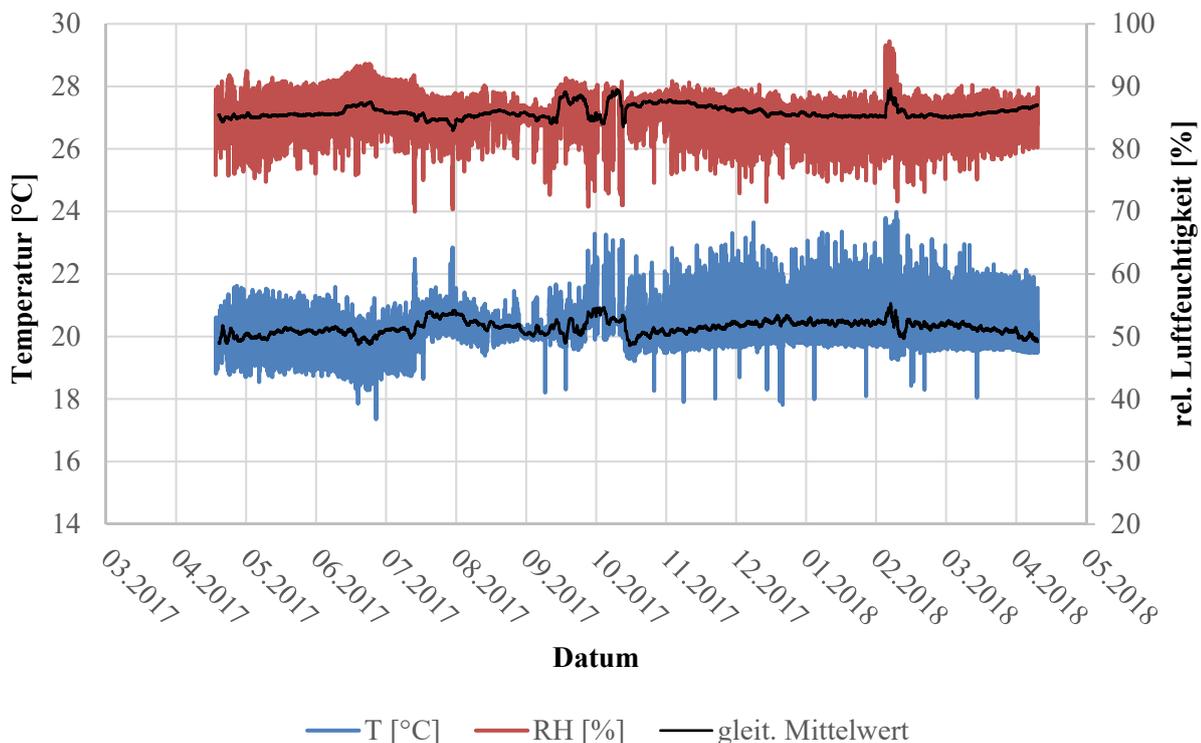


Abbildung 4-1: Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit über den beobachteten Zeitraum

Tabelle 4-1: Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit über den beobachteten Zeitraum

	Temperatur [°C]	relative Luftfeuchtigkeit [%]
min	17,4	70,0
max	24,0	97,2
mean	20,3	85,9
CV	2,4 %	2,3 %

4-1.1.2 Holzfeuchte

In Tabelle 4-2 ist die Holzfeuchte der bereits entnommenen Fichtenprobekörper für die einzelnen Serien, unterteilt nach Lastniveau, der Einbindelänge und dem Schraubentyp, dargestellt. Die Extremwerte liegen bei 18,5 % als Maximum 15,7 % als Minimum. Die Mittelwerte der einzelnen Serien variieren in einem relativ kleinen Bereich zwischen 16,1 % und 16,7 %. Der Variationskoeffizient nimmt über alle Serien betrachtet einen sehr geringen Wert von maximal 4,4 % an. Zu beachten ist, dass die Anzahl der zu Grunde liegenden Daten für alle Serien unterschiedlich ist und dass teilweise nur sehr wenige Datenpunkte für einzelne Serien vorliegen. Das bedeutet, dass die betroffenen Serien eine erhebliche statistische Unsicherheit aufweisen können.

Tabelle 4-2: Holzfeuchte u für die Fichte für die einzelnen Serien unterteilt nach Lastniveau, Einbindelänge und Schraubentyp

l_{emb} [mm]	SL [%]	n [-]	Referenzschraube				Prototyp 1				
			mean [%]	CV [%]	min [%]	max [%]	n [-]	mean [%]	CV [%]	min [%]	max [%]
0d	60	4	16,5	0,52	16,4	16,6	–	–	–	–	–
	70	12	16,4	3,44	16,0	18,1	6	16,3	1,60	16,0	16,7
	80	14	16,2	1,39	15,8	16,6	12	16,3	1,74	15,7	16,6
2d	60	2	16,4	0,21	16,4	16,4	2	16,3	0,44	16,3	16,4
	70	8	16,7	3,37	16,1	17,4	–	–	–	–	–
	80	12	16,1	1,00	15,8	16,4	12	16,7	4,41	16,1	18,5
4d	60	4	16,3	0,56	16,1	16,4	2	16,3	0,17	16,3	16,3
	70	nicht geprüft									
	80	10	16,1	1,35	15,7	16,4	14	16,2	1,85	15,5	16,7

Dabei sind:

SL Lastniveau

l_{emb} Einbindelänge

In Abbildung 4-2 sind die Ergebnisse der Holzfeuchte in Form von Boxplots in Abhängigkeit vom Lastniveau, der Einbindelänge und des Schraubentyps graphisch dargestellt. Dabei wurde in der

Darstellung die Breite der Boxen in Abhängigkeit der Anzahl der Versuchsergebnisse angepasst. Je schmaler die Box ist, desto weniger Daten liegen der Berechnung zu Grunde. Zusätzlich wurden jene Konfigurationen, die noch nicht abgeschlossen sind, grau dargestellt. Die abgeschlossenen Ketten wurden in schwarz dargestellt. Man kann erkennen, dass die oben genannten Minima und Maxima sich als Extremwerte in den Box-Plots zeigen wohingegen sich die restlichen Daten stark um den Mittelwert gruppieren. In Anbetracht der sehr homogenen Holzfeuchte wird es als zulässig erachtet die Serien der Fichte bezüglich dieser Variable gemeinsam zu betrachten bzw. die Ergebnisse in einem Diagramm darzustellen, da die Holzfeuchte zwischen den Serien keinen signifikanten Unterschied aufweist.

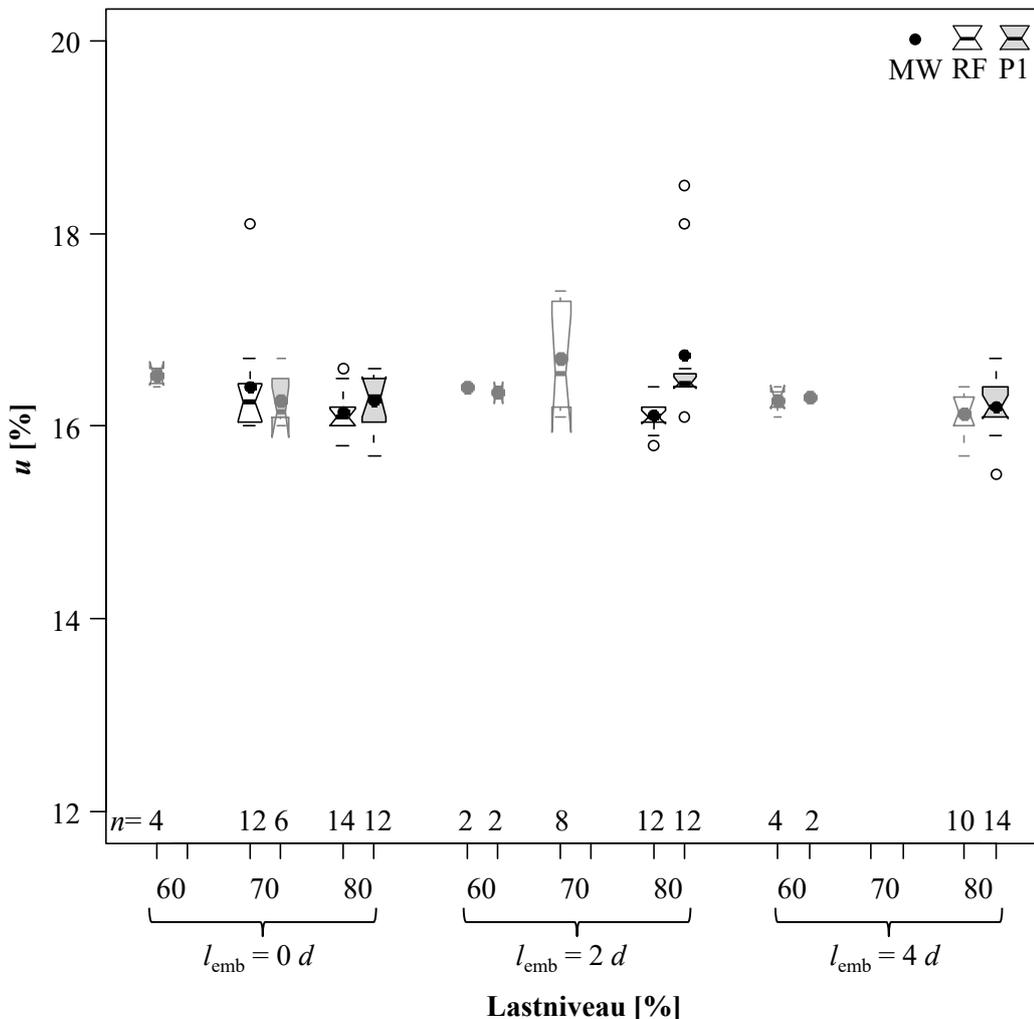


Abbildung 4-2: **Boxplot Holzfeuchtigkeit u [%] für die Serien mit Fichte in Abhängigkeit vom Lastniveau, der Einbindelänge und des Schraubentyps**

In Tabelle 4-3 ist die Holzfeuchte der bereits entnommenen Buchenprobekörper für die einzelnen Serien unterteilt nach Lastniveau, der Einbindelänge und dem Schraubentyp dargestellt. Die Extremwerte liegen bei 15,3 % als Maximum 13,7 % als Minimum. Die Mittelwerte der einzelnen Serien variieren in einem relativ kleinen Bereich zwischen 13,7 % und 14,5 %. Der Variationskoeffizient nimmt über alle Serien betrachtet einen geringen Wert von maximal 3,6 % an. Zu beachten ist, dass die Anzahl der zu Grunde liegenden Daten für alle Serien unterschiedlich ist. Zusätzlich ist zu beachten, dass für diese Holzart noch sehr wenige Versagensfälle und dementsprechend wenig Holzfeuchtemessungen vorliegen. Der Vergleich von Tabelle 4-3 mit Tabelle 3-1 zeigt, dass die Holzfeuchte trotz zunehmender Exposition der Proben im konstanten Klima annähernd konstant geblieben ist. Das bedeutet, dass die Ausgleichsfeuchte bei den Referenzversuchen bereits erreicht wurde.

Tabelle 4-3: *Holzfeuchte u für die Buche für die einzelnen Serien unterteilt nach Lastniveau, Einbindelänge und Schraubentyp*

		Referenzschraube					Prototyp 1				
l_{emb} [mm]	SL [%]	n [-]	mean [%]	CV [%]	min [%]	max [%]	n [-]	mean [%]	CV [%]	min [%]	max [%]
0d	60	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	70	2	13,7	0,47	13,7	13,8	4	14,4	1,58	14,2	14,6
	80	nicht geprüft									
2d	60	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	70	8	14,5	3,62	13,9	15,3	–	–	–	–	–
	80	nicht geprüft									

Dabei sind:

SL Lastniveau

l_{emb} Einbindelänge

In Abbildung 4-3 sind die Ergebnisse in Form von Boxplots graphisch dargestellt. Da insgesamt nur 14 Datenpunkte der Holzfeuchte vorliegen, lassen sich noch keine tiefergehenden Aussagen treffen. Wie bereits aber bei den Referenzversuchen beobachtet, stellt sich im Vergleich zur Fichte eine geringere Ausgleichsfeuchte ein.

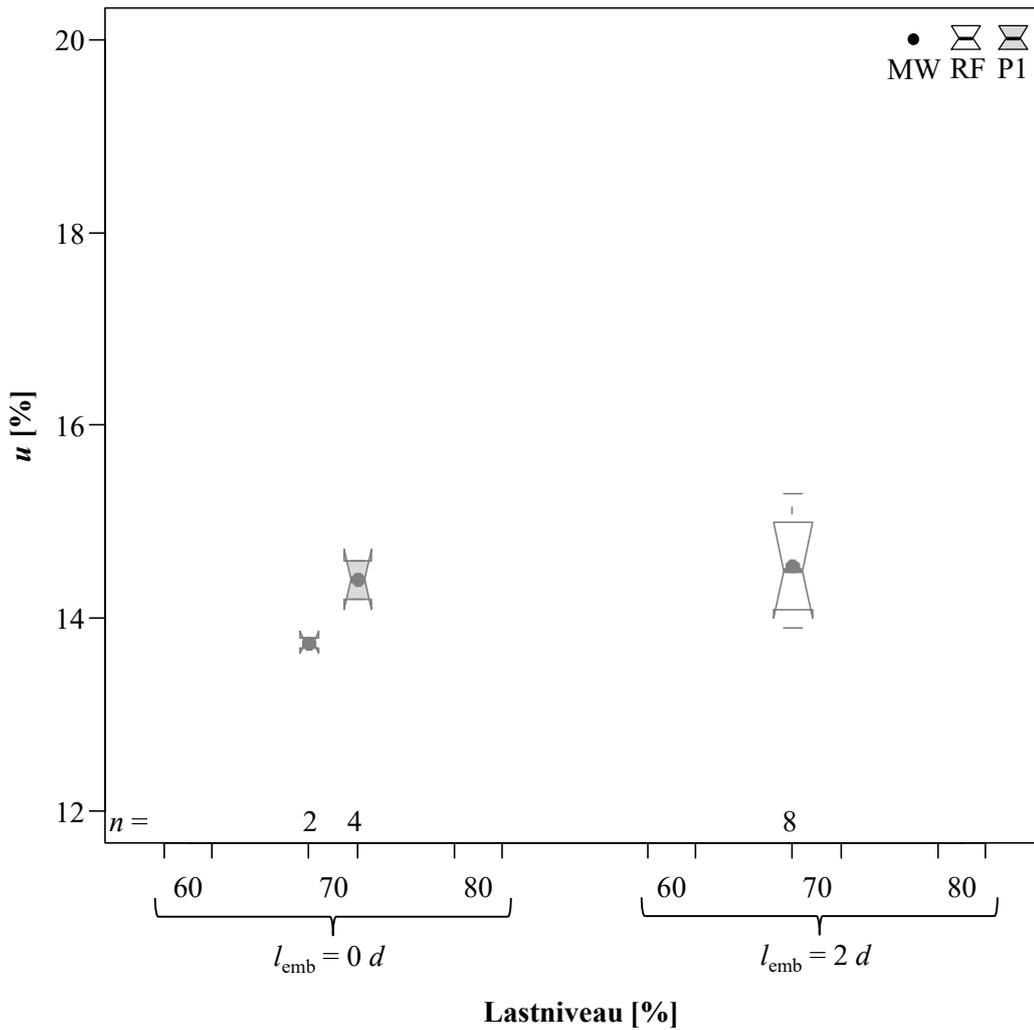


Abbildung 4-3: Boxplot Holzfeuchtigkeit u [%] für Buche in Abhängigkeit vom Lastniveau, der Einbindelänge und des Schraubentyps

In Tabelle 4-4 ist die Holzfeuchte für die bereits entnommenen BauBuchen-Probekörper in Abhängigkeit des Lastniveaus, der Einbindelänge und des Schraubentyps dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Extremwerte bei diesem Material zwischen 15,5 % als Maximum und 13,3 % als Minimum liegen. Betrachtet man die Mittelwerte der einzelnen Serien so variieren diese in einem vergleichsweise kleinen Bereich zwischen 14,0 % und 14,6 % und liegen somit in etwa im Bereich der Buche. Über alle Serien betrachtet nimmt der Variationskoeffizient einen eher geringen Wert von maximal 4,8 % an. Auch hier findet die Tatsache Beachtung, dass die Anzahl der zu Grunde liegenden Daten für alle Serien unterschiedlich ist und das gegenwärtig bei einzelnen Serien nur wenige Datenpunkte vorliegen, die erhebliche statistische Unsicherheiten aufweisen können. Der Vergleich von Tabelle 4-4 mit Tabelle 3-1 zeigt, dass die Holzfeuchte, trotz zunehmender Exposition der Proben im konstanten Klima, annähernd konstant geblieben ist. Das bedeutet, dass die Ausgleichsfeuchte bei den Referenzversuchen bereits erreicht wurde.

Tabelle 4-4: *Holzfeuchte u für BauBuche in Abhängigkeit des Lastniveaus, der Einbindelänge und des Schraubentyps*

l_{emb} [mm]	SL [%]	Referenzschraube					Prototyp 1				
		n [-]	mean [%]	CV [%]	min [%]	max [%]	n [-]	mean [%]	CV [%]	min [%]	max [%]
0d	60	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	70	12	14,6	2,79	14,0	15,2	2	14,5	2,97	14,2	14,8
	80	14	14,3	4,84	13,3	15,5	14	14,0	2,31	13,3	14,6
2d	60	4	14,3	2,83	14,1	14,9	2	14,6	1,19	14,5	14,7
	70	12	14,1	2,94	13,3	14,9	12	14,2	2,26	13,8	14,9
	80	14	14,2	3,90	13,4	15,1	14	14,3	3,12	13,5	15,0

Dabei sind:

SL Lastniveau

l_{emb} Einbindelänge

In Abbildung 4-4 sind die Boxplots für die Serie BauBuche in Abhängigkeit vom Lastniveau, der Einbindelänge und des Schraubentyps dargestellt. Auch anhand dieser kann man erkennen, dass sich eine relative schmale Bandbreite für die BauBuche ergibt. Ausreißer konnten nicht beobachtet werden.

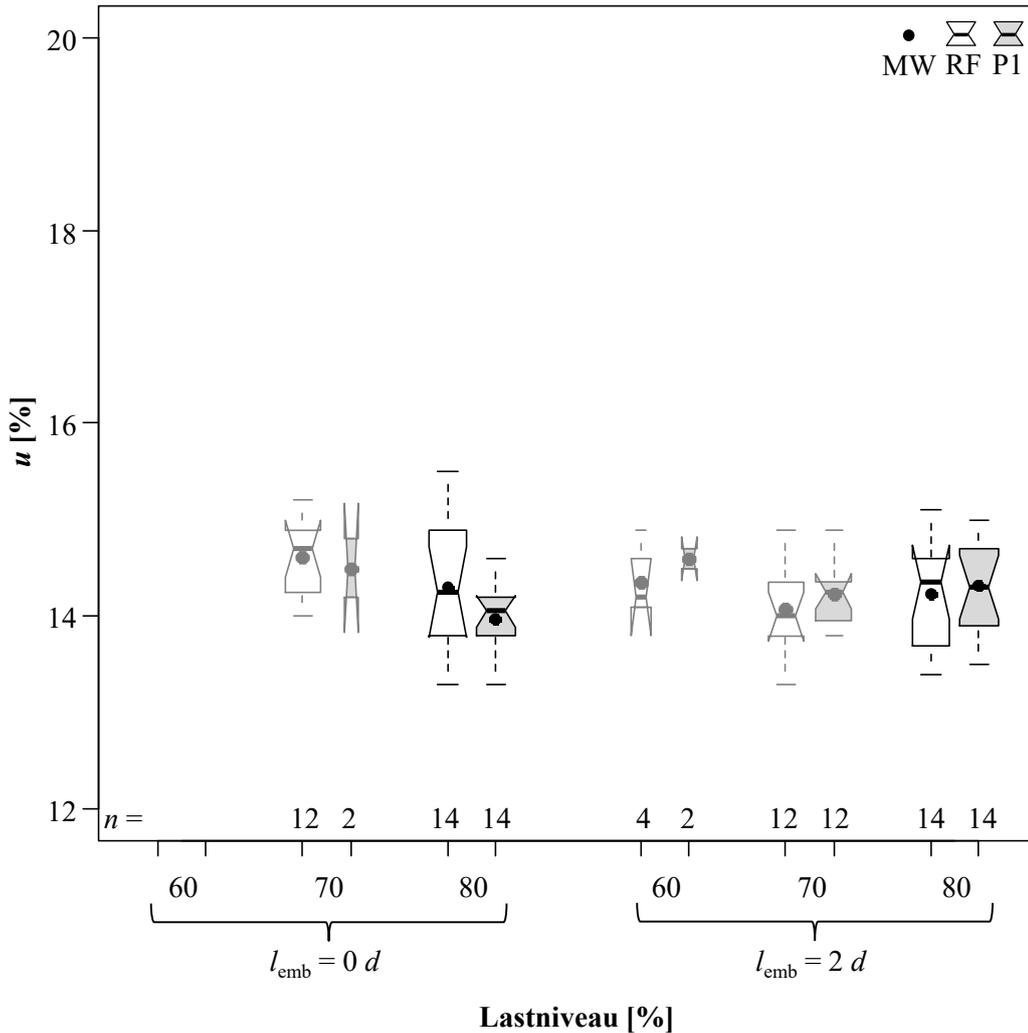


Abbildung 4-4: **Boxplot Holzfeuchtigkeit u [%] für BauBuche in Abhängigkeit vom Lastniveau, der Einbindelänge und des Schraubentyps**

4-1.1.3 Rohdichte

Tabelle 4-5 zeigt die wichtigsten statistischen Kennwerte der Rohdichte ρ_{12} für die Prüfserien in Fichtenholz in Abhängigkeit des Lastniveaus, der Einbindelänge und des Schraubentyps. Betrachtet man die Extremwerte für die einzelnen Serien so liegen diese bei 516 kg/m^3 als Maximum und 415 kg/m^3 als Minimum. Die Mittelwerte der einzelnen Serien variieren in einem relativ kleinen Bereich zwischen 421 kg/m^3 und 467 kg/m^3 . Der Variationskoeffizient nimmt über alle Serien betrachtet einen relativ niedrigen Wert im von maximal 5,7 % an. Zu bedenken gilt es, dass auch hier die Anzahl der zu Grunde liegenden Daten aller Serien unterschiedlich ist und dass gegenwärtig bei einzelnen Serien nur wenige Datenpunkte vorliegen. Das bedeutet, dass diese Daten erhebliche statistische Unsicherheiten aufweisen können.

Tabelle 4-5: Rohdichte ρ_{12} für Fichte in Abhängigkeit des Lastniveaus, der Einbindelänge und des Schraubentyps

		Referenzschraube					Prototyp 1				
l_{emb} [mm]	SL [%]	n [-]	mean [kg/m ³]	CV [%]	min [kg/m ³]	max [kg/m ³]	n [-]	mean [kg/m ³]	CV [%]	min [kg/m ³]	max [kg/m ³]
0d	60	4	427	2,18	418	437	–	–	–	–	–
	70	12	449	2,41	424	466	6	438	4,01	418	462
	80	14	447	3,20	424	464	12	442	4,59	415	491
2d	60	2	435	2,32	428	442	2	421	0,92	418	424
	70	8	446	4,06	423	473	–	–	–	–	–
	80	12	440	3,09	425	473	12	445	5,68	417	516
4d	60	4	435	0,76	431	439	2	467	0,69	465	470
	70	nicht geprüft									
	80	10	441	3,74	420	471	14	443	2,77	428	474

Dabei sind:

SL Lastniveau

l_{emb} Einbindelänge

In Abbildung 4-5 sind die Boxplots der Rohdichte für die Fichtenprobekörper in Abhängigkeit vom Lastniveau, der Einbindelänge und des Schraubentyps dargestellt. Man kann wiederum erkennen, dass sich eine relativ schmale Bandbreite ergibt. Jene Punkte, die außerhalb dieser Bandbreite liegen, wurden als Extremwerte detektiert. Auch bei der Rohdichte wurde die Breite der Box in Abhängigkeit der jeweils zu Grunde liegenden Anzahl an Versuchsdaten angepasst. Da keine signifikanten Unterschiede der Rohdichte zwischen den einzelnen Lastniveaus und Einbindelängen festgestellt werden konnten, kann davon ausgegangen werden, dass sich kein bzw. nur ein sehr marginaler Rohdichteinfluss auf die Ergebnisse der unterschiedlichen Konfigurationen einstellt.

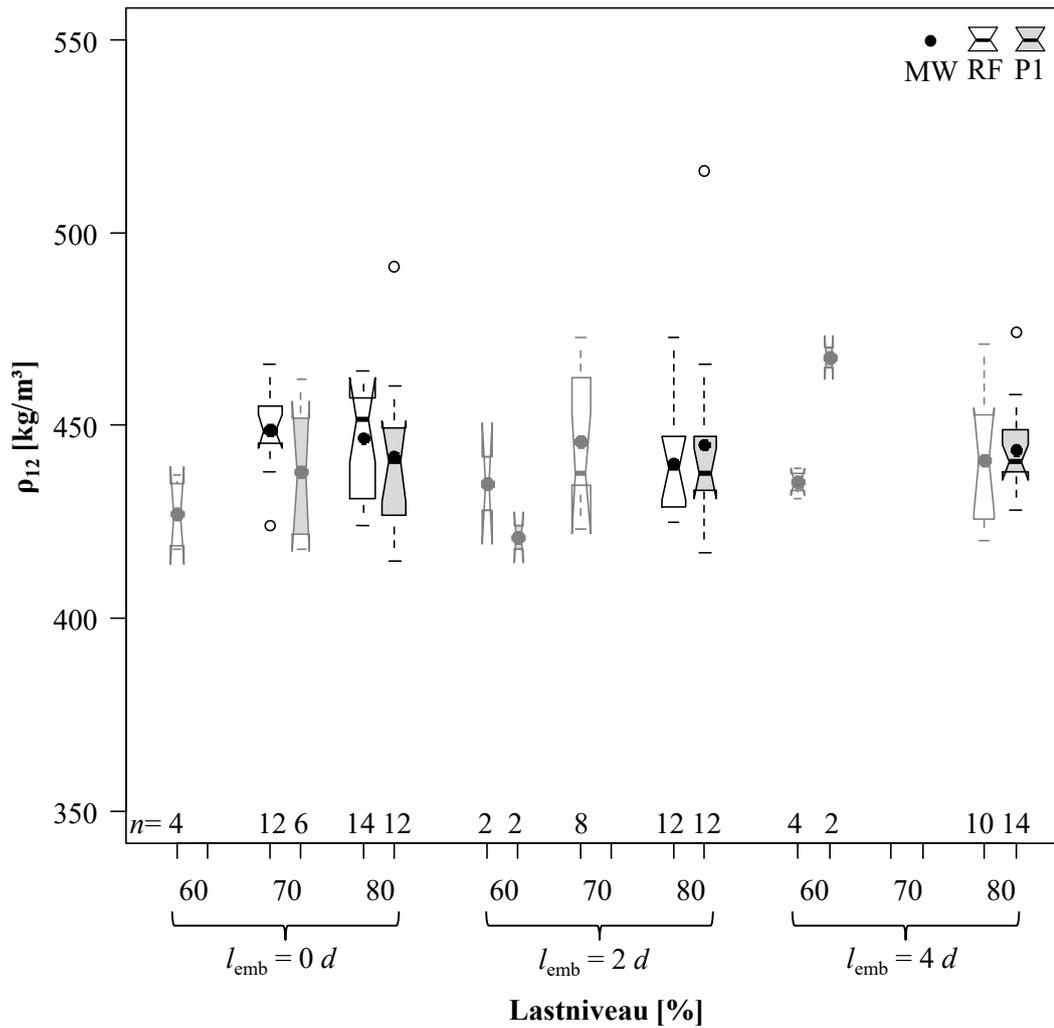


Abbildung 4-5: Boxplot Rohdichte ρ_{12} [kg/m³] für Fichte in Abhängigkeit vom Lastniveau, der Einbindelänge und des Schraubentyps

Die folgende Tabelle 4-6 gibt wichtige statistische Kennwerte der Rohdichte ρ_{12} für die Prüferien in Buchenholz in Abhängigkeit des Lastniveaus, der Einbindelänge und des Schraubentyps wieder. Da insgesamt nur 14 Datenpunkte der Rohdichte vorliegen, lassen sich noch keine tiefgehenden Aussagen treffen.

Tabelle 4-6: Rohdichte ρ_{12} für Buche in Abhängigkeit des Lastniveaus, der Einbindelänge und des Schraubentyps

		Referenzschraube					Prototyp 1				
l_{emb} [mm]	SL [%]	n [-]	mean [kg/m ³]	CV [%]	min [kg/m ³]	max [kg/m ³]	n [-]	mean [kg/m ³]	CV [%]	min [kg/m ³]	max [kg/m ³]
0d	60	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	70	2	729	0,62	726	732	4	687	1,99	674	699
	80	nicht geprüft									
2d	60	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	70	8	709	4,40	673	759	–	–	–	–	–
	80	nicht geprüft									

Dabei sind:

SL Lastniveau

l_{emb} Einbindelänge

In Abbildung 4-6 sind die Boxplots der bereits vorhandenen Versagensfälle für die Rohdichte der Buche in Abhängigkeit vom Lastniveau, der Einbindelänge und des Schraubentyps dargestellt. Da in dieser Darstellung dieselbe Skalierung gewählt wurde, kann man im Vergleich zur Fichte eine höhere Variabilität in der Rohdichte erkennen.

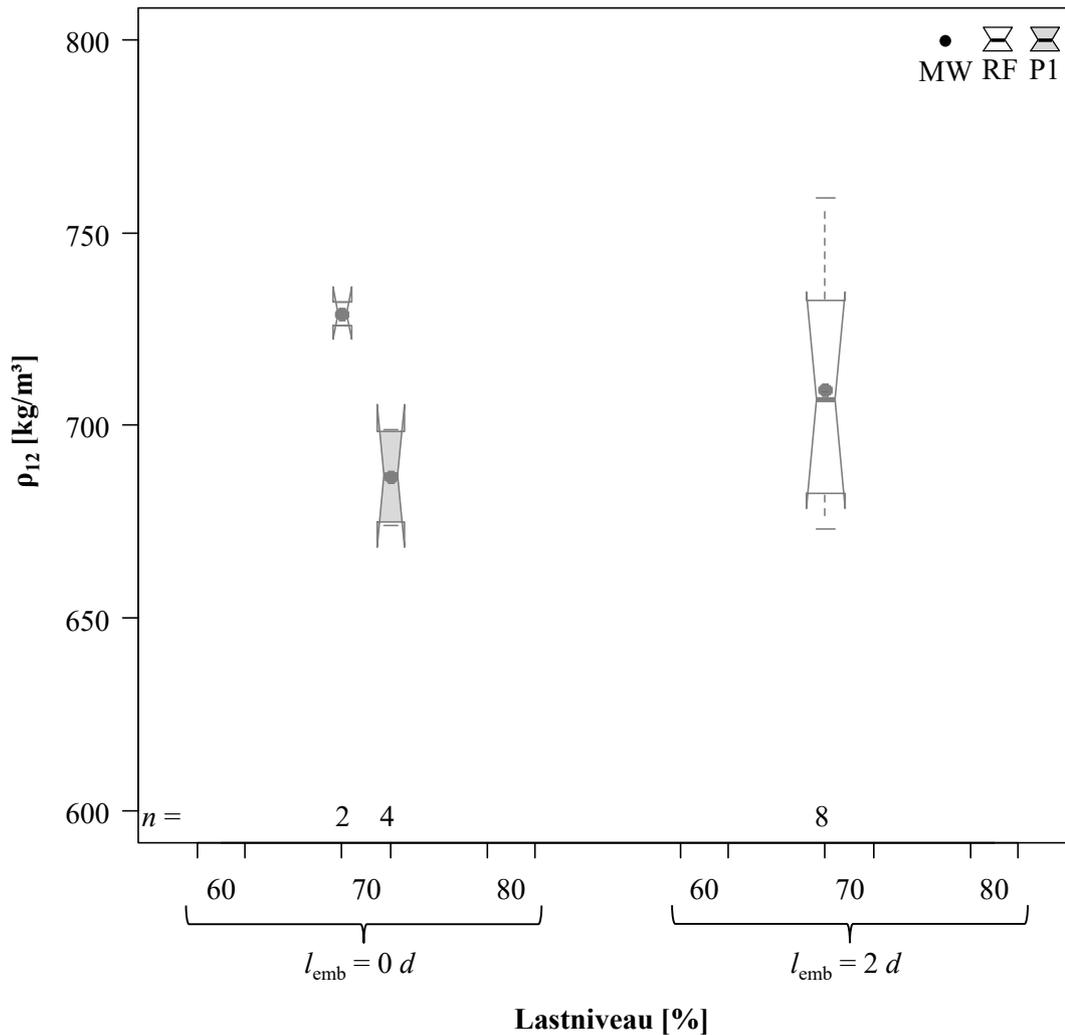


Abbildung 4-6: **Boxplot Rohdichte ρ_{12} [kg/m³] für Buche in Abhängigkeit vom Lastniveau, der Einbindelänge und des Schraubentyps**

Die folgende Tabelle 4-7 listet wichtige statistische Kennwerte der Rohdichte ρ_{12} für die Prüfserien mit BauBuche-Probekörpern in Abhängigkeit des Lastniveaus, der Einbindelänge und des Schraubentyps auf. In diesem Versuch liegen die Extremwerte für die einzelnen Serien zwischen 828 kg/m³ als Maximum und 770 kg/m³ als Minimum. Die Mittelwerte der einzelnen Serien schwanken in einem sehr kleinen Bereich zwischen 782 kg/m³ und 800 kg/m³. Der Variationskoeffizient nimmt über alle Serien betrachtet den verhältnismäßig geringsten Wert von maximal 1,8 % an. Auch bei der BauBuche ist die Anzahl der zu Grunde liegenden Daten aller Serien unterschiedlich und es liegen gegenwärtig bei einzelnen Serien nur wenige Datenpunkte vor. Das bedeutet, dass diese Daten erhebliche statistische Unsicherheit aufweisen können.

Tabelle 4-7: Rohdichte ρ_{12} für BauBuche in Abhängigkeit des Lastniveaus, der Einbindelänge und des Schraubentyps

		Referenzschraube					Prototyp 1				
l_{emb} [mm]	SL [%]	n [-]	mean [kg/m ³]	CV [%]	min [kg/m ³]	max [kg/m ³]	n [-]	mean [kg/m ³]	CV [%]	min [kg/m ³]	max [kg/m ³]
0d	60	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	70	12	793	1,32	778	813	2	794	0,43	791	796
	80	14	794	1,15	782	811	14	796	1,06	785	811
2d	60	4	793	0,74	785	798	2	782	1,13	776	788
	70	12	799	1,84	770	828	12	797	1,19	779	812
	80	14	800	1,77	777	821	14	795	1,53	779	815

Dabei sind:

SL Lastniveau

l_{emb} Einbindelänge

Die Boxplots in Abbildung 4-7 zeigen die Rohdichteverteilungen für BauBuche in Abhängigkeit vom Lastniveau, der Einbindelänge und des Schraubentyps. Man kann wiederum eine sehr schmale Bandbreite erkennen. Die Mittelwerte der Rohdichte gruppieren sich in etwa bei 800 kg/m³ und die Variabilität ist bei allen Serien annähernd konstant. Da auch bei der BauBuche keine signifikanten Unterschiede der Rohdichte zwischen den einzelnen Lastniveaus und Einbindelängen festgestellt werden konnten, kann davon ausgegangen werden, dass sich kein bzw. nur ein sehr marginaler Rohdichteinfluss auf die Ergebnisse der unterschiedlichen Konfigurationen einstellt.

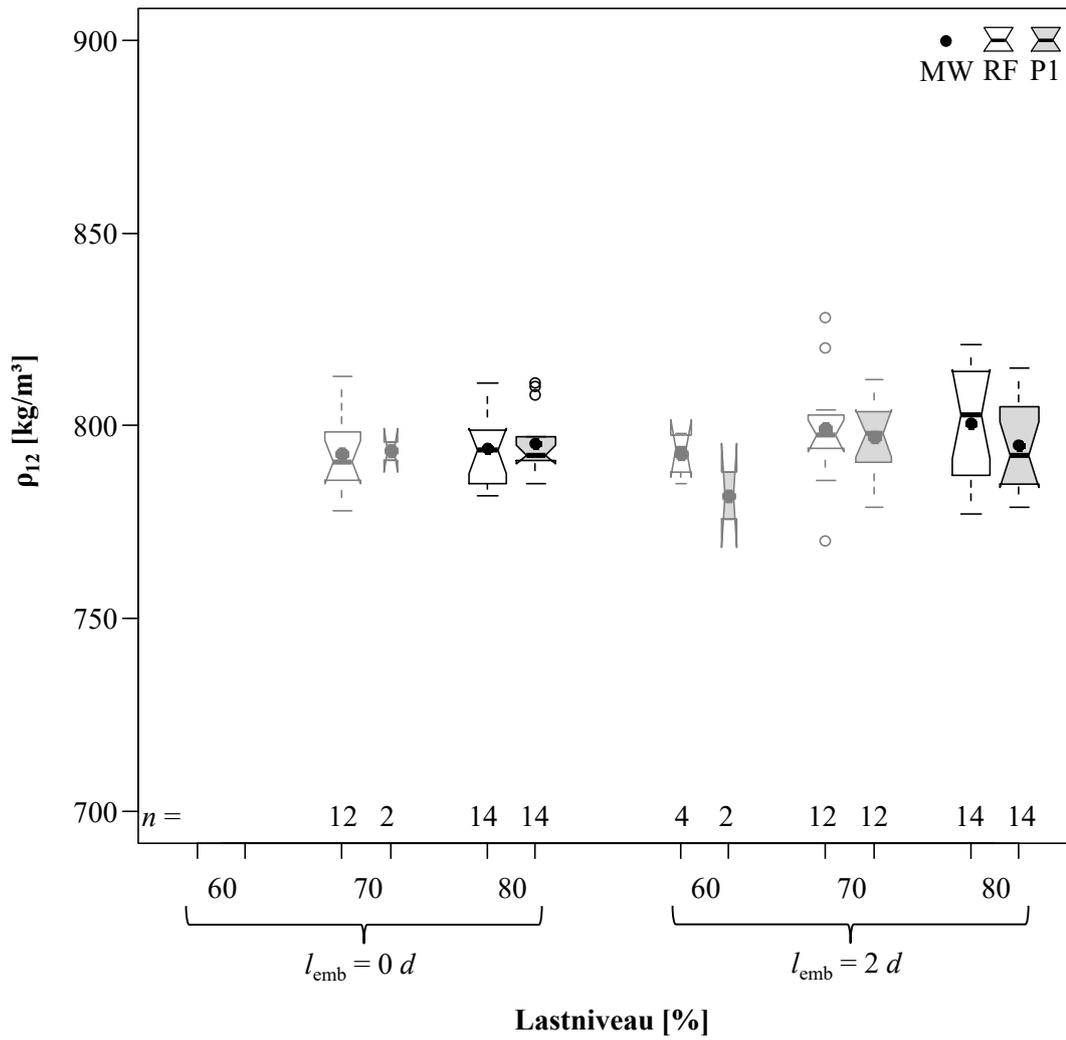


Abbildung 4-7: Boxplot Rohdichte ρ_{12} [kg/m³] für BauBuche in Abhängigkeit vom Lastniveau, der Einbindelänge und des Schraubentyps

4-1.2 DOL ERGEBNISDIAGRAMME

4-1.2.1 Allgemeines

Die Tabelle 4-8 gibt einen Gesamtüberblick über die Versagensfälle bis zum Stichtag 01.05.2018. Man kann erkennen, dass die Konfigurationen des 80 % Lastniveaus fast zur Gänze abgeschlossen sind und demzufolge in die Berechnung der Regressionsgleichungen einfließen. Beim Lastniveau von 60 % von $F_{ax,mean,mod}$ liegen zwar schon einige Versagensfälle vor, jedoch kann deren Rang noch nicht eindeutig bestimmt werden. Diese Versagensfälle werden in den folgenden DoL-Ergebnisdiagrammen mit einem vorläufigen Rang als gefüllte Punkte dargestellt. Der Vergleich der Holzarten bzw. dieser vs. dem -produkt macht deutlich, dass die BauBuche die meisten Versagensfälle zu verzeichnen hat. An zweiter Stelle liegt die Fichte und die Buche weist die wenigsten Versagensfälle auf. Bei der Buche kommt hinzu, dass das 80 % Lastniveau nicht geprüft wurde und beim 70 % Lastniveau noch nicht ausreichend viele Versagensfälle vorliegen, sodass deren endgültiger Rang nicht eindeutig bestimmt werden konnte. In Bezug auf die Einbindelänge ist zu sagen, dass bei der Fichte drei Ausprägungen geprüft wurden, bei der Buche und BauBuche hingegen nur zwei Ausprägungen.

Tabelle 4-8: Anzahl der Versagensfälle bis zum 01.05.2018 in Abhängigkeit vom Lastniveau, des Schraubentyps, der Holzart und der Einbindelänge

		Lastniveau <i>SL</i>					
		60 %		70 %		80 %	
		RF	P1	RF	P1	RF	P1
Fichte	0 d	4 ¹⁾	1 ¹⁾	12 ³⁾	7 ¹⁾	14 ³⁾	12 ²⁾
	2 d	3 ¹⁾	4 ¹⁾	10 ¹⁾	2 ¹⁾	12 ³⁾	12 ³⁾
	4 d	5 ¹⁾	3 ¹⁾	X ⁴⁾	X ⁴⁾	11 ²⁾	14 ³⁾
Buche	0 d	0 ¹⁾	0 ¹⁾	3 ¹⁾	6 ¹⁾	X ⁴⁾	X ⁴⁾
	2 d	0 ¹⁾	0 ¹⁾	10 ¹⁾	1 ¹⁾	X ⁴⁾	X ⁴⁾
BauBuche	0 d	1 ¹⁾	2 ¹⁾	13 ²⁾	2 ¹⁾	14 ³⁾	14 ³⁾
	2 d	5 ¹⁾	2 ¹⁾	13 ²⁾	13 ²⁾	14 ³⁾	14 ³⁾

Anmerkungen:

- 1) ... DoL-Versuch läuft
- 2) ... DoL-Versuch fast abgeschlossen (alle Ränge definiert; nur noch wenige offene Versagensfälle)
- 3) ... DoL-Versuch abgeschlossen
- 4) ... Konfiguration nicht geprüft

Im Folgenden wird der grundsätzliche Aufbau aller DoL-Ergebnisdiagramme (Abbildung 4-8 bis Abbildung 4-14) beschrieben. Auf der Abszisse wird die Zeit t in [h] in einem logarithmischen Maßstab der Basis 10 aufgetragen. Zur Veranschaulichung wurden zusätzlich Linien bei ausgewählten Zeiten von einem Jahr, zehn Jahren und fünfzig Jahren aufgetragen. Auf der Ordinate wird das Lastniveau SL in [%] aufgetragen. Dieses Lastniveau bezieht sich auf die in den Referenzversuchen ermittelte modifizierte mittlere Kurzzeittragfähigkeit $F_{ax,mean,mod}$ bzw. auf die Lognormalverteilung welche zur Repräsentanz der modifizierten Referenzversuche definiert wurde. Mit der Methode der „equal rank assumption“ (siehe Abschnitt 1-2.4) wurde jedem Probekörper eine dem Rang entsprechende individuelle Kurzzeitfestigkeit zugeordnet. Danach wurde das jeweilige Lastniveau für jeden einzelnen Probekörper berechnet. Um einen Vergleich mit der Literatur zu ziehen, wurde in jedem DoL-Ergebnisdiagramm die hyperbolische Madison Kurve dargestellt. Zusätzlich wurden die Trendlinien mit der Methode der Summe der kleinsten Fehlerquadrate („least square method“; LSM) für die Referenzschraube (RF) und die Prototypenschraube (P1) zuerst getrennt ermittelt und im Anschluss gemeinsam dargestellt und als „Trend DoL“ bezeichnet. Die zusätzlich dargestellten Prognose- und Konfidenzintervalle dienen der Veranschaulichung der

statistischen Unsicherheit bezogen in der Modellprognose für Einzel- sowie Mittelwerte. Diese Intervalle zeigen augenscheinlich die progressiv ansteigende statistische Unsicherheit bei entsprechender Extrapolation der Regressionsmodelle und Prognosen. In der Ermittlung der Regressionsparameter wurde der Referenzpunkt, welcher dem 100 % Lastniveau entspricht, nach einer schädigungsäquivalenten Transformation (siehe Abschnitt 1-2.7) mit einem Gewicht von zehn, entsprechend der Anzahl der zugrundeliegenden Referenzprüfungen, bewertet.

4-1.2.2 Fichte

$l_{emb} = 0 d$

In Abbildung 4-8 wird das DoL-Ergebnisdiagramm für Fichte ohne Einbindung gezeigt. Man kann erkennen, dass die Prototypenschraube (P1) in dieser Konfiguration ein besseres DoL-Verhalten wie die Referenzschraube (RF) im Sinne eines geringeren Abfalls der Tragfähigkeit mit zunehmender Standzeit aufweist. Zu beachten ist hierbei, dass für die Prototypenschraube deutlich weniger Datenpunkte zur Verfügung stehen und demzufolge die Trendlinie noch wenig Aussagekraft bzw. Gewicht besitzt. Der Trend beider Schraubentypen („Trend DoL“) nähert sich tangential an die hyperbolische Madison Kurve an, jedoch ist zu beachten, dass die Madison Kurve bei kurzen Standzeiten von $t < 3 h$ sogar die obere Grenze des Prognoseintervalls verlässt und eine damit durchgeführte Modellrechnung demzufolge zu einer signifikanten Überschätzung der experimentell bestimmten Kurzzeit-Tragfähigkeiten führen würde. Eine Prognose der Tragfähigkeit der Schrauben für $t = 50$ Jahre ist aufgrund des vergleichsweise kurzen Beobachtungszeitraumes nur mit einer weitreichenden Extrapolation der Trendlinien möglich und dementsprechend einer großen statistischen Unsicherheit unterworfen. Für den vorliegenden Beobachtungszeitraum von rund einem Jahr konstanter Belastung gibt das Prognoseintervall eine Reduktion der Tragfähigkeit auf einen Bereich von 57 % bis 76 % der Kurzzeittragfähigkeit an.

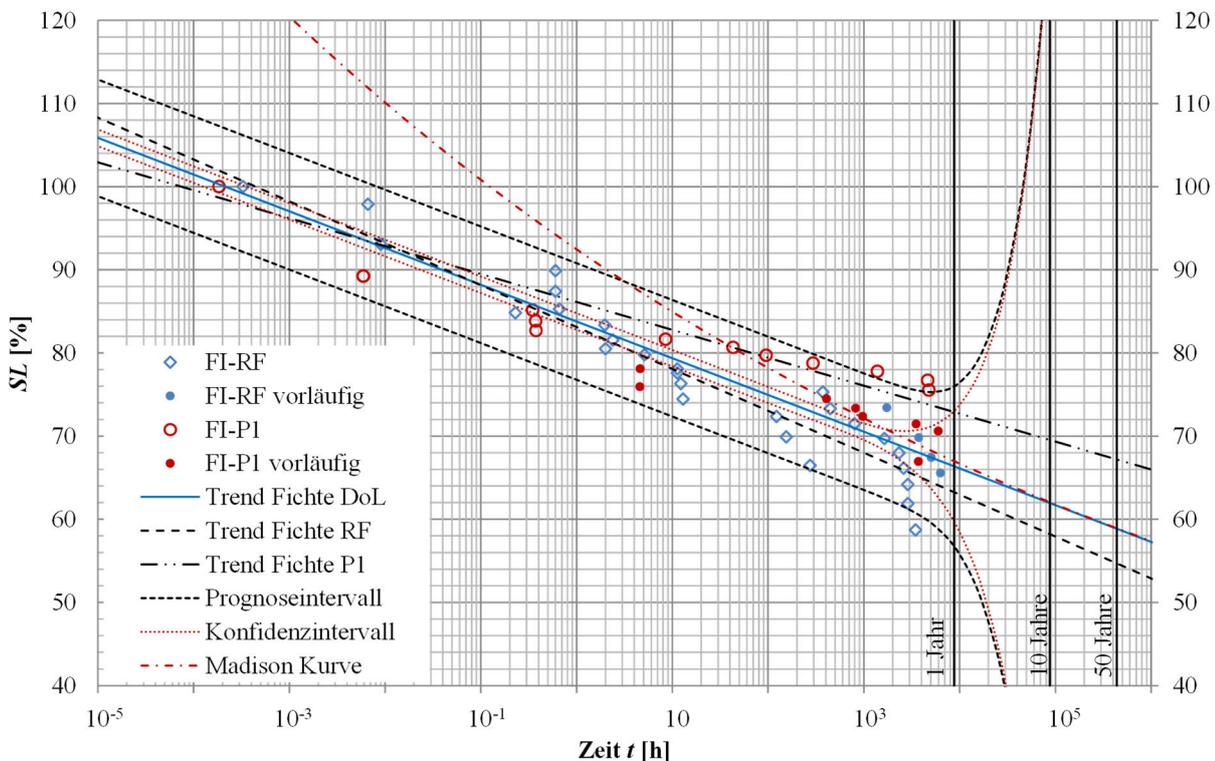


Abbildung 4-8: DoL-Ergebnisdiagramm für Fichte mit der Einbindelänge $l_{emb}=0d$ für die Referenzschraube RF und den Prototypen P1

$l_{emb} = 2 d$

In Abbildung 4-9 wird das DoL-Ergebnisdiagramm für Fichte für die Einbindelänge $l_{emb}=2 d$ gezeigt. Man kann erkennen, dass die Prototypenschraube (P1) auch in dieser Konfiguration ein besseres DoL-Verhalten wie die Referenzschraube (RF) aufweist. Bei beiden Trendlinien kann ein geringfügig besseres DoL Verhalten im Vergleich zur Konfiguration ohne Einbindung beobachtet werden. Vergleicht man die zugrunde gelegten Kurzzeittragfähigkeiten gemäß Tabelle 3-6 kann man erkennen, dass bei einer Einbindung sowohl für die Referenzschraube als auch für die Prototypenschraube deutlich höhere Kurzzeittragfähigkeiten ermittelt wurden. Bei Betrachtung des Prognoseintervalls kann man die höhere Streuung im Vergleich zur Konfiguration ohne Einbindung erkennen. Zusätzlich liegen noch wenige Versagensfälle im Bereich von einem Jahr vor, demzufolge weitet sich das Prognose- und Konfidenzintervall schon früher auf.

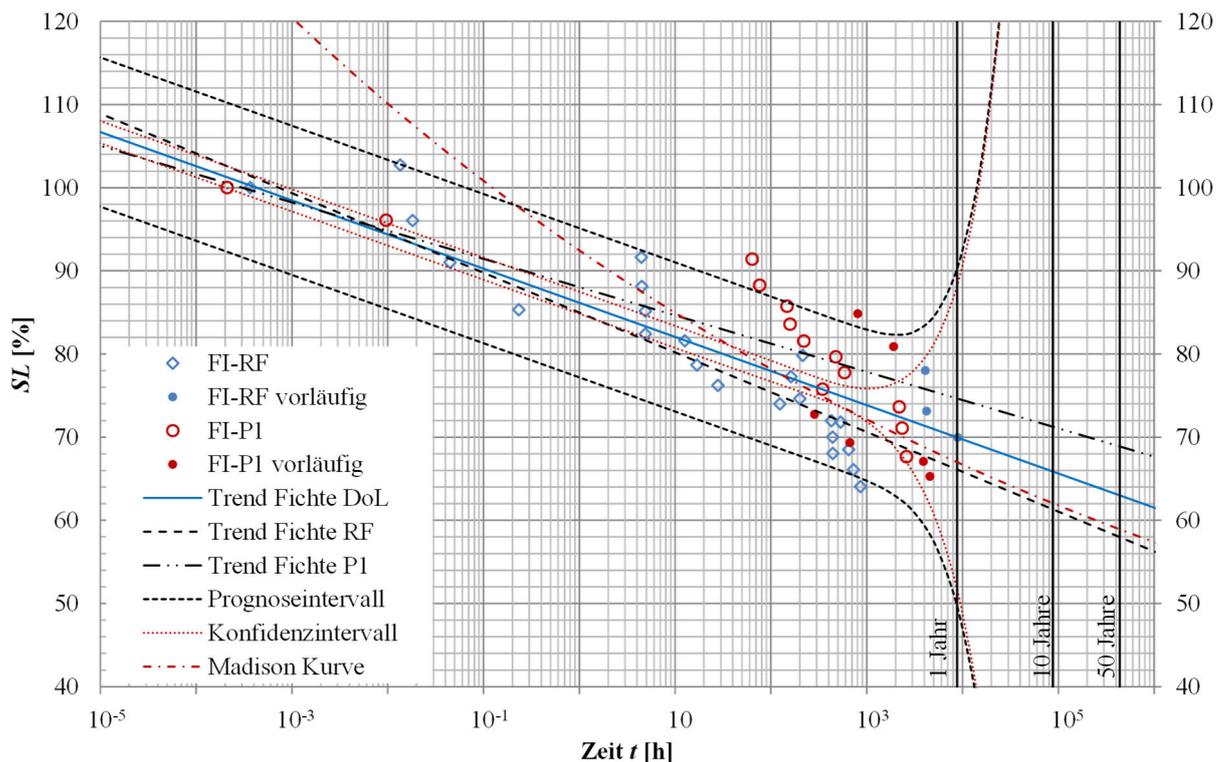


Abbildung 4-9: DoL-Ergebnisdiagramm für Fichte mit der Einbindelänge $l_{emb}=2d$ für die Referenzschraube RF und den Prototypen P1

$l_{emb} = 4 d$

In Abbildung 4-10 ist das DoL-Ergebnisdiagramm für Fichte für die Einbindelänge $l_{emb} = 4 d$ dargestellt. Für diese Konfiguration liegen sowohl für die Referenzschraube als auch für die Prototypenschraube sehr wenige Versagensfälle vor. Das 70 % Lastniveau wurde nicht geprüft, da im Zuge der Untersuchungen erkannt wurde, dass eine höhere Einbindelänge als $l_{emb} = 2 d$ keine oder nur geringfügige Auswirkungen auf den DoL-Effekt hat. Für die Prototypenschraube kann man erkennen, dass es zu einem enormen Abfall der Tragfähigkeit kommt. Bei den Referenzversuchen lag für Fichte bei $l_{emb} = 4 d$ des Prototypen gemäß Tabelle 3-2 eine Rohdichte von $\rho_{12,mean} = 460 \text{ kg/m}^3$ vor. In den Langzeitversuchen ergab sich gemäß Tabelle 4-5 für das Lastniveau von 80 % eine Rohdichte von $\rho_{12,mean} = 443 \text{ kg/m}^3$. Ein so geringer Rohdichteunterschied begründet jedoch keinesfalls den enormen Abfall der Tragfähigkeit im DoL-Verhalten der Prototypschraube. Bei diesem Diagramm sollten aufgrund der geringen Datenmenge auch die vorläufigen Ergebnisse betrachtet werden. Wird die gegenwärtige Lage der vorläufigen Daten im weiteren Prüfverlauf bestätigt, so verändern sich die Trendlinien beider Schraubentypen erheblich. Die

Trendlinie der Referenzschraube würde nach unten korrigiert werden und jene der Prototypenschraube nach oben.

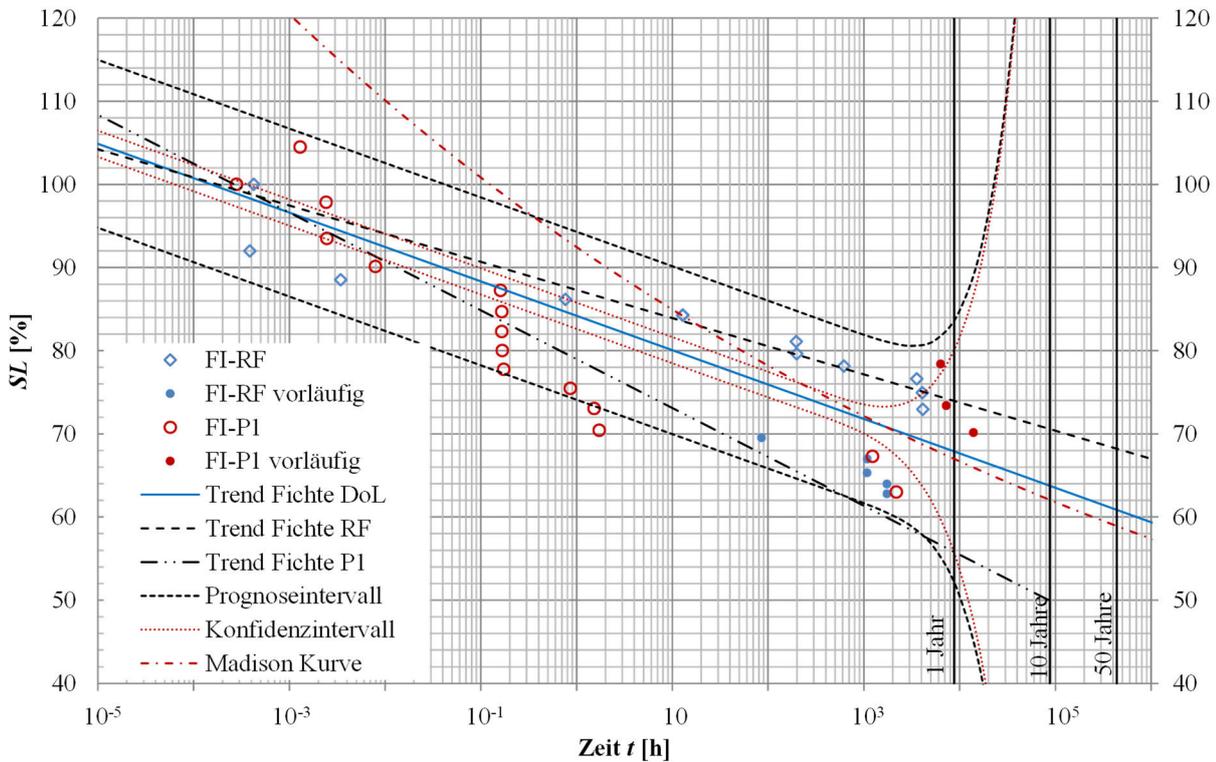


Abbildung 4-10: DoL-Ergebnisdiagramm für Fichte mit der Einbindelänge $l_{emb}=4d$ für die Referenzschraube RF und den Prototypen P1

Gemeinsame Darstellung aller geprüften Einbindelängen für Fichte

Nachdem kein signifikanter Einfluss der Einbindung auf das DoL-Verhalten der Ausziehfestigkeit festgestellt werden konnte, wird in Abbildung 4-11 das DoL-Ergebnisdiagramm für Fichte für alle geprüften Einbindelängen gemeinsam gezeigt. Dadurch war es möglich, aufgrund der größeren Datenbasis Trendlinien mit geringerer statistischer Unsicherheit in den Parametern zu bestimmen. Hier kann man erkennen, dass die Prototypenschraube ein geringfügig besseres DoL-Verhalten im Sinne eines flacheren Abfalls der Trendlinie aufweist. Die Trendlinie der Referenzschraube nähert sich tangential an die hyperbolische Madison Kurve an. Das Prognose- und Konfidenzintervall zeigen wiederum die statistischen Grenzen einer gegenwärtig sinnvollen Extrapolation auf. Bereits bei einem Jahr weiten sich diese Intervalle derart auf, sodass eine Extrapolation auf 50 Jahre wenig Aussagekraft aufweist. Für eine erste Abschätzung wurde diese aus Vergleichszwecken trotzdem durchgeführt, wobei für eine konstante Beanspruchung über einen Zeitraum von 50 Jahren unter den hier durchgeführten Bedingungen und in Abhängigkeit des Schraubentyps ein $k_{mod,ständig} = 0,58$ bis $0,64$ [-] resultiert.

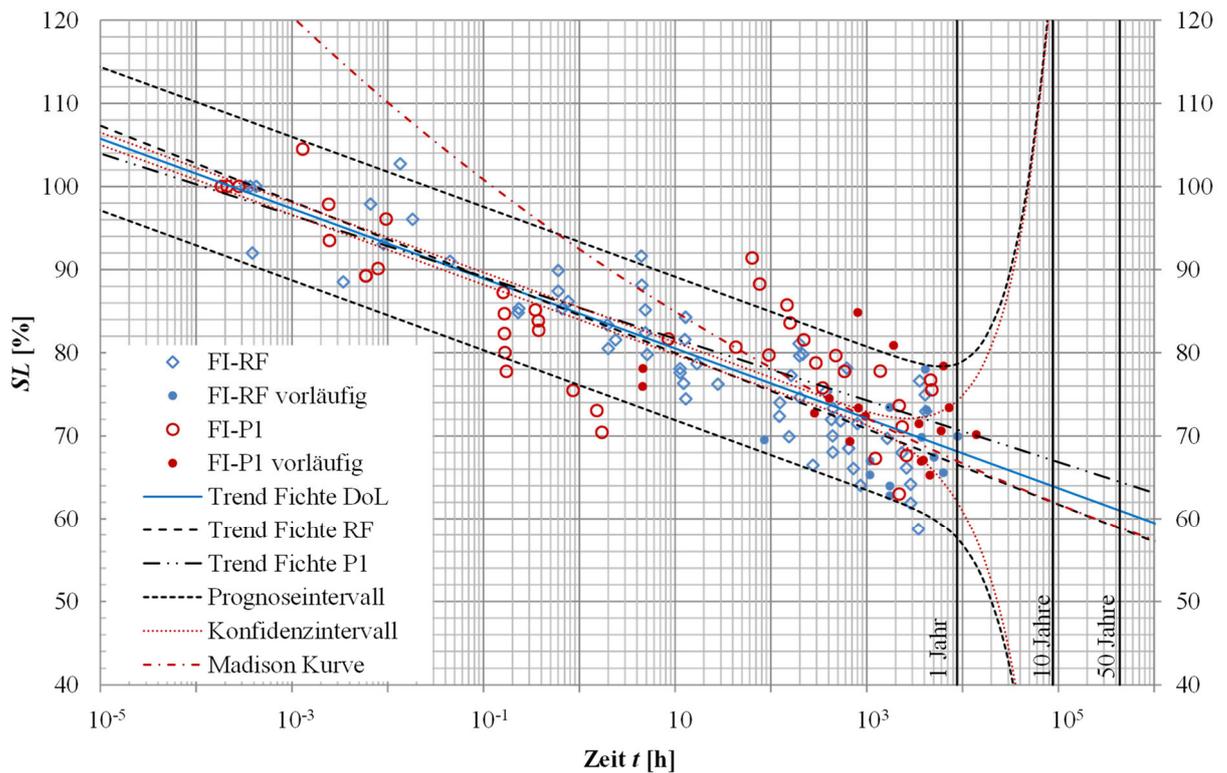


Abbildung 4-11: DoL-Ergebnisdiagramm für Fichte mit den Einbindelängen $l_{emb}=0d, 2d \text{ \& } 4d$ für die Referenzschraube RF und den Prototypen P1

4-1.2.3 BauBuche

$l_{emb} = 0 d$

In Abbildung 4-12 ist das DoL-Ergebnisdiagramm für BauBuche ohne Einbindung dargestellt. Im Vergleich zur Fichte stellt sich für BauBuche generell ein geringerer Streubereich ein, was auf die Homogenisierung bei der Herstellung dieses Holzwerkstoffes zurückzuführen ist. Man kann erkennen, dass die Prototypenschraube (P1) in dieser Konfiguration ein besseres DoL-Verhalten im Sinne eines geringeren Abfalls der Trendlinie wie die Referenzschraube (RF) aufweist. Der mittlere Trend („Trend-DoL“) nähert sich wiederum annähernd tangential an die Madison Kurve an.

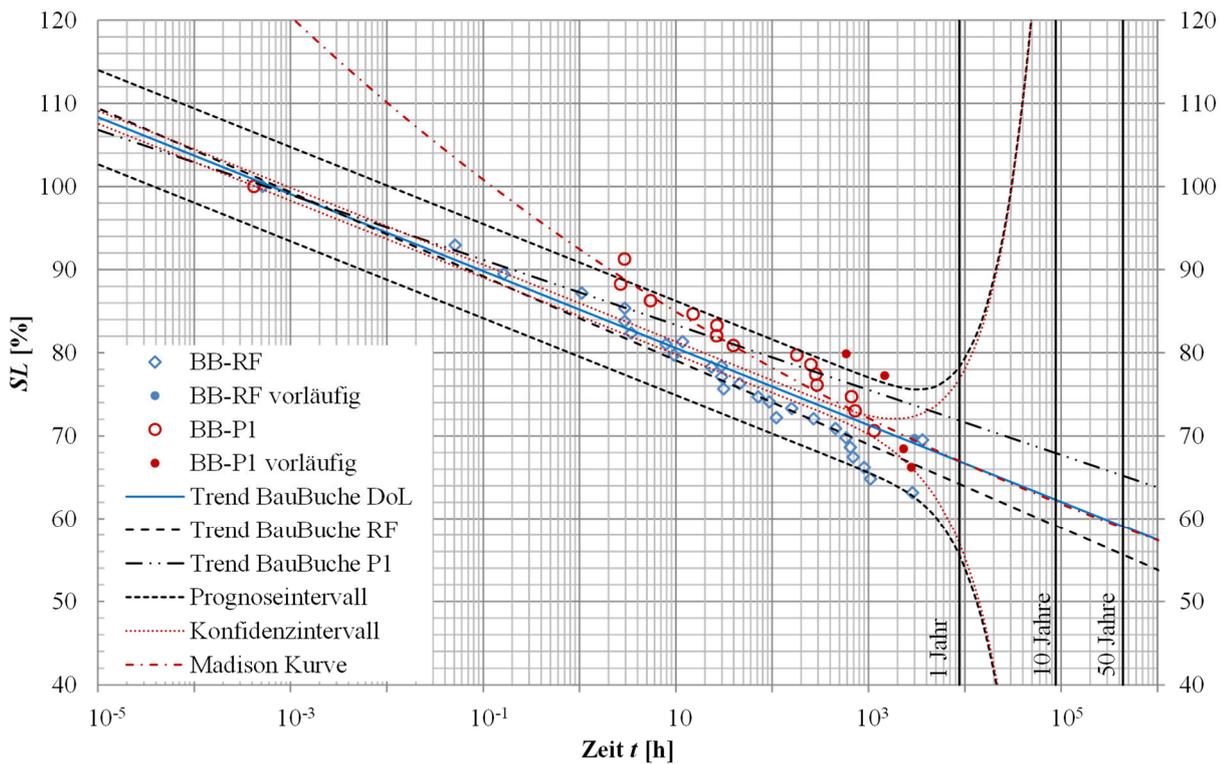


Abbildung 4-12: DoL-Ergebnisdiagramm für BauBuche mit der Einbindelänge $l_{emb}=0d$ für die Referenzschraube RF und den Prototypen P1

$l_{emb} = 2 d$

In Abbildung 4-13 ist das DoL-Ergebnisdiagramm für BauBuche für die Einbindelänge $l_{emb} = 2 d$ dargestellt. In dieser Konfiguration weist die Referenzschraube ein geringfügig günstigeres Verhalten im Vergleich zur Prototypschraube auf, jedoch ist zu beachten, dass fünf vorläufige Punkte vorliegen, die sich deutlich unterhalb der Trendlinie der Referenzschraube gruppieren. Wenn der Rang dieser Punkte und somit deren individuelles Lastniveau feststeht, so würde die Trendlinie beträchtlich nach unten korrigiert werden. Generell lässt sich zu diesem DoL-Ergebnisdiagramm noch sagen, dass das Prognoseintervall, wie auch bei allen anderen Konfigurationen, einen relativ gleichbleibenden Streubereich über die Zeit vorgibt.

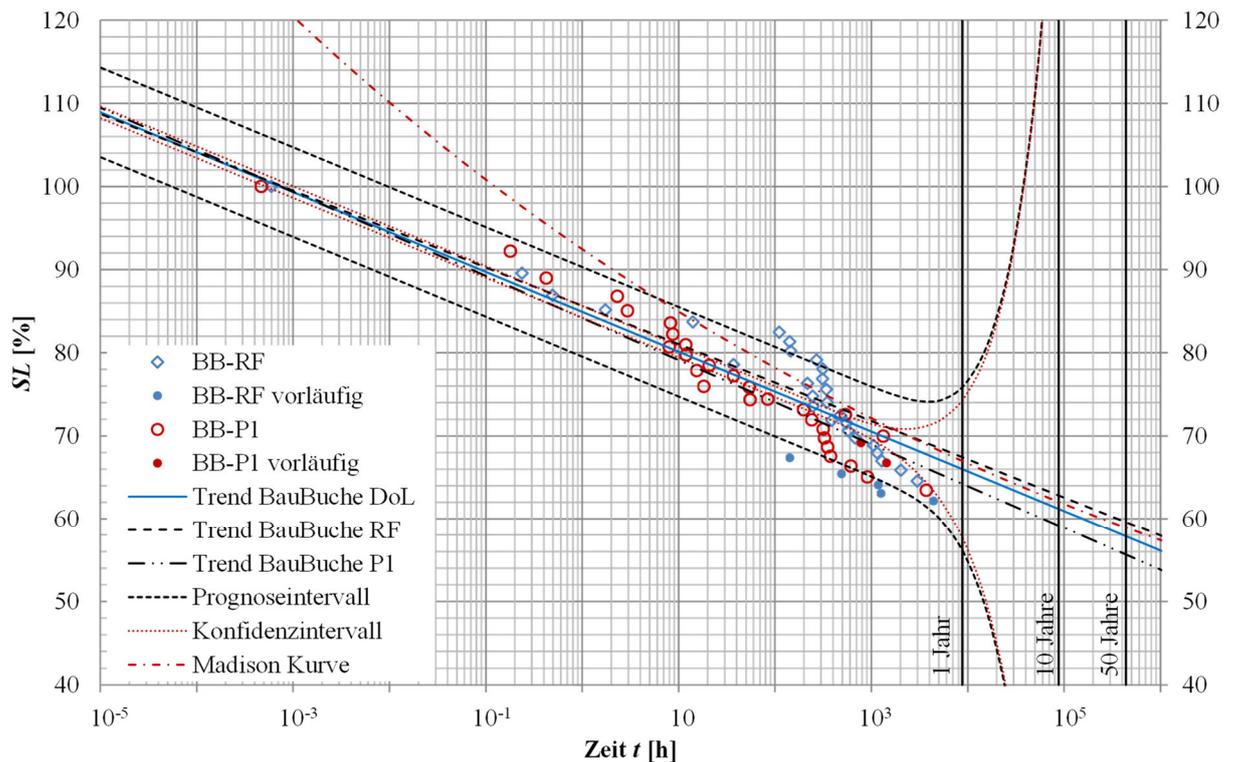


Abbildung 4-13: DoL-Ergebnisdiagramm für BauBuche mit der Einbindelänge $l_{emb}=2d$ für die Referenzschraube RF und den Prototypen P1

Gemeinsame Darstellung aller geprüften Einbindelängen für BauBuche

In Abbildung 4-14 wird das DoL-Ergebnisdiagramm für BauBuche beider Konfigurationen dargestellt. Es zeigt sich ein geringerer Streubereich über die Zeit im Vergleich zur Fichte. Zusätzlich ist interessant zu beobachten, dass die Trendlinien für die Referenzschraube und der Prototypschraube annähernd deckungsgleich sind. Demzufolge liegt auch der Trend beider Schraubentypen („Trend DoL“) im selben Bereich und nähert sich annähernd tangential an die Madison Kurve an. Bereits bei einem Jahr weiten sich die Prognose- und Konfidenzintervalle derart auf, sodass eine Extrapolation auf 50 Jahre wenig Aussagekraft aufweist. Für eine erste Abschätzung wurde diese aus Vergleichszwecken trotzdem durchgeführt, wobei $k_{mod,ständig}$ dabei einen Wert von rund 0,58 [-] annimmt.

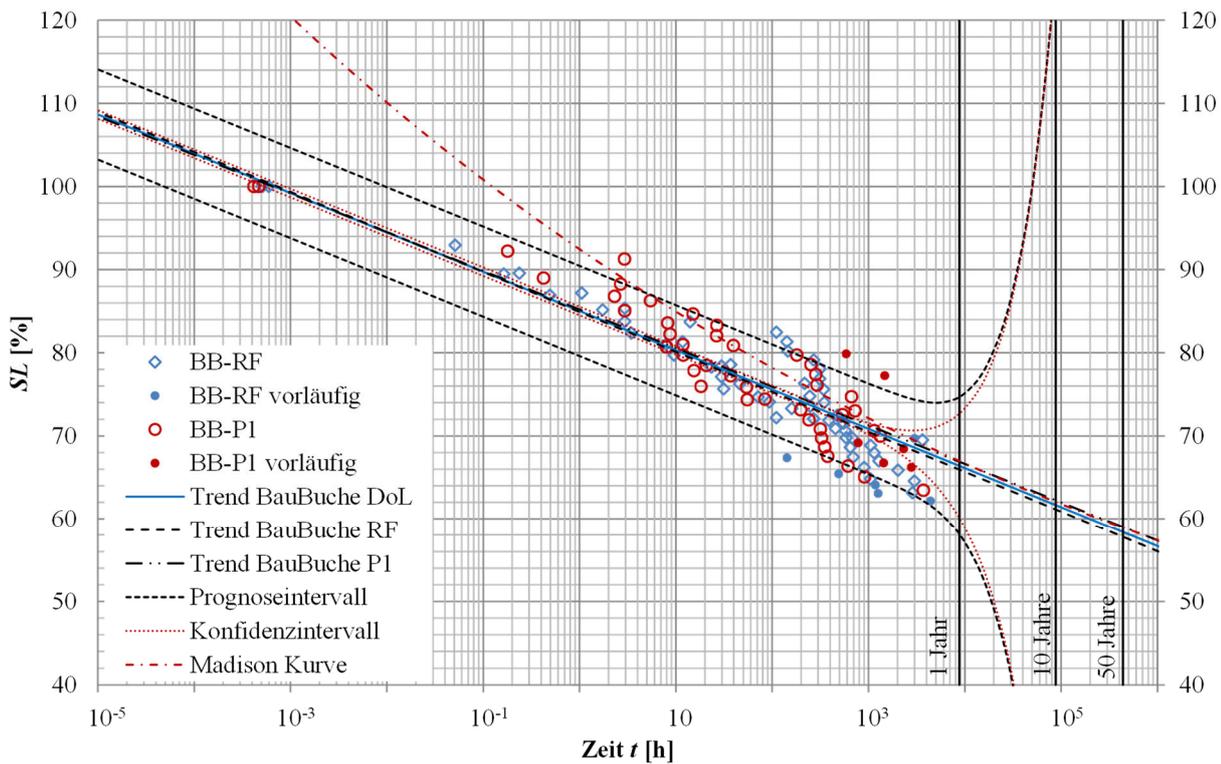


Abbildung 4-14: DoL-Ergebnisdiagramm für BauBuche mit den Einbindelängen $l_{emb}=0d$ & $2d$ für die Referenzschraube RF und den Prototypen P1

In Tabelle 4-9 sind abschließend die Regressionsparameter der Trendlinien zusammengefasst. Die Gleichung für die Bestimmung der Trendlinien hat die Form:

$$SL = A - B \cdot \log(t_f) \tag{4.1}$$

mit:

- SLLastniveau (Verhältnis zwischen der Spannung und der statischen Kurzzeitfestigkeit) [%]
- t_f Zeit bis zum Versagen
- A, BModellparameter

Der Vergleich der Regressionsparameter zeigt, dass Fichte und BauBuche annähernd das gleiche DoL-Verhalten aufweisen. Die Parameter der Buche sind nur informativ dargestellt. Da für diese Holzart mangels Versagensfälle keine Datenpunkte der DoL-Untersuchung zur Kalibrierung der Regressionsgleichungen vorliegen, wurden ausschließlich jene Punkte aus den ergänzenden Untersuchungen zu DoL herangezogen. Diese Punkte basieren auf relativ kurzen und noch dazu transformierten Versagenszeiten und sind daher mit hohen Unsicherheiten behaftet.

Bei Betrachtung aller Regressionsparameter kommt man zu dem Schluss, dass die Einbindelänge keine signifikanten Auswirkungen auf das DoL-Verhalten hat. Im Vergleich der Schraubentypen kann man erkennen, dass der Prototyp ein geringfügig besseres DoL-Verhalten aufweist als die Referenzschraube. Der Nachweis des Prototyp 1 über die Tauglichkeit im Langzeitvergleich gilt somit unter Berücksichtigung der derzeit noch relativ kurzen Beobachtungsdauer als erbracht. Man muss sich jedoch vor Augen führen, dass eine Extrapolation auf 50 Jahre derzeit einer hohen statistischen Unsicherheit unterworfen ist.

Tabelle 4-9: *Derzeitige Regressionsparameter der einzelnen Serien bei einer Beobachtungsdauer von rund einem Jahr*

		Referenzschraube (RF)		Prototyp 1 (P1)		RF & P1	
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
Fichte	0 d	83,1	5,04	86,1	3,36	83,8	4,42
	2 d	85,0	4,79	88,0	3,40	86,2	4,11
	4 d	87,3	3,38	79,0	5,88	84,2	4,14
	gesamt	84,5	4,56	85,4	3,71	84,7	4,20
Buche	0 d	–	–	–	–	–	–
	2 d	–	–	–	–	–	–
	gesamt	88,4 ¹⁾	3,78 ¹⁾	90,4 ¹⁾	3,65 ¹⁾	89,3 ¹⁾	3,72 ¹⁾
BauBuche	0 d	84,1	5,05	87,3	3,91	85,2	4,63
	2 d	85,7	4,62	84,2	5,06	84,9	4,80
	gesamt	84,9	4,81	85,2	4,64	85,0	4,73

Anmerkung:

¹⁾... Hier fließen mangels Versagensfälle nur Resultate aus den ergänzenden Untersuchungen mit ein.

KAPITEL 5: ERGÄNZENDE UNTERSUCHUNGEN ZU DOL

Zusätzlich zu den Langzeitversuchen wurden Versuche mit unterschiedlicher Belastungsgeschwindigkeit („ramp-loading“) durchgeführt. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde derart gewählt, dass ein Versagen in Abhängigkeit der Versuche im Mittel zwischen $t_{s,\text{mean}} = 0,28$ s und $t_{s,\text{mean}} = 17,25$ h eintrat; siehe Kapitel 2-2.3. Der Grund hierfür fußte auf der folgenden Hypothese: Wenn die bisher getroffenen Annahmen eines sukzessiven schädigungsäquivalenten Versagensmechanismus zutreffend sind, so muss sich zumindest bei der Ausziehfestigkeit f_{ax} eine Reduktion mit größer werdenden $t_{s,\text{mean}}$ zeigen. Im Folgenden werden neben den Ergebnissen der Ausziehfestigkeit f_{ax} , der axialen Steifigkeit K_{ser} sowie des Faktors $\eta_{F,\text{lin}}$ (dient für eine allfällige Definition bzw. Abgrenzung einer materialinhärenten Dauerstandfestigkeit) zusätzlich die Mittelwerte, Streuungen und Extremwerte der Holzfeuchtigkeit und der Rohdichte dieser Prüfserien angegeben und diskutiert.

Holzfeuchtigkeit

In Tabelle 5-1 sind die betreffenden statistischen Kennwerte der untersuchten Probekörper angegeben. Die Mittelwerte der Holzfeuchtigkeit weisen keine relevanten Abweichungen voneinander auf. Einzig bei den Ultralangzeitversuchen (ULZ) fällt die Holzfeuchtigkeit auf einen geringeren Wert ab. Dies ist eventuell darauf zurückzuführen, dass die von den Verhältnissen in der Klimakammer abweichenden klimatischen Bedingungen in der Prüfhalle (in etwa gleiche Temperatur, jedoch geringere relative Luftfeuchtigkeit) bei den etwa 24 Stunden andauernden Prüfungen bereits einen Einfluss auf die Holzfeuchte der Probekörper ausüben. Die Variationskoeffizienten sind bei allen durchgeführten Prüfungen als gering einzustufen und variieren zwischen 1,2 % und 4,4 %. Im direkten Vergleich zwischen den Schraubentypen kann man erkennen, dass nahezu kein Unterschied innerhalb der einzelnen Gruppen besteht. Die Extremwerte variieren zwischen 12,8 % und 15,7 %.

Tabelle 5-1: Holzfeuchtigkeit u der Buchen-Prüfkörper bei $l_{emb} = 0$ d in Abhängigkeit des Schraubentyps und der Belastungsgeschwindigkeit

		Referenzschraube					Prototyp 1				
		n [-]	mean [%]	CV [%]	min [%]	max [%]	n [-]	mean [%]	CV [%]	min [%]	max [%]
BU	UKZ	10	14,7	2,3	14,2	15,2	10	14,6	2,8	13,8	15,0
	REF	7	14,8	2,0	14,4	15,3	7	15,1	1,2	14,8	15,3
	LZ	11	14,8	2,1	14,2	15,2	11	14,9	3,1	14,2	15,7
	ULZ	8	14,2	4,4	13,0	14,9	8	14,0	4,4	12,8	14,4

Dabei sind:

BU Buche

l_{emb} Einbindelänge

UKZ Ultrakurzzeitversuch ($t_{s,mean} = 0,28$ s)

REF Referenzversuch ($t_{s,mean} = 100$ s)

LZ Langzeitversuch ($t_{s,mean} = 53$ min)

ULZ Ultralangzeitversuch ($t_{s,mean} = 17,25$ h)

In Abbildung 5-1 sind die Boxplots der Holzfeuchtigkeit in Abhängigkeit der Prüfserie und des Schraubentyps angegeben. Die zuvor erläuterte Abnahme der Holzfeuchtigkeit sowie die Zunahme des Variationskoeffizienten der für die rd. 24 Stunden andauernden Prüfungen verwendeten Prüfkörper in anderen klimatischen Verhältnissen ist hier erneut zu erkennen.

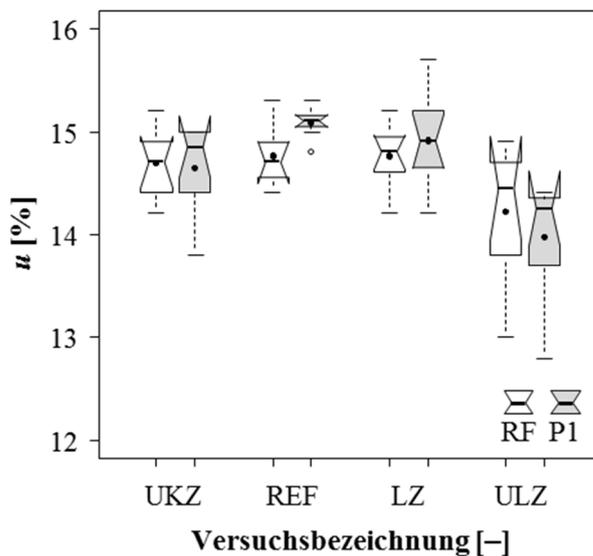


Abbildung 5-1: Boxplot Holzfeuchte u [%] der Buchen-Prüfkörper bei $l_{emb} = 0$ d in Abhängigkeit des Schraubentyps und der Belastungsgeschwindigkeit

Rohdichte

In Tabelle 5-2 sind die auf eine Referenzholzfeuchte von $u = 12\%$ korrigierten Rohdichte-Kennwerte der Prüfserien angegeben. Über alle Versuche ergibt sich eine mittlere Rohdichte von rund $\rho_{12} = 720 \text{ kg/m}^3$. Wie auch bei der Holzfeuchte nehmen die Variationskoeffizienten einen geringen Wert an und variieren zwischen 4,8 % und 8,8 %. Der Minimalwert der Rohdichte liegt bei 596 kg/m^3 und der Maximalwert bei 847 kg/m^3 .

Tabelle 5-2: Rohdichte ρ_{12} der Buchen-Prüfkörper bei $l_{emb} = 0 \text{ d}$ in Abhängigkeit vom Schraubentyp und der Belastungsgeschwindigkeit

		Referenzschraube					Prototyp 1				
		<i>n</i> [-]	mean [kg/m ³]	CV [%]	min [kg/m ³]	max [kg/m ³]	<i>n</i> [-]	mean [kg/m ³]	CV [%]	min [kg/m ³]	max [kg/m ³]
BU	UKZ	10	744	8,2	631	847	10	703	7,6	596	765
	REF	7	754	8,6	639	843	7	699	4,8	632	734
	LZ	11	718	6,0	643	776	11	707	5,0	659	759
	ULZ	8	729	7,4	624	790	8	703	8,8	598	781

Dabei sind:

BUBuche

l_{emb} Einbindelänge

UKZUltrakurzzeitversuch ($t_{s,mean} = 0,28 \text{ s}$)

REFReferenzversuch ($t_{s,mean} = 100 \text{ s}$)

LZLangzeitversuch ($t_{s,mean} = 53 \text{ min}$)

ULZUltralangzeitversuch ($t_{s,mean} = 17,25 \text{ h}$)

In Abbildung 5-2 sind die Boxplots der Rohdichten der einzelnen Serien getrennt nach dem Schraubentyp graphisch dargestellt. Man kann erkennen, dass die Mittelwerte und Medianwerte nahezu zusammenfallen. Über alle Serien betrachtet kann kein signifikanter Unterschied der Rohdichteverteilung festgestellt werden.

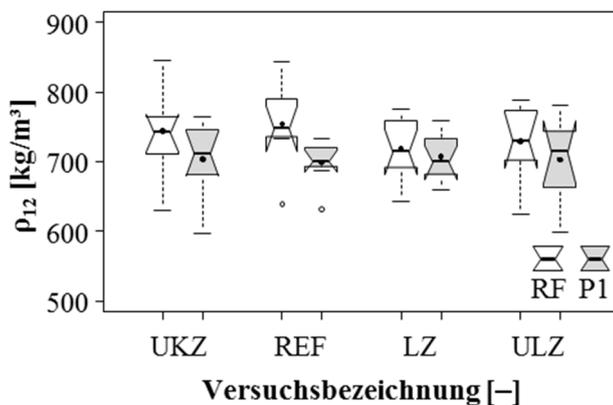


Abbildung 5-2: Boxplot Rohdichte ρ_{12} [kg/m³] der Buchen-Prüfkörper bei $l_{emb} = 0 \text{ d}$ in Abhängigkeit des Schraubentyps und der Belastungsgeschwindigkeit

Ausziehfestigkeit

In Tabelle 5-3 sind die statistischen Kennwerte der Ausziehfestigkeit f_{ax} der einzelnen Prüfserien dargestellt. Im Vergleich zum Prototyp 1 nehmen die Variationskoeffizienten bei der Referenzschraube höhere Werte an. Die mittleren Ausziehfestigkeitswerte der Referenzschraube liegen bei allen Serien über jenen der Prototypenschraube. Dies wurde auch bei den Referenzprüfungen beobachtet. Der Maximalwert von 13,9 N/mm² stellt sich bei den Ultrakurzzeitversuchen der Referenzschraube ein. Der Minimalwert von 5,7 N/mm² wird bei den Ultralangzeitversuchen für beide Schraubentypen erreicht.

Tabelle 5-3: Ausziehfestigkeit f_{ax} in Buche bei $l_{emb} = 0$ d in Abhängigkeit des Schraubentyps und der Belastungsgeschwindigkeit

		Referenzschraube					Prototyp 1				
		<i>n</i> [-]	mean [N/mm ²]	CV [%]	min [N/mm ²]	max [N/mm ²]	<i>n</i> [-]	mean [N/mm ²]	CV [%]	min [N/mm ²]	max [N/mm ²]
BU	UKZ	10	11,2	19,4	7,4	13,9	10	9,1	12,5	6,7	10,7
	REF	7	10,0	17,8	6,9	12,2	7	7,8	10,8	6,7	9,0
	LZ	11	8,8	17,6	6,9	12,1	11	7,8	15,3	6,3	10,6
	ULZ	8	8,9	19,8	5,7	10,7	8	7,6	18,2	5,7	9,2

Dabei sind:

BUBuche

l_{emb} Einbindelänge

UKZUltrakurzzeitversuch ($t_{s,mean} = 0,28$ s)

REFReferenzversuch ($t_{s,mean} = 100$ s)

LZLangzeitversuch ($t_{s,mean} = 53$ min)

ULZUltralangzeitversuch ($t_{s,mean} = 17,25$ h)

In Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 sind die Boxplots der Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit der Prüfzeit in einem logarithmischen Maßstab der Basis 10 aufgetragen. Die Lage der Boxplots der einzelnen Prüfserien entspricht dabei der mittleren Versagensdauer jeder Serie. Wie erwartet zeigt sich eine Reduktion der Ausziehfestigkeit mit zunehmender Belastungsdauer, welche bei der Referenzschraube im Vergleich zum Prototyp 1 deutlicher ausgeprägt ist, vgl. die Steigungsparameter der Regressionsmodelle in Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4. Zu beachten ist allerdings, dass die Zeitachse logarithmisch skaliert ist, um die große Bandbreite der Versagenszeiten abdecken zu können. Die angegebenen Zeiten beziehen sich auf den Versagenszeitpunkt aufgrund einer „ramp-loading“ Belastung. Bei einer schädigungsäquivalenten Umrechnung auf eine konstante Belastung kommt es zu einer deutlichen Verkürzung der Versagenszeit, jedoch ändert sich die Steigung der Geraden nicht, da sämtliche Daten in gleicher Weise transformiert werden.

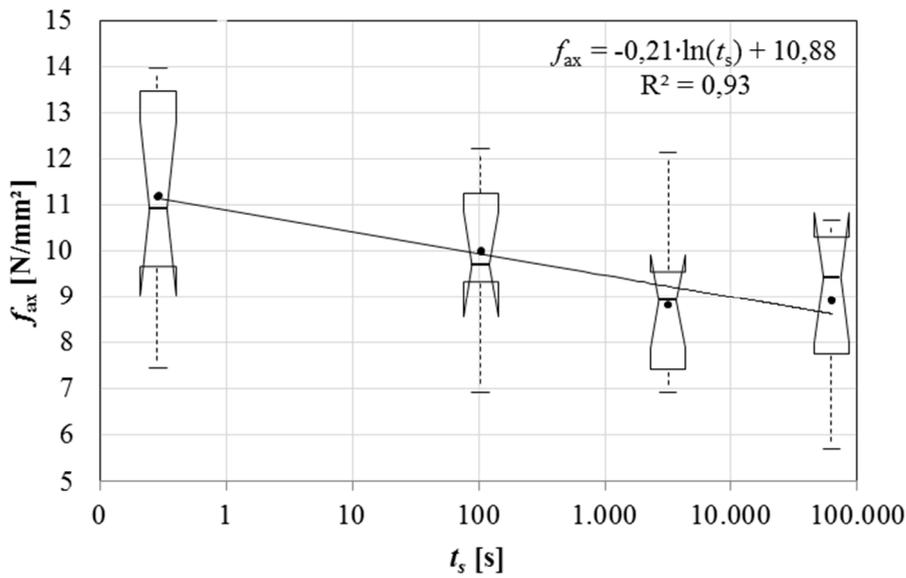


Abbildung 5-3: Boxplot Referenzschraube: Ausziehfestigkeit f_{ax} [N/mm²] in Buche bei $l_{emb} = 0$ d in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit

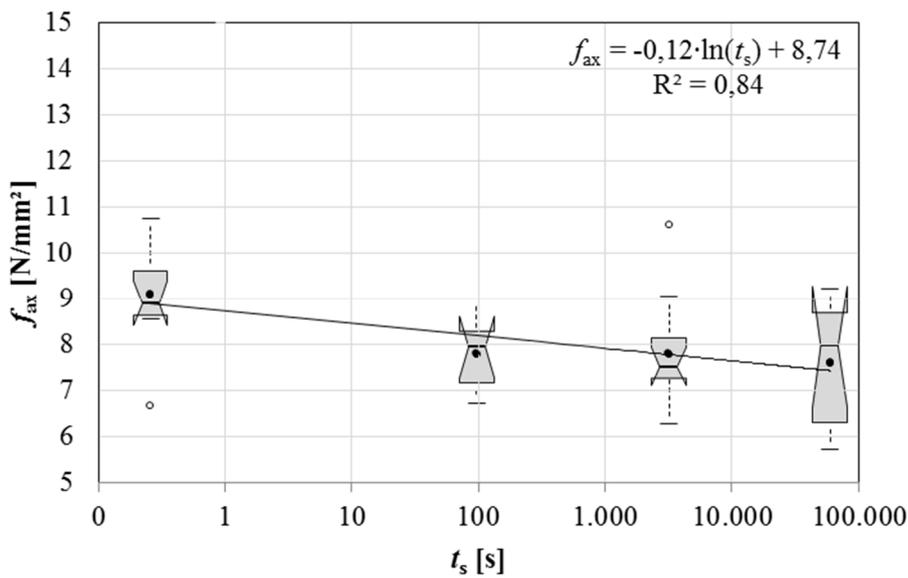


Abbildung 5-4: Boxplot Prototyp 1: Ausziehfestigkeit f_{ax} [N/mm²] in Buche bei $l_{emb} = 0$ d in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit

Ausziehfestigkeit korrigiert

Um den Rohdichteinfluss auszuschließen, werden die Ausziehfestigkeiten auf eine Referenzrohddichte von $\rho_{12} = 720 \text{ kg/m}^3$ und mit Potenzfaktoren gemäß Reichinger (2017) korrigiert. Diese Potenzfaktoren k_p nehmen dabei für die Referenzschraube einen Wert von $k_p = 1,71$ und für den Prototyp 1 einen Wert von $k_p = 1,58$ an. Wenn man nun Tabelle 5-3 mit Tabelle 5-4 vergleicht, in letzterer sind die statistischen Kennwerte der korrigierten Ausziehfestigkeit enthalten, kann man erkennen, dass der Variationskoeffizient bei den korrigierten Ausziehfestigkeiten deutlich sinkt. Weiterhin ist die Abnahme der Ausziehfestigkeit mit zunehmender Belastungsdauer gegeben.

Tabelle 5-4: *korrigierte Ausziehfestigkeit $f_{ax,korr}$ in Buche bei $l_{emb} = 0 \text{ d}$ in Abhängigkeit des Schraubentyps und der Belastungsgeschwindigkeit*

		Referenzschraube					Prototyp 1				
		<i>n</i>	mean	CV	min	max	<i>n</i>	mean	CV	min	max
		[-]	[N/mm ²]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
BU	UKZ	10	10,5	9,7	9,3	12,3	10	9,4	11,0	8,1	11,6
	REF	7	9,2	12,4	7,8	11,5	7	8,1	7,1	7,2	8,9
	LZ	11	8,8	11,3	7,3	10,9	11	8,0	9,4	6,8	9,8
	ULZ	8	8,7	10,8	7,2	9,7	8	7,8	9,3	6,7	8,7

Dabei sind:

BUBuche

l_{emb} Einbindelänge

UKZUltrakurzzeitversuch ($t_{s,mean} = 0,28 \text{ s}$)

REFReferenzversuch ($t_{s,mean} = 100 \text{ s}$)

LZLangzeitversuch ($t_{s,mean} = 53 \text{ min}$)

ULZUltralangzeitversuch ($t_{s,mean} = 17,25 \text{ h}$)

In Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 sind nun die Boxplots der korrigierten Ausziehfestigkeiten dargestellt. Für die Regressionsgleichungen ergibt sich für beide Schraubentypen annähernd dieselbe Steigung.

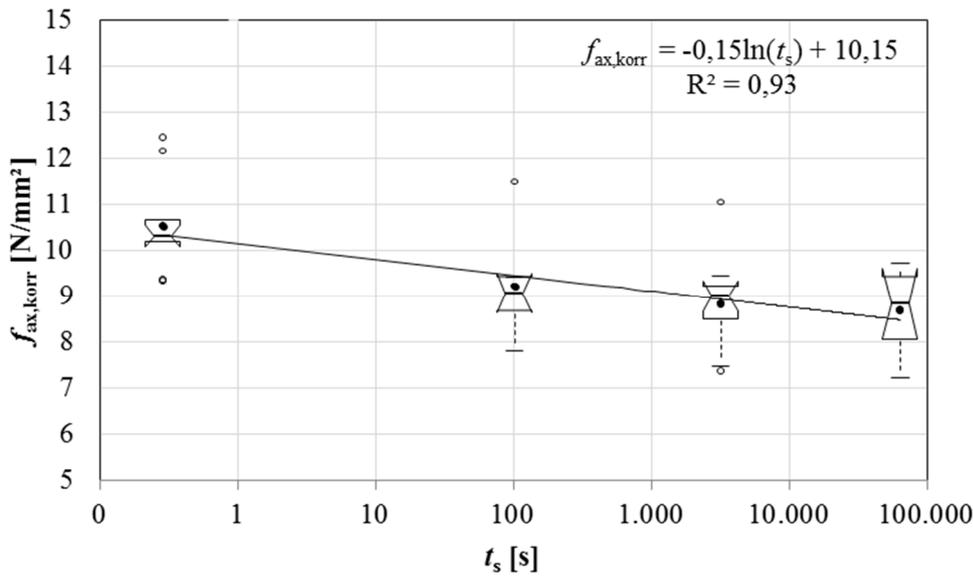


Abbildung 5-5: *Boxplot Referenzschraube: Ausziehfestigkeit $f_{ax,korr}$ [N/mm²] in Buche bei $l_{emb} = 0$ d in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit*

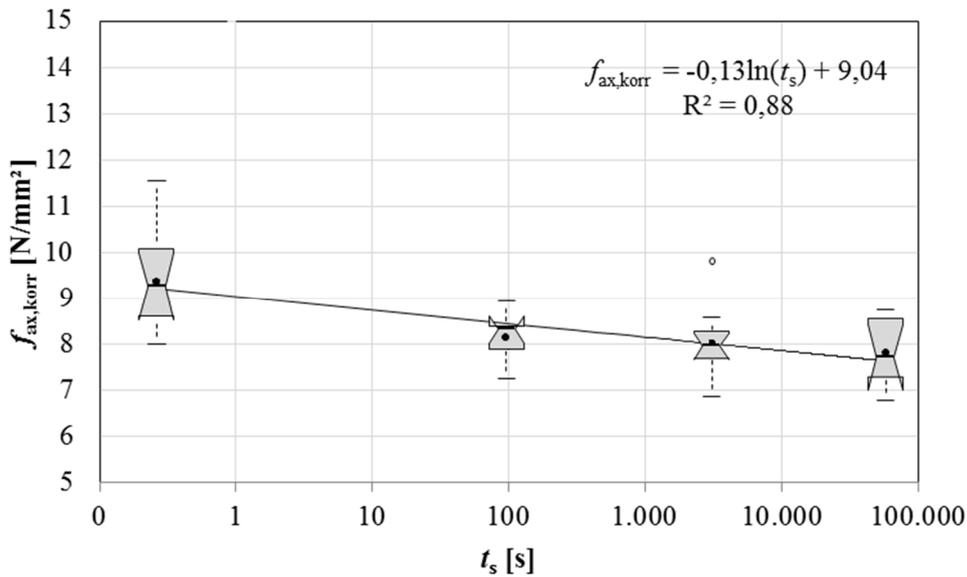


Abbildung 5-6: *Boxplot Prototyp 1: Ausziehfestigkeit $f_{ax,korr}$ [N/mm²] in Buche bei $l_{emb} = 0$ d in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit*

Steifigkeit

In Tabelle 5-5 sind die statistischen Kennwerte der axialen Steifigkeit K_{ser} in Abhängigkeit des Schraubentyps und der Prüfserie angegeben. Vergleicht man die Mittelwerte der axialen Steifigkeiten der beiden UKZ Serien, so kann man erkennen, dass deren Unterschied als vernachlässigbar eingestuft werden kann. Bei allen anderen Serien (REF, LZ und ULZ) kann man erkennen, dass der Prototyp 1 im Mittel deutlich steifer wie die Referenzschraube ist, jedoch können auch höhere Streuungen von K_{ser} für den Prototyp 1 beobachtet werden. Die geringsten Mittelwerte aller Steifigkeiten treten bei beiden Schraubentypen bei den Ultrakurzzeitversuchen auf und nehmen für die Referenzschraube einen Wert von 53,0 kN/mm und für den Prototyp 1 einen Wert von 55,4 kN/mm an. Für die verbleibenden Prüfserien REF, LZ und ULZ sind hingegen keine Unterschiede in der Höhe von K_{ser} erkennbar.

Tabelle 5-5: Steifigkeit K_{ser} in Buche bei $l_{emb} = 0 d$ in Abhängigkeit des Schraubentyps und der Belastungsgeschwindigkeit

		Referenzschraube					Prototyp 1				
		<i>n</i> [-]	mean [kN/mm]	CV [%]	min [kN/mm]	max [kN/mm]	<i>n</i> [-]	mean [kN/mm]	CV [%]	min [kN/mm]	max [kN/mm]
BU	UKZ	10	53,0	13,1	39,2	62,7	10	55,4	22,4	35,8	74,0
	REF	7	65,5	14,1	49,0	78,6	7	106,2	18,0	81,8	125,2
	LZ	11	74,6	10,9	61,2	86,8	11	92,1	19,3	72,9	131,0
	ULZ	8	65,6	18,1	50,5	83,6	8	100,3	32,5	67,8	166,2

Dabei sind:

BUBuche

l_{emb} Einbindelänge

UKZUltrakurzzeitversuch ($t_{s,mean} = 0,28$ s)

REFReferenzversuch ($t_{s,mean} = 100$ s)

LZLangzeitversuch ($t_{s,mean} = 53$ min)

ULZUltralangzeitversuch ($t_{s,mean} = 17,25$ h)

In Abbildung 5-7 und Abbildung 5-8 sind die Boxplots der Steifigkeiten in Abhängigkeit der Prüfzeit in einem logarithmischen Maßstab der Basis 10 aufgetragen. Für die Referenzschraube fallen die Mittelwerte und die Medianwerte nahezu zusammen. Für den Prototyp 1 hingegen ergibt sich bei den Referenzversuchen und Langzeitversuchen eine Differenz zwischen den Mittel- und Medianwerten. Ein Trend einer linearen Abnahme mit einer logarithmischen Zunahme der Prüfzeit bzw. Abnahme der Belastungsgeschwindigkeit wie bei den Ausziehfestigkeiten ist nicht zu erkennen.

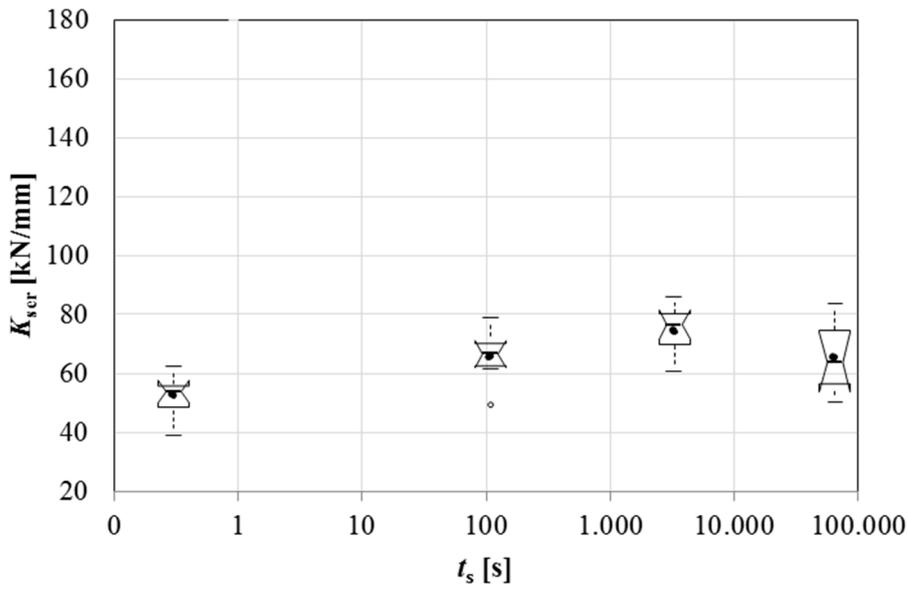


Abbildung 5-7: *Boxplot Referenzschraube: Steifigkeit K_{ser} [kN/mm] in Buche bei $l_{emb} = 0$ d in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit*

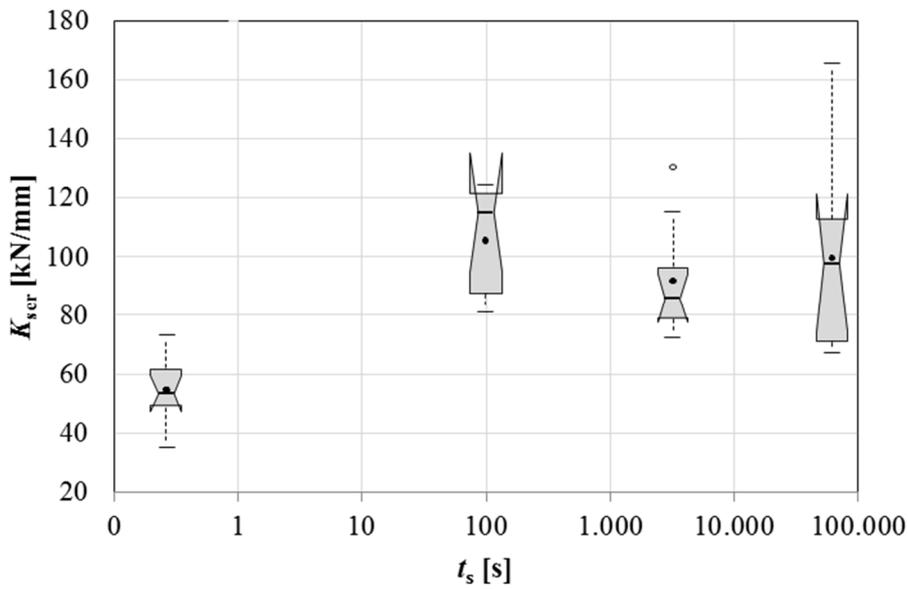


Abbildung 5-8: *Boxplot Prototyp 1: Steifigkeit K_{ser} [kN/mm] in Buche bei $l_{emb} = 0$ d in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit*

Quasi Linear-elastischer Anteil gemäß Modell im Kraft-Weg Diagramm

Der Maximalwert des quasi linear-elastischen Anteils gemäß dem Modell von Brandner et al. (2017) des Kraft-Weg Diagrammes wird in weiterer Folge als Prozentsatz der Maximallast des jeweiligen Versuchs ausgedrückt und charakterisiert den Übergang der Kraft-Weg-Beziehung in den nichtlinearen Bereich. Wie bereits in Kapitel 2-2.3 erwähnt, gilt die Hypothese, dass dieser Grenzprozentsatz einen Hinweis auf eine mögliche Dauerstandfestigkeit geben kann. Dieser Zustand der Dauerstandfestigkeit gilt nach dieser Hypothese als erreicht bzw. abgesichert, wenn dieser Übergang mit zunehmender Belastungsdauer gegen einen stabilen Wert konvergiert.

Die Maximalwerte des linear-elastischen Anteils treten bei beiden Schraubentypen bei den Ultrakurzzeitversuchen auf und nehmen für die Referenzschraube einen Wert von rd. 79 % und für den Prototyp 1 einen Wert von 69 % von F_{\max} an. Auch die Mittelwerte erreichen für beide Schraubentypen den höchsten Wert bei den Ultrakurzzeitversuchen. Bei allen anderen Prüferien variieren die Mittelwerte zwischen 30 % und 40 %.

Tabelle 5-6: *linear elastischer Anteil $\eta_{F,\text{lin}}$ in Buche bei $l_{\text{emb}} = 0 \text{ d}$ in Abhängigkeit des Schraubentyps und der Belastungsgeschwindigkeit*

		Referenzschraube					Prototyp 1				
		<i>n</i> [-]	mean [%]	CV [%]	min [%]	max [%]	<i>n</i> [-]	mean [%]	CV [%]	min [%]	Max [%]
BU	UKZ	10	71,3	10,0	53,8	78,9	10	55,5	21,3	31,3	69,0
	REF	7	33,6	25,1	21,9	46,9	7	29,1	19,6	21,4	38,2
	LZ	11	34,4	13,1	28,9	45,3	11	34,7	12,5	28,0	42,5
	ULZ	8	40,4	30,7	28,7	55,5	8	31,6	15,3	25,6	37,5

Dabei sind:

BUBuche

l_{emb} Einbindelänge

UKZUltrakurzzeitversuch ($t_{s,\text{mean}} = 0,28 \text{ s}$)

REFReferenzversuch ($t_{s,\text{mean}} = 100 \text{ s}$)

LZLangzeitversuch ($t_{s,\text{mean}} = 53 \text{ min}$)

ULZUltralangzeitversuch ($t_{s,\text{mean}} = 17,25 \text{ h}$)

Die Boxplots in Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10 zeigen den Verlauf der quasi linear-elastischen Anteile in Abhängigkeit der Prüfzeit in einem logarithmischen Maßstab der Basis 10. Zwischen den Ultrakurzzeitversuchen und den Referenzversuchen nimmt $\eta_{F,\text{lin}}$ ab und bleibt dann annähernd konstant was auf die Konvergenz auf einen stabilen Wert von rund 34 % für $\eta_{F,\text{lin}}$ hinweist.

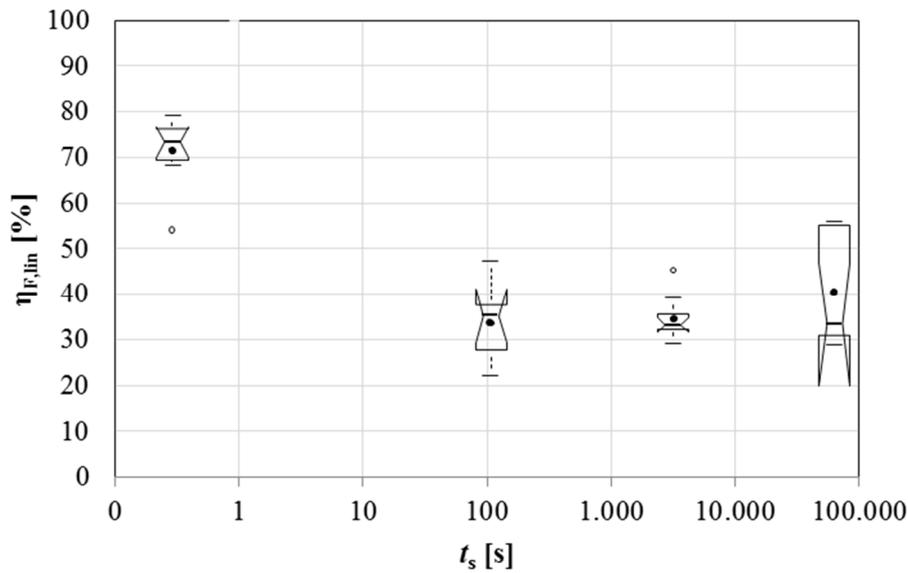


Abbildung 5-9: *Boxplot Referenzschraube: linear elastischer Anteil $\eta_{F,lin}$ [%] in Buche bei $l_{emb} = 0$ d in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit*

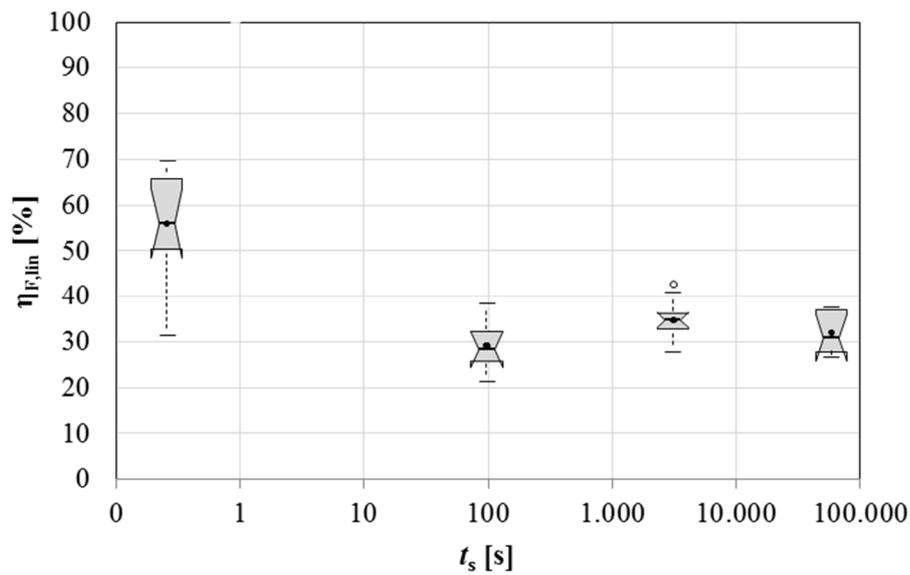


Abbildung 5-10: *Boxplot Prototyp 1: linear elastischer Anteil $\eta_{F,lin}$ [%] in Buche bei $l_{emb} = 0$ d in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit*

DoL-Ergebnisdiagramm für Buche

Da im DoL-Ergebnisdiagramm für Buche nur die Daten der ergänzenden Untersuchungen einfließen, wurde dieses Diagramm hier dargestellt, siehe Abbildung 5-11. Die gefüllten Punkte zeigen erste Ergebnisse der DoL Untersuchungen, jedoch haben diese keinen Einfluss auf die berechneten Regressionsfunktionen, da deren zugeordneter Rang noch nicht endgültig definiert ist. Sowohl das Prognose- als auch das Konfidenzintervall machen deutlich, dass eine Extrapolation der Trendlinien in diesem Ausmaß nicht zulässig ist. Bei bereits zehn Stunden Belastung weiten sich diese Intervalle derart auf, sodass eine Vorhersage für 50 Jahre nicht zweckmäßig ist. Der Vergleich mit den anderen DoL-Ergebnisdiagrammen lässt jedoch die Aussage zu, dass sich die Schrauben in Buche langfristig günstiger im Sinne eines geringeren Verlust an Ausziehfestigkeit mit zunehmender Standzeit verhalten als in Fichte und in BauBuche. Betrachtet man die Trendlinien der unterschiedlichen Schraubentypen, so kann man erkennen, dass diese nicht signifikant voneinander abweichen und dass der Prototyp 1 sogar etwas besser im Vergleich zur Referenzschraube abschneidet.

Ziel dieser ergänzenden Untersuchungen war es die Bandbreite der DoL Untersuchungen nach links, für sehr kurze Versagensdauern, zu erweitern und mit den Ergebnissen der Dauerstandsversuche zu vergleichen. Man kann erkennen, dass sich bei diesen Serien abermals ein linearer Trend einstellt. Eine konkrete Aussage über die Fortsetzung dieses linearen Trends bei den Dauerstandsversuchen, kann aus derzeitiger Sicht nicht getroffen werden. In Abbildung 5-11 sind unter anderen die vorläufigen Ergebnisse der Dauerstandsversuche dargestellt. Wenn diese Ergebnisse an der eingezeichneten Position zu liegen kämen, so würde die gegenwärtig eingetragene Trendlinie stabil bleiben. Das würde bedeuten, dass eine logarithmisch lineare Extrapolation nach links, für sehr kurze Versagensdauern, zweckmäßig ist und das DoL Verhalten widerspiegelt.

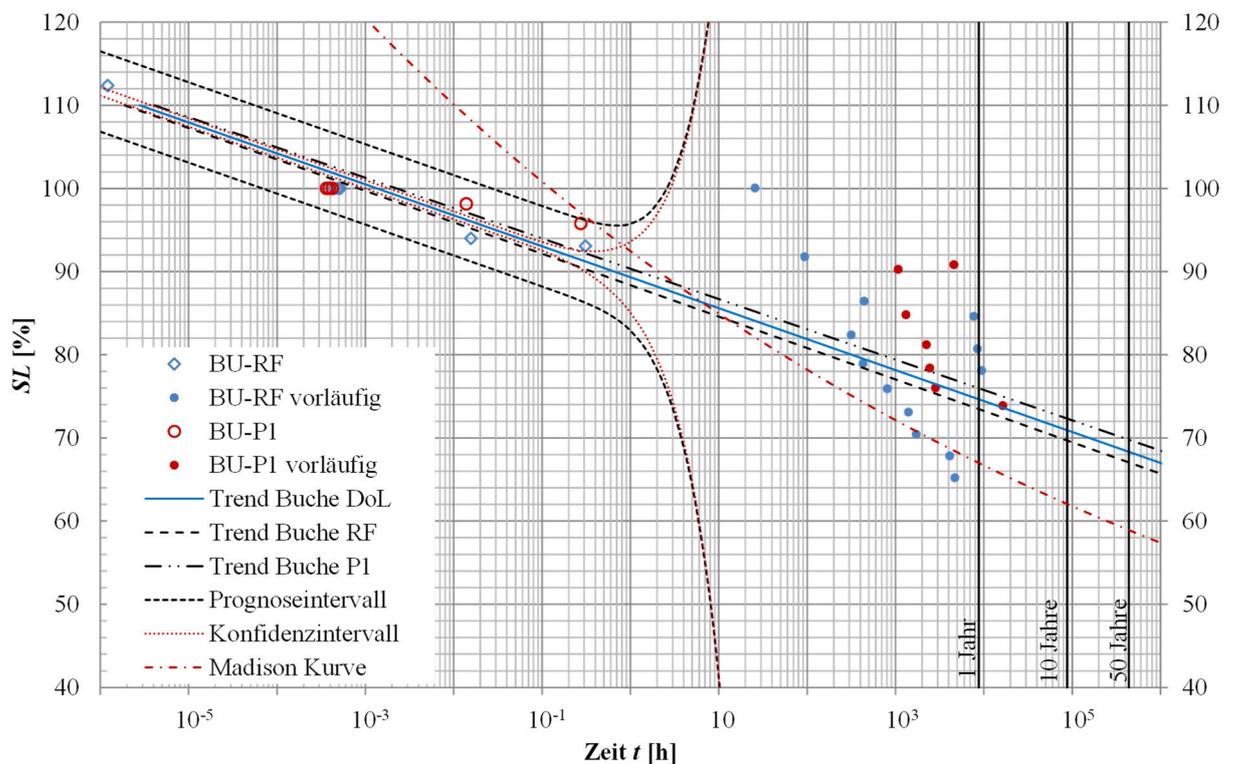


Abbildung 5-11: DoL-Ergebnisdiagramm für Buche mit den Einbindelängen $l_{emb}=0d, 2d$ für die Referenzschraube RF und den Prototypen P1

KAPITEL 6: ZUSAMMENFASSUNG UND CONCLUSIO

Die nun folgenden Absätze fassen die vorliegende Arbeit speziell hinsichtlich der darin gewonnenen, wesentlichen Erkenntnisse kurz zusammen und leiten ein Conclusio aus den vorliegenden Zwischenergebnissen mit Vorbehalt ab.

In der Einleitung wurde nach einem kurzen allgemeinen Teil auf die im Rahmen der Literaturrecherche gefundenen, bis dato durchgeführten Untersuchungen zum Thema DoL eingegangen. Der Fokus galt insbesondere der Erfassung und Diskussion der Hintergrunddaten und des Modells der sogenannten Madison Kurve, welche die Basis der europäischen Bemessungsnorm für den Holzbau in Hinblick auf die Ermittlung des Faktors k_{mod} darstellt. Im Zuge der Analyse der Madison Kurve wurde festgestellt, dass die Wahl der Stützpunkte nicht nachvollzogen werden konnte. Daraufhin und auch aufgrund weiterer, eingangs diskutierter Punkte, wurde dieses Modell und dessen Basis neu aufbereitet. Zusätzlich wurde festgestellt, dass Unterschiede in der Belastungsart, im Besonderen „ramp-loading“ vs. Langzeituntersuchungen bei konstanter Last, nicht im Sinne einer vergleichbaren Darstellung bewertet wurden. Motiviert durch diesen Umstand wurde in der vorliegenden Arbeit Augenmerk auf eine schädigungsäquivalente Bewertung von Prüfdaten gelegt und ein entsprechendes Verfahren dazu entwickelt. Die gegebene Zeit bis zum Versagen der „ramp-loading“ Tests wurde auf Basis eines empirischen Schädigungsmodells derart modifiziert (verkürzt), dass diese einer konstanten Beanspruchung (Langzeittests) gleichzusetzen ist. Nach Analyse verschiedener Modelle zur Beschreibung des DoL-Verhaltens erwies sich der Ansatz der Regressionsgleichung von Pearson (1972), welche im halblogarithmischen Maßstab eine Gerade darstellt, als am besten geeignet. Auf Basis der schädigungsäquivalenten Bewertung jener Prüfdaten welche der Madison-Funktion zugrunde liegen konnte eine modifizierte Form der Madison Kurve ermittelt werden.

Die Herausforderung von DoL-Versuchen besteht darin, eine mögliche Restfestigkeit jedweder langzeitbeanspruchten Probe bzw. das Regelverhalten einer dementsprechend ausgesetzten Population vorhersagen zu können. Madsen (1992) entwickelte die Methode der „equal rank assumption“, mit dessen Hilfe es ermöglicht wird, Proben eines Belastungshorizontes neu und umfassender zu bewerten und ihren immanenten Informationsgehalt weitreichender zu nutzen. Mit dieser Methode ist es möglich, nicht nur einer Serie sondern jedem einzelnen langzeitbeanspruchten Probekörper eine Kurzzeitfestigkeit und somit eine Referenzfestigkeit zuzuordnen. Dabei ist es erforderlich, das Verteilungsmodell der Kurzzeitfestigkeit zu kennen. Für die Hauptversuche der vorliegenden Arbeit wurde auf Basis einer Analyse der Ergebnisse der Referenzversuche eine Lognormalverteilung vorausgesetzt.

Da es in dieser Arbeit primär um das Langzeitverhalten von Holzbauschrauben geht, wurde ein weiterer Fokus im Rahmen der Literaturrecherche auf bereits durchgeführte Arbeiten zu diesen Verbindungsmitteln gelegt. Da die Ergebnisse dieser Arbeiten zum Teil noch nicht vorliegen bzw. nur qualitative Aussagen liefern, ist es leider nicht möglich, diese mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit zu vergleichen. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass die vorliegende Arbeit die erste ist, welche sich – neben einer Untersuchung in Fichtenholz als Referenz – mit Hartlaubhölzern bzw. Hartlaubholzprodukten im Sinne des Langzeitverhaltens von darin platzierten, axial beanspruchten Holzbauschrauben beschäftigt. Alle Versuche wurden dabei für einen konstanten Achs-Faserwinkel von 0° und unter Variation der Einbindelänge durchgeführt. Bei den Referenzversuchen zur Bestimmung der Kurzzeittragfähigkeit konnte mit zunehmender Einbindelänge eine geringe, wenn auch nicht signifikante, Erhöhung der Ausziehfestigkeit festgestellt werden. Bei den Langzeitversuchen (die Lastintensität war bezogen auf diese jeweiligen Festigkeitsniveaus) konnte bis dato kein positiver Effekt der Einbindelänge festgestellt werden.

Zur Prüfmethode ist anzumerken, dass zur Aufrechterhaltung einer weitgehend konstanten Belastung ein Federsystem mit Kraftmessstangen zur Anwendung kam. Die Kraft wurde dabei mittels dieser Kraftmessstangen im Sekundentakt erfasst und mittels entsprechender Filtermethodik dynamisch reduziert, um auch bei einer mehrjährigen Belastung einen verwendbaren Datensatz zu erhalten. Im Anschluss wurde eine schädigungsäquivalente Auswertung durchgeführt, bei welcher der Anspannvorgang, der Kraftabfall und eventuelle Nachspannvorgänge berücksichtigt wurden.

Die Ergebnisse der Hauptversuche machen deutlich, dass die Madison Kurve für kurz andauernde Belastungen die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse wesentlich überschätzt. Für Schrauben appliziert in Fichten-Vollholz und in BauBuche konnten annähernd gleiche Regressionsgleichungen zur Beschreibung des Langzeitverhaltens bestimmt werden. Eine Prognose für die Schrauben appliziert in Buchen-Vollholz ist gegenwärtig nur eingeschränkt möglich, da noch zu wenige Versuchsdaten vorliegen. Erste Trends weisen jedoch auf ein günstigeres Langzeitverhalten im Vergleich zu den Ergebnissen in Fichte und BauBuche hin. Aufgrund der noch geringen Beobachtungsdauer von rund einem Jahr ist es derzeit nicht möglich, eine gewichtige Prognose für einen Belastungszeitraum von 50 Jahren anzugeben. Extrapoliert man die Trendlinien der Regressionsgleichungen für Fichte und BauBuche trotzdem, so kann man erkennen, dass sich diese tangential an die hyperbolische „Madison Kurve“ annähern. Eine getrennte Betrachtung für die unterschiedlichen Einbindelängen wurde in dieser Arbeit dargestellt. Die dabei festgestellten, geringfügigen Unterschiede im Langzeitverhalten liegen aus der Sicht des Autors im Bereich statistischer Unsicherheit wodurch zum derzeitigen Kenntnisstand und der derzeitigen Datenlage eine diesbezügliche Unterscheidung bei der Beschreibung dieses Verhaltens als nicht zweckmäßig erscheint. Dasselbe gilt für die beiden Schraubentypen, welche im Rahmen der Arbeit untersucht wurden. Auch hier kann gegenwärtig eine Gleichwertigkeit im DoL-Verhalten beobachtet werden.

Die Tabelle 6-1 gibt eine vorläufige Schätzung der k_{mod} Faktoren auf Basis einer rund einjährigen Beobachtung an. Dabei wurden die Regressionsparameter in Tabelle 4-9 für die gegebenen akkumulierten Versagenszeiten des EC 5 (2015) verwendet. Da für die Klasse der Lasteinwirkungsdauer (KLED) „sehr kurz“ im Sinne einer Stoßbelastung („impact load“) keine Versagenszeit lt. EC 5 (2015) festgelegt ist, wurde dafür in Anlehnung an die durchgeführten Ultrakurzzeittests eine Versagensdauer von 0,2 s (entspricht nach einer Transformation in eine konstante Belastung ungefähr 0,004 s) gewählt.

Tabelle 6-1: vorläufige Schätzung der k_{mod} Faktoren auf Basis einer rund einjährigen Beobachtung

		Dauer		Referenzschraube (RF)		Prototyp 1 (P1)		RF & P1	
		von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
Fichte	ständig	länger als 10 Jahre		< 0,62		< 0,67		< 0,64	
	lang	6 Monate	10 Jahre	0,62	0,68	0,67	0,72	0,64	0,69
	mittel	1 Woche	6 Monate	0,68	0,74	0,72	0,77	0,69	0,75
	kurz	kürzer als 1 Woche		> 0,74		> 0,77		> 0,75	
	sehr kurz	k. A.		1,12		1,07		1,10	
BauBuche	ständig	länger als 10 Jahre		< 0,61		< 0,62		< 0,62	
	lang	6 Monate	10 Jahre	0,61	0,67	0,62	0,68	0,62	0,68
	mittel	1 Woche	6 Monate	0,67	0,74	0,68	0,75	0,68	0,75
	kurz	kürzer als 1 Woche		> 0,74		> 0,75		> 0,75	
	sehr kurz	k. A.		1,13		1,13		1,13	

Zusätzlich zu den Langzeituntersuchungen wurden noch ergänzende Untersuchungen zum Einfluss einer variierenden Belastungsgeschwindigkeit im Zuge der Kurzzeitversuche durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass sich bei dieser „ramp loading“-Untersuchung ein linear abnehmender Trend der Ausziehfestigkeit

mit logarithmischer Zunahme (Basis 10) der Prüfzeit bzw. Abnahme der Belastungsgeschwindigkeit einstellt. Ein DoL-Effekt ist somit auch im kleineren Maßstab bei verhältnismäßig kurzen Versagenszeiten zu beobachten. Im Zuge dieser Untersuchung wurde auch der linear-elastische Anteil bzw. die Grenze des linear-elastischen Bereichs der Kraft-Verformungsbeziehung ermittelt. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass Kräfte im linear elastischen Bereich keine Schädigung im Material hervorrufen und somit das Lastniveau am Ende dieses Bereiches als Indikator für die Bestimmung einer möglichen Dauerstandfestigkeitsgrenze herangezogen werden kann.

Auf Basis der bisher gewonnen Ergebnisse kann folgendes geschlossen werden: Die Einbindelänge bewirkt in den Referenzversuchen eine geringe, wenn auch nicht signifikante Steigerung der Kurzzeitfestigkeit. In den Langzeitversuchen konnte kein nennenswerter positiver Effekt einer Einbindelänge beobachtet werden. Zum Langzeitverhalten generell ist zu sagen, dass sich für Fichte und BauBuche annähernd dieselben Regressionsgleichungen ergeben.

In Tabelle 6-2 erfolgt eine Gegenüberstellung der aktuell gültigen k_{mod} Faktoren lt. EC 5 (2015) mit den vorläufigen bisher ermittelten empirischen Werten. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- das in den Versuchen vorherrschende Klima ist repräsentativ für die NK 2 lt. EC 5 (2015);
- ausschließlich die Holzfeuchte und die Dauer der Beanspruchung wurden für die Ermittlung der k_{mod} Faktoren lt. EC 5 (2015) herangezogen;
- der k_{mod} Faktor, wie gegenwärtig geregelt, beschreibt das Verhalten der Festigkeiten auf Median- bzw. Mittelwertniveau;
- zyklisch variierende klimatische Verhältnisse, wie in realen Tragwerken vorzufinden, führen zu keinem nennenswerten zusätzlichen negativen Einfluss auf das Langzeitverhalten obwohl Hoffmeyer (1990) (vgl. Kapitel 1-2.5) einen ebensolchen Einfluss auf die Biegefestigkeit von Kanthölzern beobachtete;
- die Zeitdauern der KLED lt. EC 5 (2015) entsprechen akkumulierten Beanspruchungsdauern wie sie sich über einen üblichen Nutzungszeitraum von 50 Jahren erwartet werden können.

Die k_{mod} Faktoren lt. EC 5 (2015) ergeben für eine ständige Einwirkung für Nutzungsklasse (NK) 1 & 2 einen Wert von 0,60. Auf Basis der vorliegenden Daten führt eine Extrapolation der ermittelten Regressionsgleichungen ebenfalls zu einem Faktor von rund 0,60. Auch auf Basis der Madison Kurve ergibt sich ein Faktor von rund 0,60 für eine ständige Einwirkung. Für eine kurze Einwirkung hingegen gibt der EC 5 (2015) einen Faktor von 0,90 an. In diesem Zusammenhang ist allerdings auch darauf hinzuweisen, dass der EC 5 (2015) für NK 1 & 2 keine Unterscheidung in den k_{mod} Faktoren vorsieht. Betrachte man hingegen die SIA 265 (2012), so wird bei Umrechnung von NK 1 auf NK 2 ein Abminderungsfaktor der Tragwiderstände von $\eta_w = 0,80$ vorgeschlagen.

Auf Basis der eigenen Versuche ergibt sich für eine kurze Beanspruchungsart ein Faktor von größer 0,75. Das bedeutet, dass der EC 5 (2015) die im Rahmen dieser Arbeit bestimmte, axiale Tragfähigkeit der Holzbauschrauben auf Herausziehen für eine kurze Beanspruchungsart überschätzt.

Tabelle 6-2: Gegenüberstellung der k_{mod} Faktoren lt. EC 5 mit den empirisch ermittelten Werten

	Dauer	k_{mod} lt. EC 5	$k_{mod,emp}$	Verhältnissfaktor
ständig	50 Jahre	0,60	0,58	1,03
lang	10 Jahre	0,70	0,62	1,13
mittel	6 Monate	0,80	0,68	1,18
kurz	1 Woche	0,90	0,75	1,20
sehr kurz	k. A.	1,10	1,10	1,00

Diese Überschätzung der Effekte aus konstanter Langzeitbeanspruchung, wird derzeit über den in den Zulassungen bzw. Bewertungen angeführten k_{ax} Faktor geregelt. Auf Basis der Mittelwerte der

Ausziehfestigkeiten ermittelt in den Kurzzeittests würde sich lt. Reichinger (2017) ein k_{90} Faktor von 0,70 ergeben. Dieser Faktor berücksichtigt den reinen Einfluss des Achs-Faser Winkels von 90° auf 0° wie er bei Vergleich der entsprechenden Kurzzeitfestigkeiten beobachtbar ist, ohne Berücksichtigung von Langzeiteffekten. Auch in der Arbeit von Ringhofer (2017) ist ein Faktor k_{90} von 0,64 für eine Applizierung der Schrauben in Faserrichtung, jedoch auf charakteristischem Niveau, angegeben. Nimmt man einen k_{90} Faktor von 0,65 an und dividiert man diesen mit dem in der Tabelle 6-2 angeführten ungünstigsten Verhältnisfaktor von 1,20, so erhält man einen neuen k_{90} Faktor von rund 0,54, der zusätzlich die Effekte aus konstanter Langzeitbeanspruchung abdecken soll. Wie bereits in Kapitel 1-5 erwähnt ergibt sich lt. derzeitigen Zulassungen ein k_{ax} Faktor von 0,30 für eine Verschraubung parallel zur Faser. Auf Basis der vorliegenden Zwischenergebnisse wäre der k_{ax} Faktor somit aktuell als günstiger zu bewerten als gegenwärtig geregelt.

Unter der Voraussetzung, dass die k_{mod} Faktoren lt. EC 5 (2015) für 90° Verschraubungen zutreffend sind, wäre eine Berücksichtigung des in Folge davon ausgeprägteren DoL Effektes bei Verschraubungen 0° zur Faser über den k_{ax} Faktor sinnvoll. Wenn sich bei weiterführenden Versuchen herausstellt, dass es auch bei einer 90° Verschraubung zu größeren Abweichungen zu den gegenwärtig im EC 5 verankerten k_{mod} Faktoren kommt, so muss eine alternative Vorgehensweise gewählt werden. Da eine Definition eigener k_{mod} Faktoren für Schrauben in Anbetracht der komplexen Umsetzung in der Bemessungspraxis als dem Holzbau nicht dienlich sowie allgemein als nicht zielführend angesehen werden muss, wird es als denkbar betrachtet alternativ einen globalen Verhältnisfaktor auf die charakteristischen Festigkeitswerte, entsprechend dem Verhältnis zwischen den neuen und den bestehenden k_{mod} Faktoren, anzuwenden. Eine solche Vorgehensweise wurde beispielsweise bei der Festlegung der charakteristischen Schubfestigkeiten für Vollholz in der ÖNORM B 1995-1-1 (2015) durch implizite Berücksichtigung von Rissen bereits im charakteristischen Kennwert und Setzen des dafür vorgesehenen Rissefaktors $k_{cr} = 1,0$ gewählt.

Um die Effekte aus konstanter Langzeitbeanspruchung umfassender beschreiben zu können, sind diesbezüglich weitere Versuche, bei denen der Schraubendurchmesser, die Eindrehlänge und vor allem der Achs-Faserwinkel variiert werden, erforderlich. Interessant zu beobachten wäre auch das Verhalten bei zyklisch variierenden klimatischen Verhältnissen, jedoch ist dabei besonderes Augenmerk auf die Messtechnik und die Anwendung eines repräsentativen Klimazyklus zu legen.

Da die derzeitigen Beobachtungen nur erste Trends liefern, ist es sinnvoll die DoL-Versuche weiter zu führen um einen längeren Beobachtungszeitraum zu erhalten und dadurch eine fundiertere Basis für die Ermittlung der Regressionsgleichungen zu erhalten.

ANHANG A LITERATURVERZEICHNIS

- [Austrian Standards Institute, 1991] Austrian Standards Institute: Holzbauwerke - Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln - Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens. EN 26891., 1991.
- [Austrian Standards Institute, 2004-02] Austrian Standards Institute: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz: Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren. EN 13183-1., 2004-02.
- [Austrian Standards Institute, 2015] Austrian Standards Institute: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten: Teil 1-1: Allgemeines — Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. EN 1995-1-1., 2015.
- [Austrian Standards Institute, 2015] Austrian Standards Institute: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten: Teil 1-1: Allgemeines — Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. ON B 1995-1-1., 2015.
- [Austrian Standards Institute, 2016] Austrian Standards Institute: Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte. ÖNORM EN 384., 2016.
- [Austrian Standards Institute, 2016] Austrian Standards Institute: Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen. ÖNORM EN 338., 2016.
- [Barrett und Foschi, 1978] Barrett J. D., Foschi R. O.: Duration of load and probability of failure in wood Part I - Modelling creep rupture. Canadian Journal of Civil Engineering. 1978: 505–514.
- [Blaß und Uibel, 2007] Blaß H. J., Uibel T.: Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsperholz, Karlsruhe, Hannover 2007.
- [Brandner und Schickhofer, 2011] Brandner R., Schickhofer G.: Ermüdungsverhalten von Holz und Holzwerkstoffen. 2011.
- [Brandner, 2013] Brandner R.: Stochastic system actions and effects in engineered timber products and structures, Graz 2013.
- [Brandner et al., 2015] Brandner R., Bratulic K., Ringhofer A.: Serial Correlation of Withdrawal Properties from Axially-Loaded Self-Tapping Screws, Vancouver 2015.
- [Brandner et al., 2017] Brandner R., Ringhofer A., Grabner M.: Probabilistic models for the withdrawal behavior of single self-tapping screws in the narrow face of cross laminated timber (CLT). Holz als Roh- und Werkstoff. 2017; 76(1): 13–30. DOI: 10.1007/s00107-017-1226-3.
- [Brandner, 2017] Brandner R.: Risiko im konstruktiven Ingenieurbau [Skriptum]. TU Graz, Graz 2017.
- [Burgschwaiger, 2011] Burgschwaiger M.: Einfluss der Einbindelänge auf die Ausziehfestigkeit von Teilgewindeschrauben [Bachelorprojekt]. Technische Universität Graz, Graz 2011.
- [Clauser, 1959] Clauser W. S.: Creep of small wood beams under constant bending load. United States Forest Products Laboratory. 1959(No. 2150).
- [Deutsches Institut für Bautechnik, 2013] Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung. Z-9.1-679., 2013.
- [Elmendorf, 1916] Elmendorf A.: Sresses in Impact. University of Wisconsin. 1916.
- [Foschi und Yao, 1986] Foschi R. O., Yao Z. C.: Another look at the three duration of load models. 1986.
- [Gerhards, 1979] Gerhards C. C.: Time-related effects of loading on wood strength - a linear cumulative damage theory. Wood Science. 1979: 139–144.
- [Hoffmeyer, 1990] Hoffmeyer P.: Failure of wood as influenced by moisture and duration of load [Dissertation]. State University of New York, Syracuse, New York 1990.
- [Hoffmeyer und Sørensen, 2007] Hoffmeyer P., Sørensen J. D.: Duration of load revisited. Wood Sci Technol. 2007; 41(8): 687–711. DOI: 10.1007/s00226-007-0154-5.
- [Hübner, 2013] Hübner U.: Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile [Dissertation]. Technische Universität Graz, Graz 2013.
- [Köhler und Svensson, 2002] Köhler J., Svensson S.: Probabilistic modeling of Duration of load effects in timber structures. 2002.

- [Köhler, 2007] Köhler J.: Reliability of timber structures [Dissertation]. Swiss Federal Institute of Technology, Zuerich 2007.
- [Koj und Trautz, 2016] Koj C., Trautz M.: Long-term behaviour of timber connections with selftapping screws in outdoor climate. 2016.
- [Li, 2015] Li Y.: Duration-of-load and size effects on the rolling shear strength of cross laminated timber [Dissertation]. University of British Columbia, Vancouver 2015.
- [Liska, 1950] Liska J. A.: Effect of rapid loading on the compressive and flexural strength of wood. United States Forest Products Laboratory. 1950(R1767).
- [Madsen und Nielsen, 1992] Madsen B., Nielsen L. F.: Structural behaviour of timber, North Vancouver 1992.
- [Miner, 1945] Miner M. A.: Cumulative damage in fatigue. Journal of Applied Mechanics. 1945(12(3)): A159-164.
- [Nielsen, 2005] Nielsen L. F.: The Influence of moisture- and load variations on the fatigue behaviour of wood. 2005.
- [Niemz, 2011] Niemz P.: Holz und Holzwerkstoffe [Skriptum]. ETH, Zuerich 2011.
- [Olsson, 2005] Olsson U.: Confidence Intervals for the Mean of a Log-Normal Distribution. Uppsala (Schweden) 2005. ww2.amstat.org/publications/jse/v13n1/olsson.html. Abgerufen am 11. Oct 2017.
- [Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB), 2017] Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB): Europäische Technische Bewertung. ETA-12/0373., 2017.
- [Österreichisches Normungsinstitut, 1999] Österreichisches Normungsinstitut: Holzbauwerke - Prüfverfahren - Ausziehtragfaehigkeit von Holzverbindungsmitteln. EN 1382., 1999.
- [Österreichisches Normungsinstitut, 2016] Österreichisches Normungsinstitut: Holzbauwerke - Prüfverfahren - Ausziehtragfaehigkeit von Holzverbindungsmitteln. EN 1382., 2016.
- [Palgren, 1924] Palgren A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure (ZVDI). 1924(14): 339–341.
- [Pearson, 1972] Pearson R. G.: The Effect of Duration of Load on the Bending Strength of Wood. Holzforschung. 1972; 26(4): 153–158. DOI: 10.1515/hfsg.1972.26.4.153.
- [Pirnbacher und Schickhofer, 2012] Pirnbacher G., Schickhofer G.: Zeitabhängige Entwicklung der Traglast und des Kriechverhaltens von axial beanspruchten, selbstbohrenden Holzschrauben. 2012.
- [Pöll, 2017] Pöll M.: Entwicklung einer Hartlaubholzschraube: Optimierung der Gewindegeometrie für die Beanspruchung auf Herausziehen [Masterarbeit]. Technische Universität Graz, Graz 2017.
- [Reichinger, 2017] Reichinger T.: Ausgewählte Untersuchungen zum Tragverhalten einer für Hartlaubholz optimierten Holzbauschraube [Masterarbeit]. Technische Universität Graz, Graz 2017.
- [Ringhofer, 2017] Ringhofer A.: Axially Loaded Self-Tapping Screws in Solid Timber and Laminated Timber Products [Dissertation]. Technische Universität Graz, Graz 2017.
- [Schickhofer, 2009] Schickhofer G.: Holzbau: Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz [Skriptum]. Technische Universität Graz, Graz 2009.
- [Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2012] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: Holzbau. SIA 265., 2012.
- [Smith et al., 2003] Smith I., Landis E., Gong M.: Fracture and fatigue in wood, Chichester 2003.
- [Thelandersson und Larsen, 2003] Thelandersson S., Larsen H. J., editors: Timber engineering, New York 2003.
- [Uibel und Blaß, 2013] Uibel T., Blaß H. J.: Joints with Dowel Type Fasteners in CLT Structures. 2013.
- [Wagenführ, 2007] Wagenführ R.: Holzatlas, Leipzig 2007.
- [Wood, 1951] Wood L. W.: Relation of Strength of Wood To Duration Of Load. 1951.

ANHANG B DIVERSE ANDERE ANHÄNGE

B-1 Reproduzierte Daten der Madison Kurve

Tab. Anhang B-1: Reproduzierte Daten der Madison Kurve auf Basis der Mittelwerte

	t_f [h]	SL [%]	Gewicht [-]	$CIV_{u,horz}$ [h]	$CIV_{o,horz}$ [h]	$CIV_{u,vert}$ [%]	$CIV_{o,vert}$ [%]
L1	$7,22 \cdot 10^{-6}$	121	12	–	–	116	125
L2	$1,09 \cdot 10^{-5}$	120	14	–	–	115	124
L3	$2,56 \cdot 10^{-5}$	118	15	–	–	115	121
L4	$5,56 \cdot 10^{-5}$	117	15	–	–	111	123
L5	$1,62 \cdot 10^{-4}$	113	12	–	–	108	118
L6	$8,10 \cdot 10^{-4}$	109	12	–	–	106	113
REF	$2,11 \cdot 10^{-3}$	100	–	–	–	87	116
W1	0,24	95	10	0,15	0,39	–	–
W2	7,39	90	13	3,06	17,8	–	–
W3	5,71	85	17	2,46	13,2	–	–
W4	299	80	20	143	626	–	–
W5	1.086	75	15	404	2.918	–	–
W6	4.080	70	19	2.099	7.928	–	–
W7	12.755	65	9	7.408	21.963	–	–
W8	42.169	60	11	18.829	94.444	–	–

Tab. Anhang B-2: Reproduzierte Daten der Madison Kurve auf Basis der Mediane

	t_r [h]	SL [%]	Gewicht [-]	CIV _{u,horz} [h]	CIV _{o,horz} [h]	CIV _{u,vert} [%]	CIV _{o,vert} [%]
L1	$7,18 \cdot 10^{-6}$	124	12	–	–	116	125
L2	$1,12 \cdot 10^{-5}$	117	14	–	–	114	124
L3	$2,56 \cdot 10^{-5}$	119	15	–	–	115	121
L4	$5,80 \cdot 10^{-5}$	116	15	–	–	111	122
L5	$1,58 \cdot 10^{-4}$	115	12	–	–	108	118
L6	$8,24 \cdot 10^{-4}$	110	12	–	–	106	113
REF	$2,11 \cdot 10^{-3}$	100	0	–	–	84	112
W1	0,21	95	10	0,13	0,31	–	–
W2	2,28	90	13	1,99	7,75	–	–
W3	2,16	85	17	1,45	5,07	–	–
W4	90,8	80	20	83,8	256	–	–
W5	336	75	15	229	962	–	–
W6	2.733	70	19	1.346	3.825	–	–
W7	9.615	65	9	6.375	16.993	–	–
W8	26.262	60	11	13.658	50.498	–	–

B-2 Prüfraumen Detailzeichnung

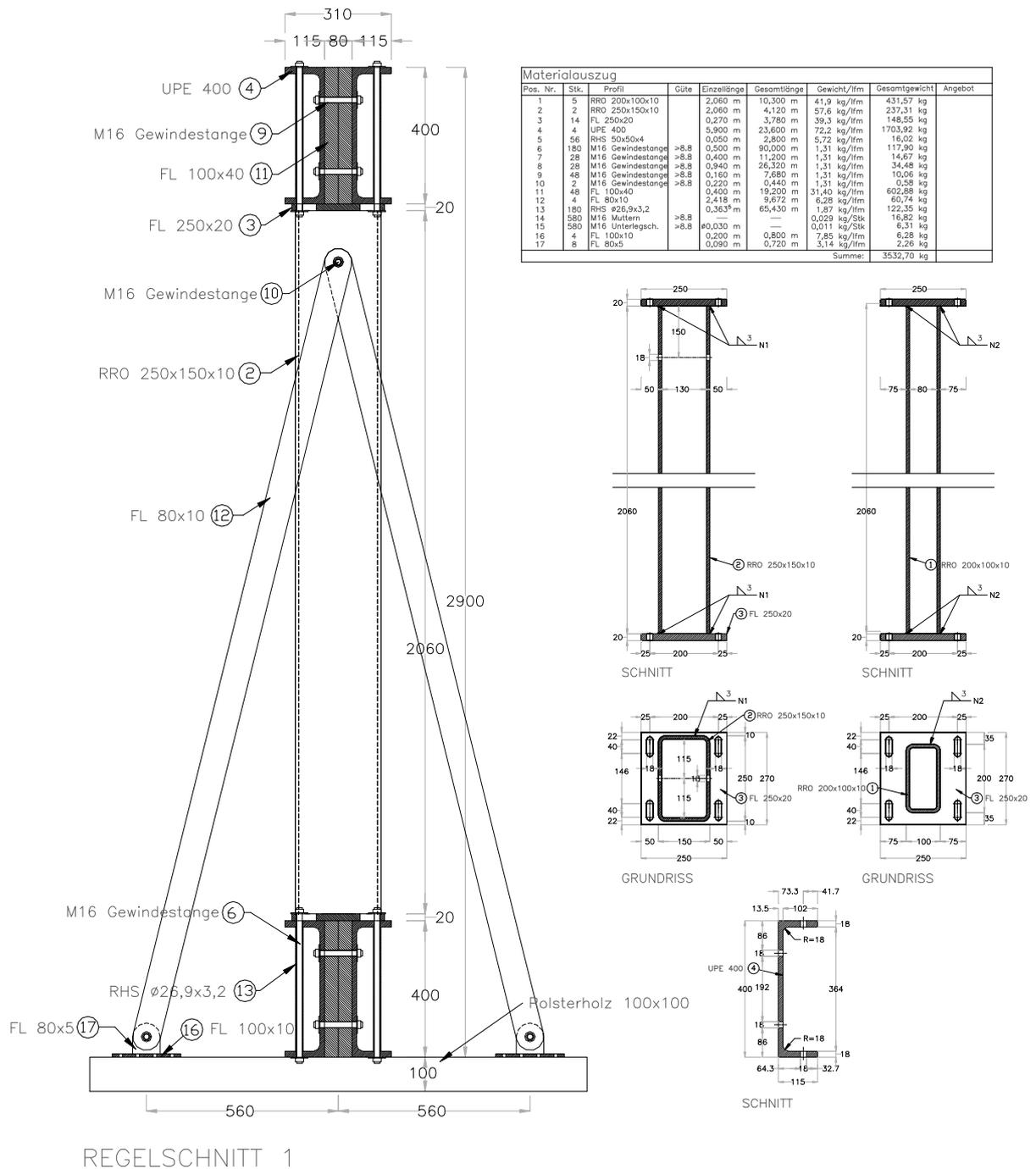


Abb. Anhang B-1: Prüfraumen DoL: Regelschnitt, Materialauszug, diverse Details

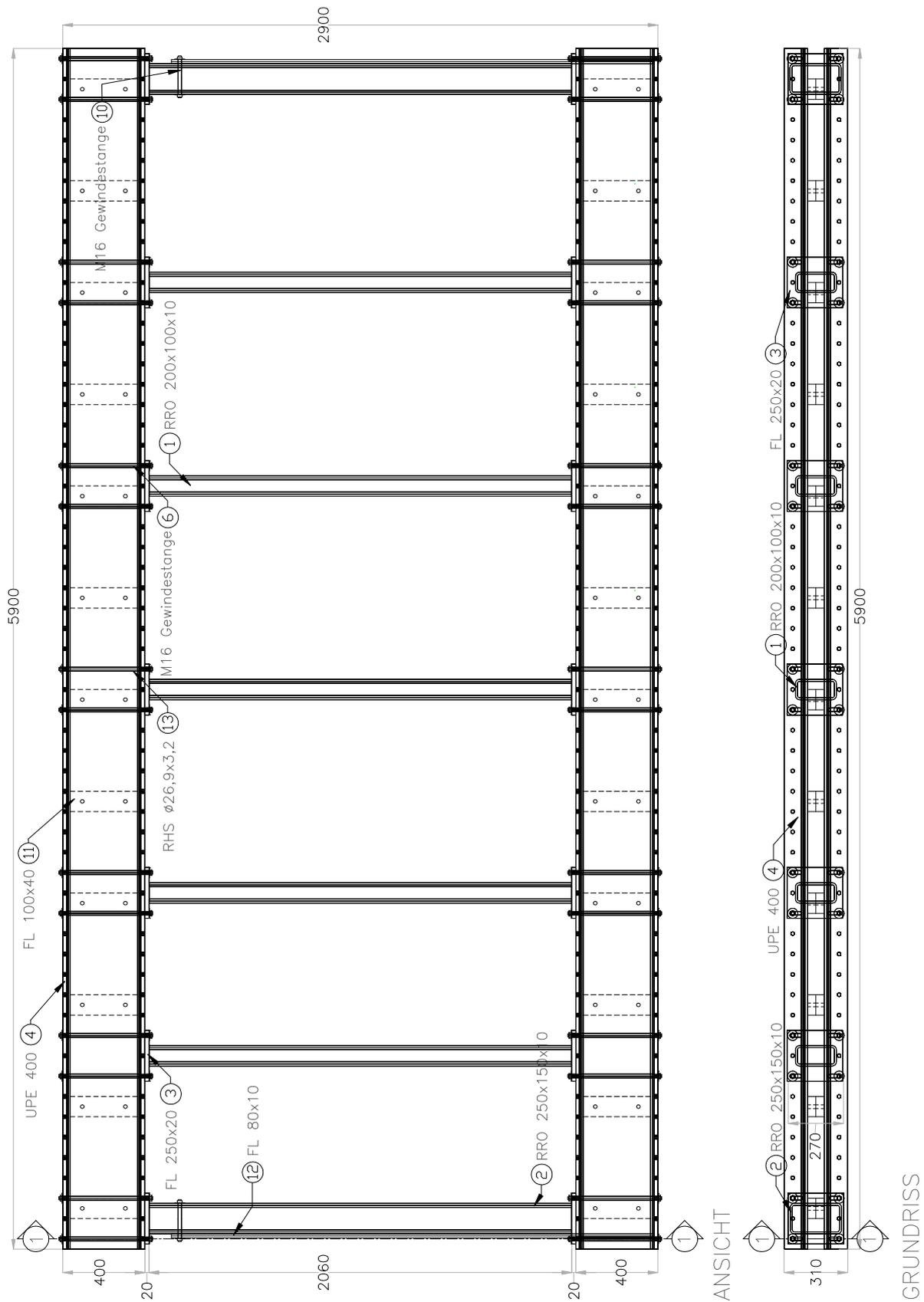


Abb. Anhang B-2: Prüfrahmen DoL: Grundriss, Ansicht

B-3 Quelltext der Datenaufbereitung

```
In[1]= (*Dateipfade*)
NoteBookPath = NotebookDirectory[];
PathToVersuchstagebuch =
  StringJoin[ParentDirectory[NoteBookPath], "\\Versuchstagebuch\\"];
ExportPathForSinglePK = NoteBookPath <> "einzelne_PK_XLS\\";
```

Funcionsdefinition (Initialization)

```
In[40]= (*Spaltenindex der Ketten in Binary-File*)
{Kette01 = 2, Kette02 = 3, Kette03 = 4, Kette04 = 5, Kette05 = 6, Kette06 = 7,
  Kette07 = 8, Kette08 = 9, Kette09 = 10, Kette10 = 11, Kette11 = 12, Kette12 = 13,
  Kette13 = 14, Kette14 = 15, Kette15 = 16, Kette16 = 17, Kette17 = 18, Kette18 = 19,
  Kette19 = 20, Kette20 = 21, Kette21 = 22, Kette22 = 23, Kette23 = 24,
  Kette24 = 25, Kette25 = 2, Kette26 = 3, Kette27 = 4, Kette28 = 5, Kette29 = 6};
Kettennames = {"Kette01", "Kette02", "Kette03", "Kette04", "Kette05",
  "Kette06", "Kette07", "Kette08", "Kette09", "Kette10", "Kette11",
  "Kette12", "Kette13", "Kette14", "Kette15", "Kette16", "Kette17",
  "Kette18", "Kette19", "Kette20", "Kette21", "Kette22", "Kette23",
  "Kette24", "Kette25", "Kette26", "Kette27", "Kette28", "Kette29"};
```

List Files Functions

```
(*          Options for ListFile Functions          *)
(* ----- *)
(*0          ... Tabelle mit Dateinamen und zugehöriger Nummer *)
(*1 - xx     ... Pfad zur Datei mit der Nummer *)
(*"All"      ... Liste aller Dateipfade *)
(*"Names"    ... Liste aller Dateinamen *)
```

```
In[6]= (*Listet alle XLSX-Dateien im Dateipfad auf*)
ListXLSFiles[directory_, number_] := Module[{f1, f2, f3, f4},
  f1 = FileNames["*.xlsx", directory];
  f2 = Last@StringSplit[f1[[#]], "\\"] & /@ Range[Length@f1];
  f3 = First@StringSplit[f2[[#]], "."] & /@ Range[Length@f2];
  f4 = Grid[Partition[
    Flatten@{"Nr.", "File"}, Riffle[Range[Length@f3], f2], 2], Frame → All
  ];
  If[number == 0, f4,
    If[number == "All", f1, If[number == "Names", f2, f1[[number]] ]]]
  ]
```

In[7]=

```
(*Listet alle ASCII-Dateien im Dateipfad auf*)
ListASCIIFiles[directory_, number_] := Module[{f1, f2, f3, f4},
  f1 = FileNames["*.txt", directory];
  f2 = Last@StringSplit[f1[[#]], "\\"] & /@ Range[Length@f1];
  f3 = First@StringSplit[f2[[#]], "."] & /@ Range[Length@f2];
  f4 = Grid[Partition[
    Flatten@{"Nr.", "File"}, Riffle[Range[Length@f3], f2]], 2], Frame → All
  ];
  If[number == 0, f4,
    If[number == "All", f1, If[number == "Names", f2 , f1[[number]] ]]]
  ]
```

In[8]=

```
(*Listet alle Binary-Dateien mit der Endung .dat im Dateipfad auf*)
ListBINFiles[directory_, number_] := Module[{f1, f2, f3, f4},
  f1 = FileNames["*.dat", directory];
  f2 = Last@StringSplit[f1[[#]], "\\"] & /@ Range[Length@f1];
  f3 = First@StringSplit[f2[[#]], "."] & /@ Range[Length@f2];
  f4 = Grid[Partition[
    Flatten@{"Nr.", "File"}, Riffle[Range[Length@f3], f2]], 2], Frame → All
  ];
  If[number == 0, f4,
    If[number == "All", f1, If[number == "Names", f2 , f1[[number]] ]]]
  ]
```

TimeConversion

In[9]=

```
(*Umrechnung der Zeit*)
(*Mathematica: Zeit in Sekunden seit 1.1.1900 gemessen*)
(*Excel:      Zeit in Tagen seit 1.1.1900 gemessen*)
TimeConversionMathToExcel[timeMathematica_
  (*Zeit in Sekunden seit 1.1.1900*)] := timeMathematica / (60 * 60 * 24) + 2 // N
```

Import Data from Versuchstagebuch (inkl. Kraftkorrekturen)

```
(*"ExclusionTimeDataForKette" speichert Zeiträume die
aus den Daten "herausgeschnitten" werden für jede Kette*)
(*"TimeDataForSinglePK" speichert die Beginn- &
Endzeit jedes einzelnen Prüfkörpers*)
(*"ForceCorrectionDataForKette" speichert Zeiträume & Kraftdifferenzen
der Ketten für lineare Kraftkorrektur jeder einzelnen Kette*)
```

In[10]:=

```
(*Import der Daten vom 1.Tabellenblatt
"Zusammenfassung_Versuchstagebuch" aus dem Versuchstagebuch*)
ImportTimeDataFromVersuchstagebuch[filename_
(*Filenummer lt. ListXLSFiles Funktion*)] := Last@{
SelectedFile = ListXLSFiles[PathToVersuchstagebuch, filename_];
(*TimeDataTotal ... Daten gesamtes Tabellenblatt*)
TimeDataTotal = Import[SelectedFile, {"Data", 1}];
TimeDataTotal = Drop[Drop[TimeDataTotal, {2}], {20}];
(*TimeDataForSinglePK ... Beginn- &
Endzeit für jedes einzelnen Prüfkörpers*)
TimeDataForSinglePK = TimeDataTotal[[1 ;; 18]];
TimeDataForSinglePK = Flatten[Partition[TimeDataForSinglePK, {18, 5}], 1];
(*Kettennamen bzw. Nummern zusammenführen da im
Versuchstagebuch pro Kette mehrere Tabellenblätter vorhanden sind*)
KettenNamen = TimeDataForSinglePK[[All, 1, 2]];
KettenNummern = ToExpression@StringTake[KettenNamen, -2];
(*ExclusionTimeDataForKette ...
Zeiträume die aus den Daten "herausgeschnitten" werden*)
ExclusionTimeDataForKette = TimeDataTotal[[21 ;; 36]];
ExclusionTimeDataForKette =
Flatten[Partition[ExclusionTimeDataForKette, {16, 5}], 1];
ExclusionTimeDataForKette = Flatten[Pick[ExclusionTimeDataForKette,
KettenNummern, #], 1] & /@ Range@Max@KettenNummern;
, "Data loaded"}

(*Import der Daten vom 2.Tabellenblatt
"Korrekturwerte" aus dem Versuchstagebuch*)
ImportForceCorrectionDataFromVersuchstagebuch[filename_] := Last@{
SelectedFile = ListXLSFiles[PathToVersuchstagebuch, filename_];
(*ForceCorrectionDataForKette ... Zeiträume &
Kraftdifferenzen der Ketten für lineare Kraftkorrektur*)
ForceCorrectionDataForKette = Import[SelectedFile, {"Data", 2}];
ForceCorrectionDataForKette = Flatten[Partition[ForceCorrectionDataForKette,
{Length@ForceCorrectionDataForKette, 3}], 1];
, "Data loaded"}
```

In[12]=

```
(*Kraftkorrektur für Nachkalibrierung und Kriechen der KMS*)
ForceCorrection[List_ (*Daten der Kette 2 Spalten → |
  Zeit [Tagen seit 1.1.1900] | Kraft [N] |*), Kettennummer_
  (*Nummer der aktuellen Kette auf welche die Funktion angewendet wird*)] :=
Module[{Data = Drop[ForceCorrectionDataForKette[[Kettennummer]], 1],
  it = 1, von, bis, dFcreep, dFcreepList, Listh = List,
  FCorrFactorBefore290817 = {1.025923178371250, 0.974983541803818,
    0.995313554946583, 1.000886381950040, 1.006518065502530,
    0.969832230260120, 1.021458350363770, 1.035632183908050,
    0.964536019302210, 0.987916123682028, 0.999680127948820,
    0.985957161453197, 1.041656386215970, 1.038631940706390,
    1.037659689567640, 1.035941422594140, 1.037129123155980,
    1.040434620329280, 1.035245594300710, 1.037329148944960,
    1.038985632538800, 1.036669722476870, 0.000000000000000,
    1.039878487353960, 0.988581778092763, 1.004246705826320,
    0.987901641920025, 0.962427195553694, 1.000000000000000},
  FCorrFactor, FCorrFactorList, FCorrFactorTime =
    TimeConversionMathToExcell@AbsoluteTime[{2017, 08, 29, 0, 0, 0}]},

For[it = 1, it ≤ Length@Data,
  it++, (*Beginn der Schleife für Creep Korrektur*)
  If[Length@Data[[it, 1]] ≠ 0 && Length@Data[[it, 2]] ≠ 0,
    (*Check ob Korrekturdaten vorhanden sind*)
    von = TimeConversionMathToExcell@AbsoluteTime[Data[[it, 1]]];
    bis = TimeConversionMathToExcell@AbsoluteTime[Data[[it, 2]]];
    dFcreep = Data[[it, 3]];
    dFcreepList = (UnitStep[# - von] - UnitStep[# - bis])
      (# - von) (-dFcreep / (bis - von)) & /@ Listh[[All, 1]];
    Listh[[All, 2]] = Listh[[All, 2]] + dFcreepList;
  ]; ]; (*Beginn Loop for Creep Correction*)

(*Kraftkorrektur vor dem 29.08.2017
  (Nachkalibrierung der Kraftmesstangen im Prüfrahmen)*)
FCorrFactor = FCorrFactorBefore290817[[Kettennummer]];
FCorrFactorList = (UnitStep[# - (*von*) FCorrFactorTime] +
  (UnitStep[# + (*bis*) FCorrFactorTime] - UnitStep[
    # - (*bis*) FCorrFactorTime]) FCorrFactor) & /@ Listh[[All, 1]];
Listh[[All, 2]] = Listh[[All, 2]] * FCorrFactorList;

Return[Listh];]
```

List Filter Functions

```
In[13]:= (*Filtert Liste und gibt nur jene Zeilen aus die in
der Spalte "i" zwischen den Werten "Min" und "Max" liegen*)
DataPicker[List_, i_, Min_, Max_] :=
Module[{selection = UnitStep[# - Min] - UnitStep[# - Max] &@List[[All, i]]},
Pick[List, selection, 1]]

(*Filtert "unrealistisch" Temperatur und Luftfeuchte Daten T=
16-24°C und φ=65-100 %*)
FilterKlima[data_] := DataPicker[DataPicker[data, 2, 16, 24], 3, 65, 100]
```

```
In[15]:= (*Filtert Liste und gibt nur jene Zeilen aus deren Werte in der
Spalte "i" außerhalb des Intervalls "Von" und "Bis" liegen*)
DataExcluder[List_, i_, Von_, Bis_] :=
Module[{selection = UnitStep[# - Von] - UnitStep[# - Bis] &@List[[All, i]]},
Pick[List, selection, 0]]

(*Erweiterung von DataExcluder in der
eine Liste an Bereichen eingeben werden kann*)
DataExcluderMultiple[List_, i_, exlusiointimes_List
(*{{von,bis},{von2,bis2}}*)] :=
Module[{von = exlusiointimes[[All, 1]] / (60 * 60 * 24) + 2,
bis = exlusiointimes[[All, 2]] / (60 * 60 * 24) + 2, selectionh = 0,
selection = 0, it = 1, sortlist = List[[All, i]]},
For[it = 1, it ≤ Length@exlusiointimes, it++, (*Loop for ExcludeData*)
selection = selection + (UnitStep[# - von[[it]]] - UnitStep[# - bis[[it]]]) &@
sortlist;
(*Loop for ExcludeData*)];
Pick[List, selection, 0]]
```

Conversion: ASCII to Binary File (.dat)

In[17]=

```
(*Konvertiert ASCII-Dateien (aus MW100-Software) zu Binary-Files*)
(*!!! Vor Ausführung muss Variable "Klima" definiert werden
(Klima = 1 für Klimadaten | Klima = 0 für KMS-Daten) !!!*)
(*Kodierung der Binary-Files: *)
(*KMS-01-24: {"Real64", 24 * "Integer32"} *)
(*KMS-25-29: {"Real64", 5 * "Integer32"} *)
(*Klima: {"Real64", 2 * "Real32"} *)
ASCIItoBIN[filename1_] :=
Module[{filename = filename1, strm, strmout, file, head, head1, head2,
 numasci, data, data1, format, format1, col}, strm = OpenRead[filename];
 file = StringSplit[filename, ".txt"][[1]];
 strmout = OpenWrite[file <> ".dat", BinaryFormat -> True];
 ReadList[strm, "String", 19];
 numasci =
 ToExpression@StringSplit[ReadList[strm, "String", 1], ", "][[1, 3]];
 ReadList[strm, "String", 2];
 head1 = StringSplit[ReadList[strm, "String", 1], ", "];
 ReadList[strm, "String", 1];
 head2 = StringSplit[ReadList[strm, "String", 1], ", "];
 head = Flatten@Prepend[Drop[head1[[1]], 1], head2[[1, {2}]]];
 head = StringReplace[head, "\"\" -> \""];
 col = Length@head;
 format = Flatten@
 {"Real64", ConstantArray[If[Klima == 1, "Real32", "Integer32"], col - 1]};

 data1 = StringSplit[ StringReplace[ ReadList[strm, "String"] ,
 {"\" +OVER\" -> "0", "\" -OVER\" -> "0"}] , ", "];
 BinaryWrite[strmout, Flatten@{col, numasci, ConstantArray[0, col - 2]},
 format]; (*!!! Erste Zeile enthält nur Anzahl der Spalten &
 Zeilen/Datensätze !!!*)
 BinaryWrite[strmout,
 Flatten@{AbsoluteTime[ToExpression@
 Join[StringReplace[StringSplit[data1[[#, 2]], "/"], "\"\" -> \""],
 StringReplace[StringSplit[data1[[#, 3]], ":"], "\"\" -> \""]]],
 ToExpression[
 data1[[#, 5 ;; -1]]
 ]}
 , format] & /@ Range[Length@data1];

 Close[strm];
 Close[strmout];]
```

Check/Update Functions for ASCII to BIN conversion

```
In[18]:= (*Funktionen zum Auslesen, der Anzahl der Zeilen/Datensätze *)
CheckLengthASCII[filename_] :=
Module[{strm, numasci, head1, head2, data, data1}, strm = OpenRead[filename];
ReadList[strm, "String", 19];
numasci =
ToExpression@StringSplit[ReadList[strm, "String", 1], ","][[1, 3]];
Close[strm]; numasci];
(*!!! Vor Ausführung muss Variable Klima definiert werden
(Klima = 1 für Klimadaten | Klima = 0 für KMS-Daten) !!!*)
CheckLengthBIN[filename_] := Module[{formswitch, format},
format = Flatten@{"Real64", If[Klima == 1, "Real32", "Integer32"]};
Round@Last@Last@BinaryReadList[filename, format, 1]
(* Auslesen der Erste Zeile & 2 Spalte = Anzahl der Zeilen/Datensätze *)
];
```

```
In[20]:= (*Funktion zum Überprüfen ob neu/aktuellere ASCII-Dateien vorhanden sind *)
UpdateFile[i_] := Module[{asciidateien, itext, bindateien},
asciidateien = ListASCIIFiles[datapfad, "All"];
bindateien = ListBINFiles[datapfad, "All"];
Progbar[Dynamic[i], Length@asciidateien, Dynamic[itext]];
For[i = 1, i <= Length@asciidateien,
i++, (*Begin der Schleife über Dateien*)
If[i > Length@bindateien || CheckLengthASCII[ListASCIIFiles[datapfad, i]] !=
CheckLengthBIN[ListBINFiles[datapfad, i]],
itext = "import";
ASCIItoBIN[ListASCIIFiles[datapfad, i]];
itext = "OK";];
] (*Ende der Schleife über Dateien*);
i = Length@asciidateien;
itext = "finished";];

Progbar[i_, imax_, itext_] :=
Print[{{ProgressIndicator[Dynamic[i], {0, imax}], Dynamic[i],
"/", imax, Dynamic[itext]}} // Grid]
```

Import Binary-Files

In[22]=

```
(*Imports Binary-File*)
ImportBinaryFile[filename1_] :=
Module[{data, format, col, filename = filename1},
col = Round@First@BinaryReadList[filename, "Real64", 1];
(* Auslesen der Erste Zeile & 1 Spalte = Anzahl der Spalten *)
format = Flatten@
{"Real64", ConstantArray[If[Klima == 1, "Real32", "Integer32"], col - 1]};
data = BinaryReadList[filename, format];
data = data[[2 ;; -1]];
Return[data];]

(*Import Binary-File Klimadaten;
ist erforderlich zum Laden der Klimadaten ohne Variable Klima zu setzen *)
ImportKlimabin[filename1_] :=
Module[{data, format, col, filename = filename1},
col = Round@First@BinaryReadList[filename, "Real64", 1];
(* Auslesen der Erste Zeile & 1 Spalte = Anzahl der Spalten *)
format = Flatten@{"Real64", ConstantArray["Real32", col - 1]};
data = BinaryReadList[filename, format];
data = data[[2 ;; -1]];
Return[data];]
```

Composition of Compiled Binary-File

Create Compiled file from scratch

In[24]=

```
(* Erstellen eines zusammenhängenden Binary-
Files pro Kette und exportiert diese in den Ornder Combine_Files// *)
(* mit dieser Funktion werden die Binary- Files komplett neu erstellt *)
(*!!! Vor Ausführung muss Variable "datapfad" & Klima definiert
werden (Klima = 1 für Klimadaten | Klima = 0 für KMS-Daten) !!!*)
(* KMS-01-24 ... datapfad = NotebookPath <>"Rawdat_KMS-01-24\\" *)
(* KMS-25-29 ... datapfad = NotebookPath <>"Rawdat_KMS-25-29\\" *)
(* Klima ... datapfad = NotebookPath <>"Rawdat_Kima\\" *)
ComposeSingleBIN[] :=
Module[{filenames, Kettennummer, filename, strmout, rawdata, col,
format, numasci, numfiles = Length@ListBINFiles[datapfad, "All"]},
rawdata = ConstantArray[0, numfiles];
{rawdata[[#]] = ImportBinaryFile[
ListBINFiles[datapfad, (*Filenummer*)#]} & /@ Range@numfiles;
rawdata = SortBy[Flatten[rawdata, 1], First];
col = Length@First@rawdata;
filenames =
{ {"Kette01", "Kette02", "Kette03", "Kette04", col == 25
"Kette05", "Kette06", "Kette07", "Kette08", "Kette09",
"Kette10", "Kette11", "Kette12", "Kette13", "Kette14",
"Kette15", "Kette16", "Kette17", "Kette18", ;
"Kette19", "Kette20", "Kette21", "Kette22", "Kette23", "Kette24"}
{"Kette25", "Kette26", "Kette27", "Kette28", "Kette29"} col == 6
{"Klima"} col == 3

Do[(*Beginn Schleife über einzelne Ketten/Klima*)
Kettennummer = ToExpression@filename;
strmout = OpenWrite[NotebookPath <>
"Combined_Files\\" <> filename <> ".dat", BinaryFormat -> True];
format = Flatten@{"Real64", If[Klima == 1,
{"Real32", "Real32"}, "Integer32"]};
If[filename == "Klima",
BinaryWrite[strmout, rawdata[[All, {1, 2, 3}]], format];,
BinaryWrite[strmout, rawdata[[All, {1, Kettennummer}]], format];];
Close[strmout];
, {filename, filenames}] (*Ende Schleife über einzelne Ketten/Klima*);
Print["Complete"];]
```

Update Compiled file

In[25]=

```
(* Erstellt eine Liste der Roh Binary-Files welche neue Daten enthalten *)
ListFileswithNewData[date_] :=
Module[{file, res, files = ListBINFiles[datapfad, "All"],
  numfiles = Length@ListBINFiles[datapfad, "All"],
  it, strmout, col, strmopos, lastentry, format},
  res = {}; it = 0;
  Do[(*Beginn Schleife über Roh Binary-Files*)
    it = it + 1;
    strmout = OpenRead[file, BinaryFormat → True];
    col = Round@First@BinaryReadList[strmout, "Real64", 1];
    strmopos = -(8 + 4 * (col - 1));
    format = Flatten@{"Real64", ConstantArray[
      If[Klima == 1, {"Real32", "Real32"}, "Integer32"], col - 1]};
    SetStreamPosition[strmout, strmopos];
    lastentry = BinaryReadList[strmout, format, 1];
    lastentry = First@First@lastentry;
    (*Zeit des letzten Eintrages*)
    Close[strmout];
    If[lastentry >= date, AppendTo[res, it]]
    , {file, files}] (*End Schleife über Roh Binary-Files*);
  Return[res] ]
```

In[26]=

```
AppenNewDataToSingleBin[selector_] :=
Module[{files, currentfile, filename, strmout,
  strmopos, PosLastentry, lastentry, lastentryprevious,
  rawdata, col, format, numasci, numfiles, selectedfiles, it},

  If[selector == "1bis24",
    files = ListBINFiles[NoteBookPath <> "Combined_Files\\", "All"][[1 ;; 24]];
    , If[selector == "25bis29", files =
      ListBINFiles[NoteBookPath <> "Combined_Files\\", "All"][[25 ;; 29]];
      , files = {NoteBookPath <> "Combined_Files\\Klima.dat"};] ];
  (*List of Filenames*)
  format =
    Flatten@{"Real64", If[Klima == 1, {"Real32", "Real32"}, "Integer32"]};
  PosLastentry = If[Klima == 1, -8 - 2 * 4, -8 - 1 * 4];
  lastentryprevious = 0;

  Do[(*Start Schleife über Ketten*)

    strmout = OpenRead[currentfile, BinaryFormat → True];
    SetStreamPosition[strmout, PosLastentry];
    lastentry = First@BinaryReadList[strmout, "Real64", 1];
    (*letzter Zeit-Eintrag in Single Binary-File*)
    Close[strmout];
    filename =
      Last@StringDrop[StringSplit[currentfile, "Combined_Files\\"], -4]
      (*Name des aktuellen Single Binary-File*);

    If[lastentry ≠ lastentryprevious,
```

```
(*Falls letzte Kette selben Endzeitpunkt  
hat wird ein erneutes Einlesen der Daten übersprungen*)  
selectedfiles = ListFileswithNewData[lastentry];  
numfiles = Length[selectedfiles]; rawdata = ConstantArray[0, numfiles];  
  
it = 0;  
Do[(*Beginn der Schleife zum Einlesen der Roh Binary-  
Files welche neue Daten enthalten*)  
  it =  
  it +  
  1;  
  (rawdata[[it]] = ImportBinaryFile[ListBINFiles[  
    datapfad, (*Filenummer*) file])];  
  , {file, selectedfiles}] (*Ende der Schleife zum Einlesen  
  der Roh Binary-Files welche neue Daten enthalten*);  
  
rawdata = SortBy[Flatten[rawdata, 1], First];  
rawdata = DataPicker[rawdata, 1, lastentry + 1, 5.0`*^10]  
(*Filter der Rohdaten nach neuen Einträgen*);];  
  
If[Length@rawdata > 1,  
  (*Falls keine neuen Daten vorhanden überspringen*)  
  strmout = OpenAppend[currentfile, BinaryFormat -> True];  
  If[filename == "Klima",  
    BinaryWrite[strmout, rawdata[[All, {1, 2, 3}]], format];,  
    BinaryWrite[strmout, rawdata[[All, {1, ToExpression@filename}]],  
      format];];  
  Close[strmout];  
];  
  
lastentryprevious = lastentry;  
  , {currentfile, files}] (*Ende Schleife über Ketten*);  
Print["Update Complete"];  
];
```

Import Compiled Binary-File

In[27]=

```
(*Import Compiled File*)
ImportCompiledKette[filename_] :=
Module[{rawdata, KettenNamen, data,
  datathin, klimadat, Temperatur, Luftfeuchtigkeit},
  rawdata = BinaryReadList[filename, {"Real64", "Integer32"}];
  Partition[ Flatten[
    (Riffle[(rawdata[[All, 1]] + 3600), rawdata[[All, 2]]) ] , 2] ];

ImportCompiledKlima[filename_] :=
Module[{rawdata, KettenNamen, data,
  datathin, klimadat, Temperatur, Luftfeuchtigkeit},
  rawdata = BinaryReadList[filename, {"Real64", "Real32", "Real32"}];
  Partition[
    Flatten[ (Riffle[Riffle[(rawdata[[All, 1]] + 3600), rawdata[[All, 2]]],
      rawdata[[All, 3]], 3)] ] , 3] ];
```

Data Pre-Filter

In[29]=

```
(*Vorfilterung der Daten*)
PreFilterData[rawthindata_, stepsize_, delta_] :=
Module[{rawthindatam = rawthindata, thindata, stepForce,
  steps1, stepspos, steps11, steps12, steps13, Thinpositions,
  steps = Flatten@{Range[1, Length@rawthindata, stepsize],
    Length@rawthindata, Length@rawthindata}},
  thindata = {};
  stepForce = rawthindatam[[steps, 2]];
  steps1 = UnitStep[-delta + Abs@Differences[stepForce]];

  stepspos = Flatten@Position[steps1, 1];
  steps11 = steps[[stepspos]];
  steps12 = steps[[stepspos + 1]];
  steps13 = Partition[Riffle[steps11, steps12 - 1], 2];
  Thinpositions = Flatten@{steps, Range[#[[1]], #[[2]]] & /@ steps13};
  Thinpositions = DeleteDuplicates@Sort@Thinpositions;

  rawthindata[[Thinpositions]]
]
```

Excel Export

In[30]=

```
(*Erstelle Excel-Daeti für weitere Auswertungen*)
CreateXLSX[Von_, Bis_, stepsize_, delta_, exlusioentimes_List
  (*Liste der ExclusionTimes {{von,bis},{von2,bis2}}*)] :=
Module[{name, Files, KettenNamen, data, datathin,
  klimadat, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, von, bis},
  (*Laden der Klimadaten*)
  (*Print["Import Klimadaten"];
  klimadat=FilterKlima[
    ImportCompiledKlima[NoteBookPath <>"Rawdat_Kima\\Klima.dat" ]];
  Temperatur=Interpolation[ klimadat[[All,{1,2}]] ,InterpolationOrder->1];
  Luftfeuchtigkeit=
```

```

Interpolation[ klimadat[[All,{1,3}]] ,InterpolationOrder->1];*)
Files = ListBINFiles[NoteBookPath <> "Combined_Files\\", "All"];
KettenNamen =
StringDrop[StringSplit[Files, "Combined_Files\\"][[All, 2]], -4];

Do[(*Beginn der Schleife über Ketten*)
Progbar[Dynamic[1 + it - Von], Bis - Von + 1, Dynamic[name]];
Needs["JLink"];
ReinstallJava[JVMArguments -> "-Xmx120000m"];

name = KettenNamen[[it]];
If[name == "Klima",
data = ImportCompiledKlima[Files[[it]]];
data = {TimeConversionMathToExcell@data[[All, 1]],
Round[data[[All, 2]], 0.1], Round[data[[All, 3]], .1]};
data1 = Transpose@data; NumberMeanValues = 10;
data1 = Sum[data1[[i ;; -NumberMeanValues + (i - 1) ;; NumberMeanValues]],
{i, 1, NumberMeanValues}]/NumberMeanValues;
data1 = FilterKlima[data1];
Export[NoteBookPath <> "Export_XLS\\" <> name <> ".xlsx", data1];
Export[NoteBookPath <> "Export_XLS_light\\" <> name <> ".xlsx", data1];
data1 = .;
,
If[name == "Kette23", (*Kette 23 überspringen*),
data = ImportCompiledKette[Files[[it]]];
datathin = PreFilterData[data, stepsize
(*Stepsize [s]*), delta(*Kraft-Delta [N]*)];
datathin = {TimeConversionMathToExcell@datathin[[All, 1]],
datathin[[All, 2]] (*,
Round[Temperatur[datathin[[All,1]]], .1],
Round[Luftfeuchtigkeit[datathin[[All,1]]], 1]*}
(*Einspielen der zugehörigen Klimadaten der Kette*);
data1 = Transpose@datathin;

Do[(*Beginn der Schleife über ExclusionTimeDataForKette*)
If[Length@ExclusionTimeDataForKette[[it, it2, 3]] ≠ 0 &&
Length@ExclusionTimeDataForKette[[it, it2, 4]] ≠ 0,
von = TimeConversionMathToExcell@AbsoluteTime[
ExclusionTimeDataForKette[[it, it2, 3]]];
bis = TimeConversionMathToExcell@AbsoluteTime[
ExclusionTimeDataForKette[[it, it2, 4]]];
data1 = DataExcluder[data1, 1(*Zeit*), von(*Min*), bis(*Max*)];]
(*Loop for ExcludeData*),
{it2, Range[Length@ExclusionTimeDataForKette[[it]] ]}]
(*Ende der Schleife über ExclusionTimeDataForKette*);

data1 = DataExcluderMultiple[
data1, 1, exlusiontimes(*{{von,bis},{von2,bis2}}*)];
(*Manuelles herauschneiden von Zeitbereichen*)
data1 = ForceCorrection[data1, it];
(*Kraftkorrekturen Kriechen & Nachkalibrierung*)
Export[NoteBookPath <> "Export_XLS\\" <> name <> ".xlsx", data1];
(*Excel-Export der Vorgefilterten Daten*)

```

```

(*Beginn Nachfiltern der Daten auf ΔF = 10N*)
ref = data1[[1, 2]];
Thinpositions = Reap[Sow[1];
  Do[ If[Abs@(data1[[i, 2]] - ref) ≥ 10,
      ref = data1[[i, 2]];
      Sow[i]; ],
    , {i, 2, Length@data1}]];
Thinpositions = Thinpositions[[2, 1]];
(*Ende Nachfiltern der Daten auf ΔF = 10N*)

Export[NoteBookPath <> "Export_XLS_light\\" <> name <> ".xlsx",
  data1[[Thinpositions]]];
(*Excel-Export der gefilterten Daten*)

data1 = .;
]];
UninstallJava[];

, {it, Von, Bis}] (*Ende der Schleife über Ketten*);
name = "finished";
]

```

Update Composed Files

Load Data from Versuchstagebuch

ListXLSFiles[PathToVersuchstagebuch]

Nr.	File
1	Versuchstagebuch_2018-03-07.xlsx

In[31]=

```

(*Laden der Daten aus dem Versuchstagebuch*)
FILENUM = 1;
Needs["JLink`"];
ReinstallJava[JVMArguments → "-Xmx11000m"];
ImportForceCorrectionDataFromVersuchstagebuch[FILENUM]
ForceCorrectionDataForKette[[1]];
ImportTimeDataFromVersuchstagebuch[FILENUM]
ExclusionTimeDataForKette[[1]];
UninstallJava[];

```

Out[34]=

Data loaded

Out[36]=

Data loaded

Compose single File Kette 01-24

In[42]=

```
(*für KMS-01-24*)  
datapfad = NotebookPath <> "Rawdat_KMS-01-24\\"; i1 = .;  
Expname = "KMS-01-24"; Klima = 0 (*für Klima=1, sonst 0*);  
UpdateFile[i1]
```

84 / 84 finished

```
AppenNewDataToSingleBin["1bis24"]
```

Update Complete

```
ComposeSingleBIN[] (*nur zum Neu erstellen der Datei*)
```

Complete

Compose single File Kette 25-29

In[45]=

```
(*für KMS-25-29*)  
datapfad = NotebookPath <> "Rawdat_KMS-25-29\\"; i2 = .;  
Expname = "KMS-25-29"; Klima = 0 (*für Klima=1, sonst 0*);  
UpdateFile[i2]
```

31 / 31 finished

```
AppenNewDataToSingleBin["25bis29"]
```

Update Complete

```
ComposeSingleBIN[] (*nur zum neu erstellen der Datei*)
```

Complete

Compose single File Klima

In[48]=

```
(*für Klima*)  
datapfad = NotebookPath <> "Rawdat_Klima\\"; i3 = .;  
Expname = "Klima"; Klima = 1 (*für Klima=1, sonst 0*);  
UpdateFile[i3]
```

31 / 31 finished

```
AppenNewDataToSingleBin["Klima"]
```

Update Complete

```
ComposeSingleBIN[]
```

Complete

EXPORT Excel Files

List Composed Files

ListBINFiles [NoteBookPath <> "Combined_Files\\"]

Nr.	File
1	Kette01.dat
2	Kette02.dat
3	Kette03.dat
4	Kette04.dat
5	Kette05.dat
6	Kette06.dat
7	Kette07.dat
8	Kette08.dat
9	Kette09.dat
10	Kette10.dat
11	Kette11.dat
12	Kette12.dat
13	Kette13.dat
14	Kette14.dat
15	Kette15.dat
16	Kette16.dat
17	Kette17.dat
18	Kette18.dat
19	Kette19.dat
20	Kette20.dat
21	Kette21.dat
22	Kette22.dat
23	Kette23.dat
24	Kette24.dat
25	Kette25.dat
26	Kette26.dat
27	Kette27.dat
28	Kette28.dat
29	Kette29.dat
30	Klima.dat

Export Excel Files

```
CreateXLSX[(*Von*)1, (*Bis*)29, (*Schrittgröße in [s]*)60,
(*Kraftunterschied [N]*)20, (*Exclusionstimes {{von,bis},{von2,bis2}}*)
{{AbsoluteTime[{2016, 1, 1, 0, 0}(*{y,m,d,h,m,s}*)],
AbsoluteTime[{2016, 8, 1, 0, 0}(*{y,m,d,h,m,s}*)]}}]
```

29 / 29 finished

```
CreateXLSX[(*Von*)30, (*Bis*)30, (*Schrittgröße in [s]*)60,
(*Kraftunterschied [N]*)20, (*Exclusionstimes {{von,bis},{von2,bis2}}*)
{{AbsoluteTime[{2016, 1, 1, 0, 0}(*{y,m,d,h,m,s}*)],
AbsoluteTime[{2016, 8, 1, 0, 0}(*{y,m,d,h,m,s}*)]}}]
```

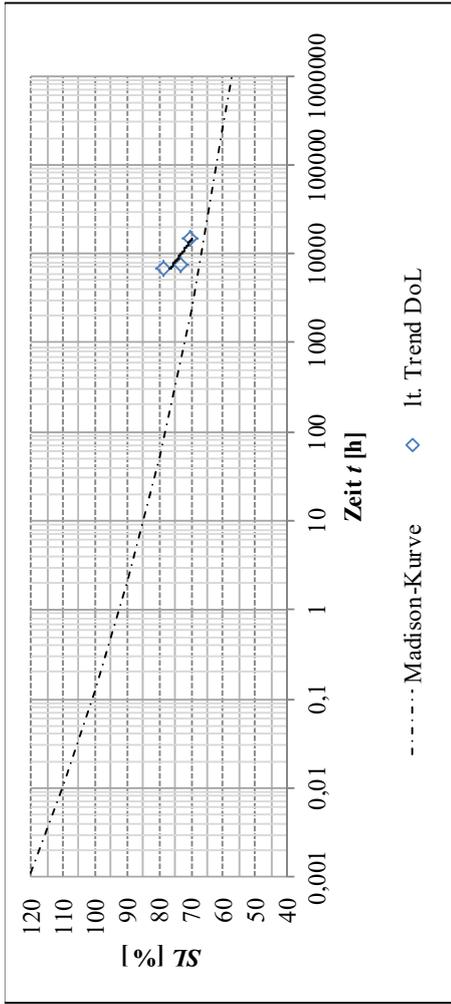
29 / 29 finished

B-4 Ergebnisse der Langzeitversuche

In den Abb. Anhang B-3 bis Abb. Anhang B-38 sind die Ergebnisse der DoL Untersuchungen der einzelnen Serien dargestellt. Dabei ist in jeder Abbildung die Bezeichnung des jeweiligen Probekörpers, die Holzfeuchte u die Rohdichte ρ_u und die Rohdichte ρ_{12} angegeben. Beim jeweiligen Lastniveau ist darauf zu achten, ob es sich um einen vorläufigen Wert handelt, oder ob der Rang und somit das Lastniveau fix definiert ist. Wenn es sich um einen vorläufigen Rang handelt, so ist dieser Wert mit einem Stern versehen und geht nicht in die Berechnung der Regressionsgleichungen ein. In der Spalte t_{ramp} wird die Summe aller akkumulierten Zeiten der Anspannvorgänge angegeben. In der Spalte t_{const} werden die akkumulierten Zeiten entsprechend dem Versuchstagebuch angegeben. Diese berücksichtigen keine Abweichungen von der Zielkraft und geben demzufolge nur jene akkumulierten Zeiten vom Ende des Anspannvorganges bis zum Bruch wider. Unter $F_{\text{ax},0}$ wird die Zielkraft verstanden. Wird diese Kraft nicht erreicht (wenn der Probekörper beim Anspannvorgang versagt), so wird der jeweilige erreichte Maximalwert angegeben.

In den letzten vier Spalten werden gewichtete Zeiten angegeben, die den Kraftverlauf über die Zeit berücksichtigen. Da sich bereits bei kleinen Abweichungen der Zielkraft ein hoher Gewichtungsfaktor ergibt, kann es durchaus sein, dass die gewichteten Zeiten stark von den Zeiten laut Versuchstagebuch abweichen. Als erste Annäherung wurde die Madison Kurve zur Gewichtung angewendet. Es ergibt sich ein Gewichtungsfaktor von 1,0, wenn die jeweilige gemessene Kraft exakt der Zielkraft entspricht. Im Anschluss wurde in einem iterativen Prozess Gewichtungsfunktionen in Abhängigkeit der Holzart bzw. –produkt und des Schraubentyps bestimmt. Auf Basis dieser Gewichtungsfunktionen wurden die Zeiten in Abhängigkeit des jeweiligen Kraftverlaufes modifiziert und wurden für Berechnung der Trendlinien herangezogen.

Zusätzlich zu den Tabellen wurde noch jeweils ein Diagramm gezeigt, bei dem das Lastniveau auf der Ordinate und die Zeit bis zum Versagen in einem logarithmischen Maßstab der Basis 10 auf der Abszisse aufgetragen ist. Zu Vergleichszwecken wurde in jedem Diagramm die hyperbolische Form der Madison Kurve dargestellt.

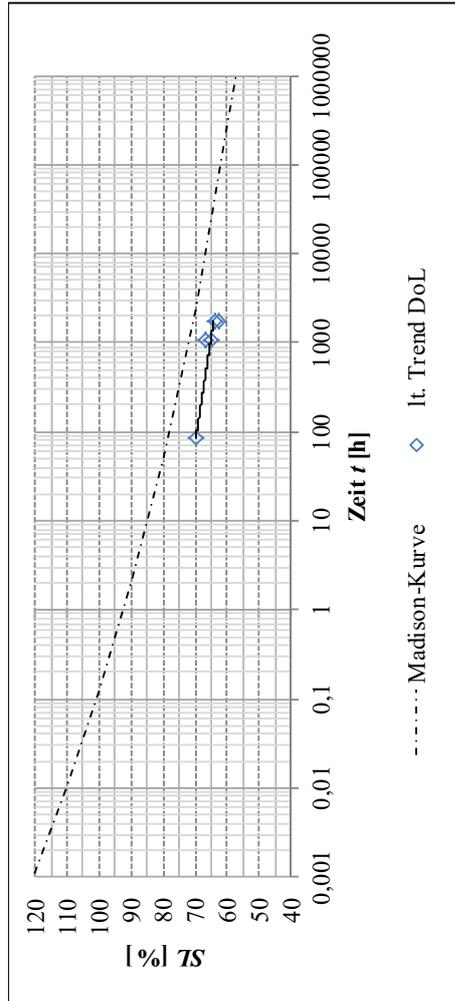


Prototyp1-60-32-060-Fichte-XYZ-ABC	
Holzart	FI Fichte
LJ	60 %
Schraubentyp	P1 Prototyp1
Eindrehlänge	60 mm
Einbindelänge	32 mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u		ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstagebuch				It. Madison		It. Trend DoL		
	[%]					t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]	
K01-1-P1-60-32-060-FI-B08-007														
K01-2-P1-60-32-060-FI-B08-007														
K01-3-P1-60-32-060-FI-B09-007	16,3		475	465	73,38*	0,10	2.484,18	103,51	3500	5.807,42	241,98	7.640,30	318,35	
K01-4-P1-60-32-060-FI-B09-007	16,3		480	470	70,13*	0,11	5.796,36	241,51	3500	11.765,98	490,25	14.503,95	604,33	
K01-5-P1-60-32-060-FI-B10-008														
K01-6-P1-60-32-060-FI-B10-008														
K01-3-P1-60-32-060-FI-B05-011					78,37*	0,01	1.214,49	50,60	3500	4.735,37	197,31	6.652,64	277,19	
K01-4-P1-60-32-060-FI-B05-011														
Median	16,3		478	467	73,38*	0,10	2484,18	103,51	3500	5807,42	241,98	7640,30	318,35	
Mittelwert	16,3		478	467	73,96*	0,08	3165,01	131,88	3500	7436,26	309,84	9598,96	399,96	
Standardabweichung	0,0		3	3	4,15*	0,05	2365,59	98,57	-	3787,77	157,82	4276,45	178,19	
CV [%]	0,2		0,7	0,7	5,61*	70,88	74,74	74,74	-	50,94	50,94	44,55	44,55	

Abb. Anhang B-3: FI-PI-32-060_K01



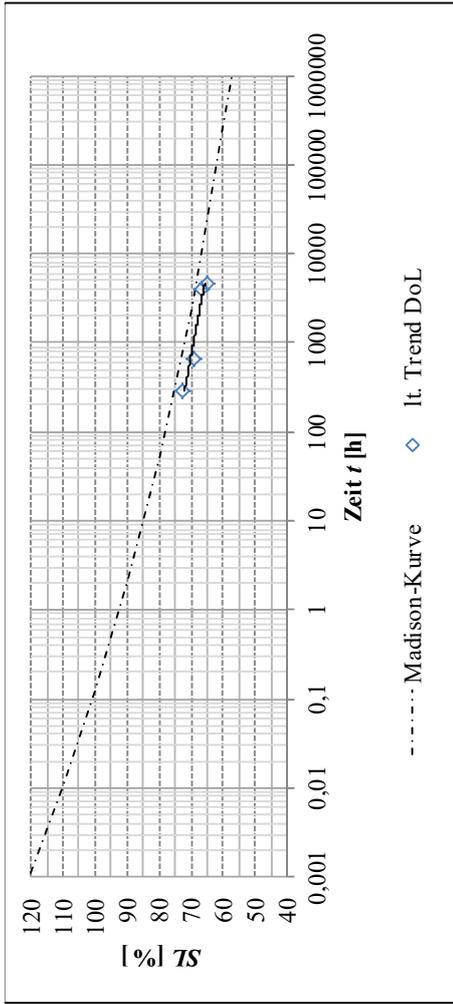
Referenzschraube-60-32-060-Fichte-XYZ-ABC

Holzart	FI	Fichte
LJ	60	%
Schraubentyp	RF	Referenzschraube
Eindrehlänge	60	mm
Einbindelänge	32	mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC	

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u [%]	ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SL [%]	It. Versuchstagebuch				It. Madison		It. Trend DoL	
					t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]
K02-1-RF-60-32-060-FI-B07-007				62,78*	0,10	2.591,60	107,98	3950	1.744,33	72,68	1.767,59	73,65
K02-2-RF-60-32-060-FI-B07-007												
K02-3-RF-60-32-060-FI-B05-007	16,3	440	431	69,5*	0,02	178,88	7,45	3950	83,36	3,47	85,97	3,58
K02-4-RF-60-32-060-FI-B05-007	16,1	448	439	66,97*	0,04	1.423,10	59,30	3950	1.078,54	44,94	1.088,14	45,34
K02-5-RF-60-32-060-FI-B06-007	16,3	444	435	65,28*	0,05	1.435,45	59,81	3950	1.084,64	45,19	1.094,42	45,60
K02-6-RF-60-32-060-FI-B06-007	16,4	446	436	63,94*	0,09	2.590,18	107,92	3950	1.742,24	72,59	1.765,51	73,56
K02-3-RF-60-32-060-FI-B10-011												
K02-4-RF-60-32-060-FI-B10-011												
K02-5-RF-60-32-060-FI-B12-011												
K02-6-RF-60-32-060-FI-B12-011												
Median	16,3	445	435	65,28*	0,05	1435,45	59,81	3950	1084,64	45,19	1094,42	45,60
Mittelwert	16,3	445	435	65,69*	0,06	1643,84	68,49	3950	1146,62	47,78	1160,33	48,35
Standardabweichung	0,1	3	3	2,64*	0,03	1004,00	41,83	-	680,26	28,34	688,98	28,71
CV [%]	0,6	0,7	0,8	4,01*	54,26	61,08	61,08	-	59,33	59,33	59,38	59,38

Abb. Anhang B-4: FI-RF-32-060_K02

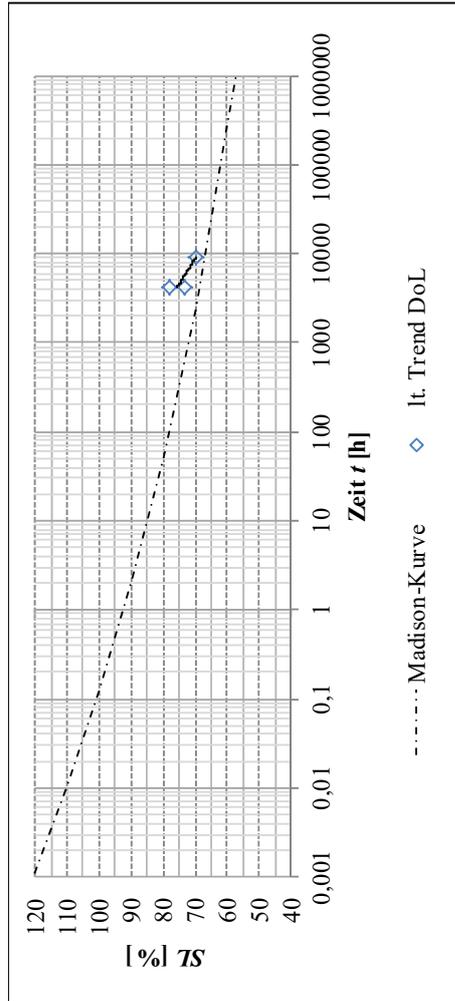


Prototyp1-60-16-060-Fichte-XYZ-ABC	
Holzart	FI Fichte
LJ	60 %
Schraubentyp	P1 Prototyp1
Eindrehlänge	60 mm
Einbindelänge	16 mm
P-fostenbezeichnung	XYZ-ABC

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u		ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstagebuch				It. Madison		It. Trend DoL					
	[%]					t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]				
K03-1-P1-60-16-060-FI-B01-007																	
K03-2-P1-60-16-060-FI-B01-007																	
K03-3-P1-60-16-060-FI-B02-007	16,3		427	418	72,72*	0,03	929,32	38,72	3120	331,77	13,82	281,22	11,72				
K03-4-P1-60-16-060-FI-B02-007	16,4		433	424	69,31*	0,04	2.302,59	95,94	3120	779,70	32,49	653,99	27,25				
K03-5-P1-60-16-060-FI-B03-007																	
K03-6-P1-60-16-060-FI-B03-007																	
K03-3-P1-60-16-060-FI-B11-010																	
K03-4-P1-60-16-060-FI-B11-010						67,05*	0,03	4.465,53	186,06	3.947,41	164,48	3.970,29	165,43				
Median	16,3		430	421	68,18*	0,03	3384,06	141,00	3120	2363,56	98,48	2312,14	96,34				
Mittelwert	16,3		430	421	68,59*	0,04	3589,84	149,58	3120	2437,25	101,55	2374,61	98,94				
Standardabweichung	0,1		4	4	3,21*	0,02	2512,64	104,69	-	2201,24	91,72	2221,86	92,58				
CV [%]	0,4		1,0	0,9	4,68*	39,20	69,99	69,99	-	90,32	90,32	93,57	93,57				

Abb. Anhang B-5: FI-PI-16-060_K03

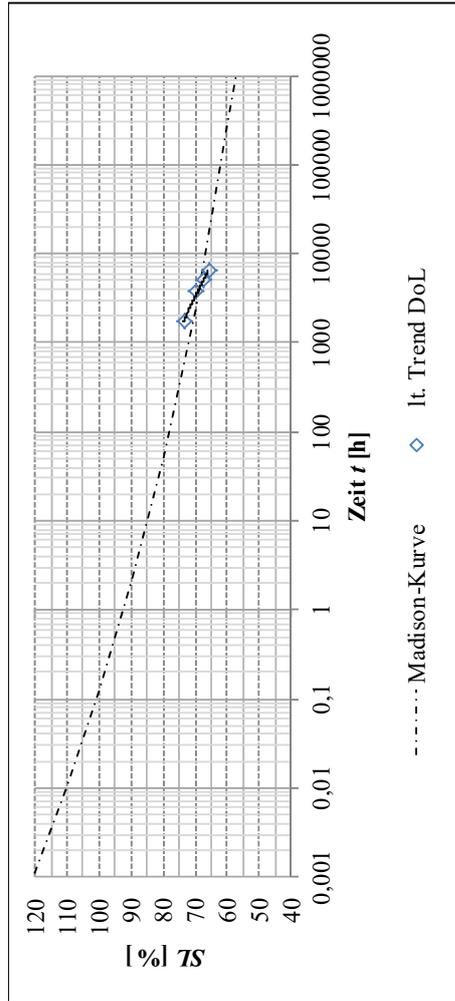


Referenzschraube-60-16-060-Fichte-XYZ-ABC	
Holzart	FI Fichte
LJ	60 %
Schraubentyp	RF Referenzschraube
Eindrehlänge	60 mm
Einbindelänge	16 mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u [%]	ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SL [%]	It. Versuchstagebuch				It. Madison		It. Trend DoL		
					t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]	
K04-1-RF-60-16-060-FI-B10-006													
K04-2-RF-60-16-060-FI-B10-006													
K04-3-RF-60-16-060-FI-B11-006													
K04-4-RF-60-16-060-FI-B11-006													
K04-5-RF-60-16-060-FI-B12-006	16,4	438	428	78*	0,03	2.291,72	95,49	3620	4.164,81	173,53	4.149,12	172,88	
K04-6-RF-60-16-060-FI-B12-006	16,4	452	442	69,93*	0,05	5.501,87	229,24	3620	9.010,80	375,45	8.982,10	374,25	
K04-5-RF-60-16-060-FI-B01-103													
K04-6-RF-60-16-060-FI-B01-103				73,12*	0,02	2.028,19	84,51	3620	4.289,73	178,74	4.274,92	178,12	
Median	16,4	445	435	73,12*	0,03	2291,72	95,49	3620	4289,73	178,74	4274,92	178,12	
Mittelwert	16,4	445	435	73,68*	0,04	3273,93	136,41	3620	5821,78	242,57	5802,05	241,75	
Standardabweichung	0,0	10	10	4,07*	0,02	1933,95	80,58	-	2762,48	115,10	2754,73	114,78	
CV [%]	0,2	2,3	2,3	5,52*	46,67	59,07	59,07	-	47,45	47,45	47,48	47,48	

Abb. Anhang B-6: FI-RF-16-060_K04

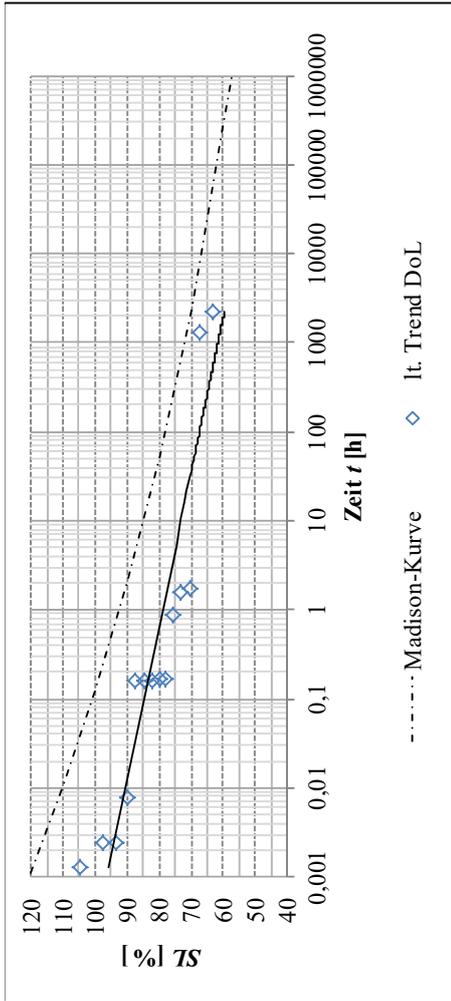


Referenzschraube-60-00-060-Fichte-XYZ-ABC	
Holzart	FI Fichte
LJ	60 %
Schraubentyp	RF Referenzschraube
Eindrehlänge	60 mm
Einbindelänge	00 mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u	ρ_u	ρ_{12}	SL	It. Versuchstagebuch				It. Madison		It. Trend DoL	
	[%]	[kg/m ³]	[kg/m ³]		t_{ramp} [h]	t_{const} [h]	t_{const} [d]	$F_{ax,0}$ [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]
K06-1-RF-60-00-060-FI-B04-006	16,4	446	437	69,81*	0,07	5.616,55	234,02	3470	3.708,46	154,52	3.760,02	156,67
K06-2-RF-60-00-060-FI-B04-006	16,5	443	433	65,56*	0,10	8.191,11	341,30	3470	6.365,06	265,21	6.417,08	267,38
K06-3-RF-60-00-060-FI-B05-006	16,6	428	418	67,43*	0,08	6.978,43	290,77	3470	4.971,21	207,13	5.025,59	209,40
K06-4-RF-60-00-060-FI-B05-006	16,6	430	420	73,42*	0,07	3.528,61	147,03	3470	1.694,75	70,61	1.742,78	72,62
K06-5-RF-60-00-060-FI-B08-006												
K06-6-RF-60-00-060-FI-B08-006												
K06-3-RF-60-00-060-FI-B11-104												
K06-4-RF-60-00-060-FI-B11-104												
K06-1-RF-60-00-060-FI-B12-105												
K06-2-RF-60-00-060-FI-B12-105												
Median	16,6	436	426	68,62*	0,07	6297,49	262,40	3470	4339,84	180,83	4392,81	183,03
Mittelwert	16,5	437	427	69,06*	0,08	6078,68	253,28	3470	4184,87	174,37	4236,37	176,52
Standardabweichung	0,1	9	9	3,39*	0,02	1999,03	83,29	-	1983,20	82,63	1985,22	82,72
CV [%]	0,5	2,1	2,2	4,91*	20,69	32,89	32,89	-	47,39	47,39	46,86	46,86

Abb. Anhang B-8: FI-RF-00-060_K06

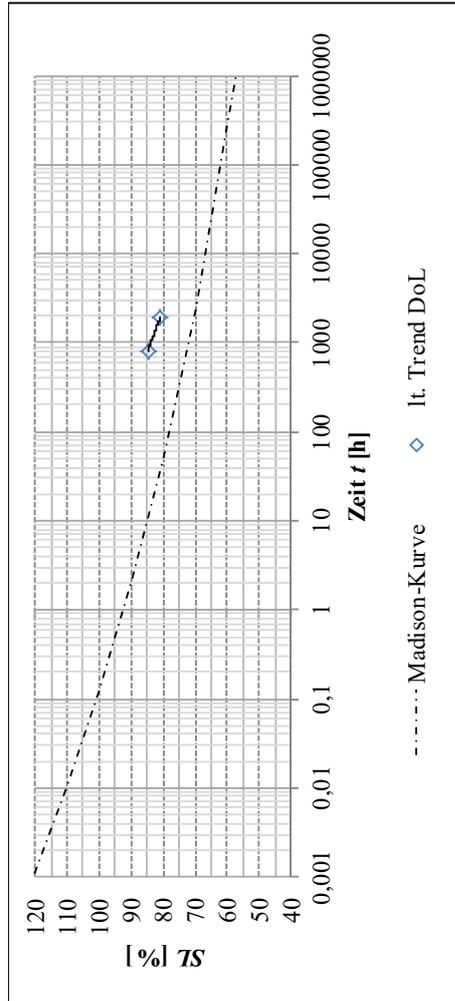


Prototyp1-60-32-080-Fichte-XYZ-ABC	
Holzart	FI Fichte
L1	80 %
Schraubentyp	P1 Prototyp1
Eindrehlänge	60 mm
Einbindelänge	32 mm
P-fostenbezeichnung	XYZ-ABC

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u		ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstagebuch					It. Madison		It. Trend DoL		
	[%]					t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]		
K07-1-P1-60-32-080-FI-B01-009	15,9		436	428	80,01	0,074	0,755	0,031	4670	0,011	0,011	0,269	0,011	0,166	0,007
K07-2-P1-60-32-080-FI-B01-009	16,0		458	449	77,75	0,078	0,766	0,032	4670	0,011	0,011	0,275	0,011	0,170	0,007
K07-3-P1-60-32-080-FI-B02-010	16,4		447	438	104,50	0,007	0,003	0,000	4670	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000
K07-4-P1-60-32-080-FI-B02-010	16,4		452	442	93,51	0,029	0,006	0,000	4670	0,000	0,000	0,003	0,000	0,002	0,000
K07-5-P1-60-32-080-FI-B03-010	16,2		463	454	90,12	0,041	0,017	0,001	4670	0,010	0,010	0,010	0,000	0,008	0,000
K07-6-P1-60-32-080-FI-B03-010	16,2		468	458	97,85	0,019	0,005	0,000	4670	0,000	0,000	0,003	0,000	0,002	0,000
K07-3-P1-60-32-080-FI-B04-010	16,2		449	439	70,42	0,080	1,282	0,053	4670	1,175	0,049	1,175	0,049	1,770	0,074
K07-4-P1-60-32-080-FI-B04-010	16,2		452	442	84,68	0,023	0,741	0,031	4670	0,264	0,011	0,264	0,011	0,162	0,007
K07-5-P1-60-32-080-FI-B06-010	16,6		439	428	87,25	0,024	0,731	0,030	4670	0,258	0,011	0,258	0,011	0,157	0,007
K07-6-P1-60-32-080-FI-B06-010	16,7		448	438	82,30	0,048	0,754	0,031	4670	0,267	0,011	0,267	0,011	0,162	0,007
K07-1-P1-60-32-080-FI-B07-011	16,1		448	439	75,46	0,019	0,384	0,016	4670	0,585	0,024	0,585	0,024	0,877	0,037
K07-2-P1-60-32-080-FI-B07-011	15,5		482	474	63,01	0,062	1,276,036	53,168	4670	1,659,268	69,136	1,659,268	69,136	2,270,283	94,595
K07-5-P1-60-32-080-FI-B08-011	16,1		455	446	73,06	0,016	0,501	0,021	4670	0,882	0,037	0,882	0,037	1,572	0,065
K07-6-P1-60-32-080-FI-B08-011	16,2		443	434	67,29	0,032	412,500	17,188	4670	755,056	31,461	755,056	31,461	1,291,786	53,824
Median	16,2		450	441	81,15	0,03	0,74	0,03	4670	0,27	0,01	0,27	0,01	0,16	0,01
Mittelwert	16,2		453	443	81,94	0,04	121,03	5,04	4670	172,74	7,20	172,74	7,20	254,79	10,62
Standardabweichung	0,3		12	12	11,92	0,02	350,09	14,59	-	472,76	19,70	472,76	19,70	674,48	28,10
CV [%]	1,8		2,7	2,8	14,54	63,02	289,25	289,25	-	273,69	273,69	273,69	273,69	264,72	264,72

Abb. Anhang B-9: FI-PI-32-080_K07



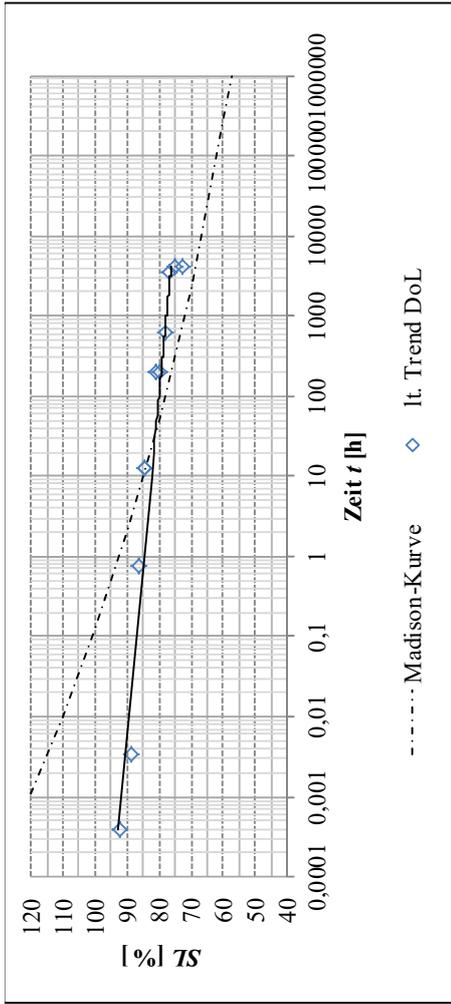
Prototyp1-60-16-070-Fichte-XYZ-ABC

Holzart	FI	Fichte
LJ	70	%
Schraubentyp	P1	Prototyp1
Eindrehlänge	60	mm
Einbindelänge	16	mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC	

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u	ρ_u	ρ_{12}	SL	It. Versuchstagebuch				It. Madison		It. Trend DoL	
	[%]	[kg/m ³]	[kg/m ³]		t_{ramp} [h]	t_{const} [h]	t_{const} [d]	$F_{ax,0}$ [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]
K07-1-P1-60-16-070-FI-B07-102				80,86*	0,02	1.653,57	68,90	3640	1.798,81	74,95	1.923,08	80,13
K07-2-P1-60-16-070-FI-B07-102												
K07-3-P1-60-16-070-FI-B08-102												
K07-4-P1-60-16-070-FI-B08-102												
K07-5-P1-60-16-070-FI-B09-102												
K07-6-P1-60-16-070-FI-B09-102				84,84*	0,01	764,25	31,84	3640	787,84	32,83	817,12	34,05
Median				82,85*	0,01	1208,91	50,37	3640	1293,32	53,89	1370,10	57,09
Mittelwert				82,85*	0,01	1208,91	50,37	3640	1293,32	53,89	1370,10	57,09
Standardabweichung				2,81*	0,00	628,85	26,20	-	714,86	29,79	782,03	32,58
CV [%]				3,4*	24,01	52,02	52,02	-	55,27	55,27	57,08	57,08

Abb. Anhang B-10: FI-P1-16-070_K07

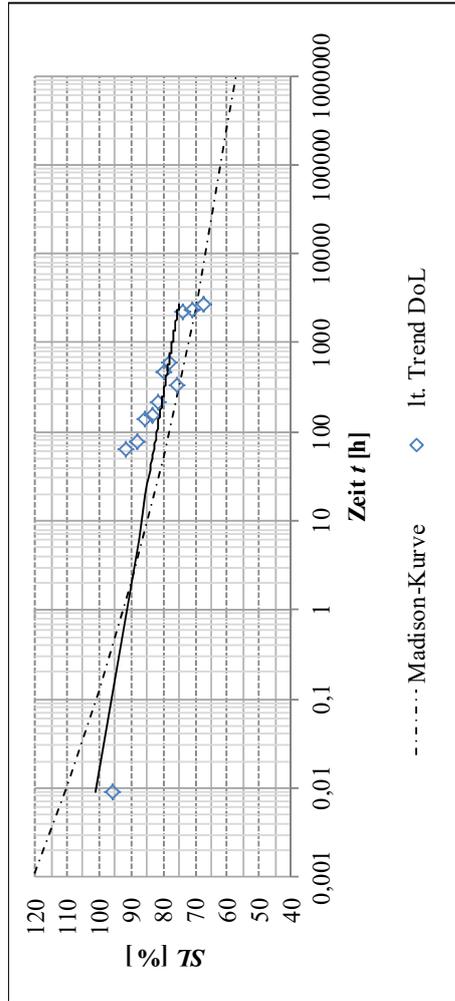


Referenzschraube-60-32-080-Fichte-XYZ-ABC	
Holzart	FI Fichte
LJ	80 %
Schraubentyp	RF Referenzschraube
Eindrehlänge	60 mm
Einbindelänge	32 mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u		p _u [kg/m ³]	p ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstagebuch					It. Madison		It. Trend DoL	
	[%]					t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]	t [h]
K08-1-RF-60-32-080-FI-B03-009	16,2		447	438	74,94	0,13	2.252,80	93,87	5270	3.334,57	138,94	4.101,88	170,91	
K08-2-RF-60-32-080-FI-B03-009	16,3		443	434	78,15	0,11	366,76	15,28	5270	484,71	20,20	615,02	25,63	
K08-3-RF-60-32-080-FI-B04-007	16,4		459	449	79,63	0,09	24,89	1,04	5270	96,62	4,03	199,71	8,32	
K08-4-RF-60-32-080-FI-B04-007	16,4		464	453	81,10	0,08	23,33	0,97	5270	93,88	3,91	196,11	8,17	
K08-5-RF-60-32-080-FI-B11-008	16,1		454	444	84,28	0,04	3,54	0,15	5270	8,44	0,35	12,86	0,54	
K08-6-RF-60-32-080-FI-B11-008	15,9		464	455	84,28	0,04	3,54	0,15	5270	8,44	0,35	12,86	0,54	
K08-5-RF-60-32-080-FI-B05-010	16,2		429	420	86,18	0,01	0,23	0,01	5270	0,52	0,02	0,77	0,03	
K08-6-RF-60-32-080-FI-B05-010	16,1		480	471	72,95	0,31	2.315,94	96,50	5270	3.398,57	141,61	4.165,25	173,55	
K08-3-RF-60-32-080-FI-B07-010					76,62	0,03	2.047,87	85,33	5270	2.947,03	122,79	3.538,14	147,42	
K08-4-RF-60-32-080-FI-B07-010					70,19									
K08-1-RF-60-32-080-FI-B12-010	15,7		434	426	88,53	0,01	0,01	0,00	5270	0,01	0,00	0,00	0,00	
K08-2-RF-60-32-080-FI-B12-010	16,0		429	421	92,00	0,01	0,00	0,00	5270	0,00	0,00	0,00	0,00	
Median	16,2		451	441	80,36	0,04	23,33	0,97	5270	93,88	3,91	196,11	8,17	
Mittelwert	16,1		450	441	80,74	0,08	639,90	26,66	5270	942,98	39,29	1167,51	48,65	
Standardabweichung	0,2		17	16	6,56	0,09	1013,11	42,21	-	1477,38	61,56	1793,22	74,72	
CV [%]	1,3		3,8	3,7	8,12	113,83	158,32	158,32	-	156,67	156,67	153,59	153,59	

Abb. Anhang B-11: FI-RF-32-080_K08



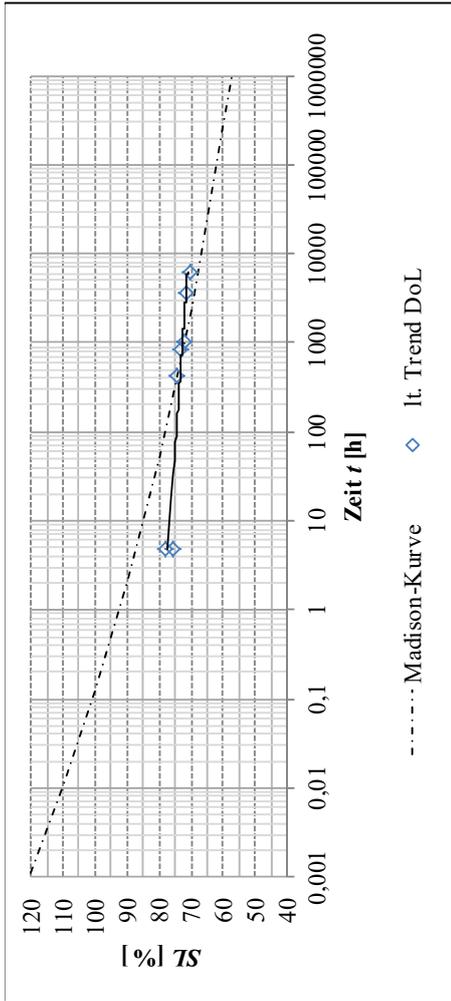
Prototyp1-60-16-080-Fichte-XYZ-ABC

Holzart	FI	Fichte
LJ	80	%
Schraubentyp	P1	Prototyp1
Eindrehlänge	60	mm
Einbindelänge	16	mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC	

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	μ	ρ_u	ρ_{12}	SL	It. Versuchstagebuch					It. Madison		It. Trend DoL	
	[%]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]	t_{ramp} [h]	t_{const} [h]	t_{const} [d]	$F_{ax,0}$ [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]	
K09-1-P1-60-16-080-FI-B04-008	16,5	449	438	75,78	0,08	2.380,18	99,17	4160	722,85	30,12	333,08	13,88	
K09-2-P1-60-16-080-FI-B04-008	16,6	456	445	73,63	85,11	3.201,68	133,40	4160	1.991,31	82,97	2.256,92	94,04	
K09-3-P1-60-16-080-FI-B05-008	16,5	427	417	83,57	0,06	1.354,86	56,45	4117	348,59	14,52	149,39	6,22	
K09-4-P1-60-16-080-FI-B05-008	16,4	438	428	71,10	85,12	3.396,38	141,52	4160	2.132,45	88,85	2.374,55	98,94	
K09-5-P1-60-16-080-FI-B06-008	16,4	445	435	85,75	0,03	975,92	40,66	4117	306,76	12,78	140,49	5,85	
K09-6-P1-60-16-080-FI-B06-008	16,5	442	432	96,07	0,01	0,06	0,00	4109	0,02	0,00	0,01	0,00	
K09-5-P1-60-16-080-FI-B09-009	16,1	527	516	67,63	85,11	2.941,02	122,54	4160	2.276,48	94,85	2.650,70	110,45	
K09-6-P1-60-16-080-FI-B09-009	16,4	477	466	81,57	85,06	1.414,60	58,94	4160	430,65	17,94	211,94	8,83	
K09-1-P1-60-16-080-FI-B10-102	18,5	448	434	88,25	0,01	90,26	3,76	4160	80,34	3,35	75,98	3,17	
K09-2-P1-60-16-080-FI-B10-102	18,1	450	437	77,75	0,03	754,06	31,42	4160	638,17	26,59	589,70	24,57	
K09-3-P1-60-16-080-FI-B11-102	16,4	457	447	91,39	0,01	68,33	2,85	4160	63,61	2,65	63,23	2,63	
K09-4-P1-60-16-080-FI-B11-102	16,4	457	447	79,66	0,02	559,35	23,31	4160	497,03	20,71	472,07	19,67	
Median	16,4	450	438	80,61	0,04	1165,39	48,56	4160	463,84	19,33	272,51	11,35	
Mittelwert	16,7	456	445	81,01	28,39	1428,06	59,50	4149	790,69	32,95	776,51	32,35	
Standardabweichung	0,7	25	25	8,46	41,89	1254,53	52,27	21	841,06	35,04	1013,60	42,23	
CV [%]	4,4	5,6	5,7	10,45	147,56	87,85	87,85	1	106,37	106,37	130,53	130,53	

Abb. Anhang B-12: FI-P1-16-080_K09

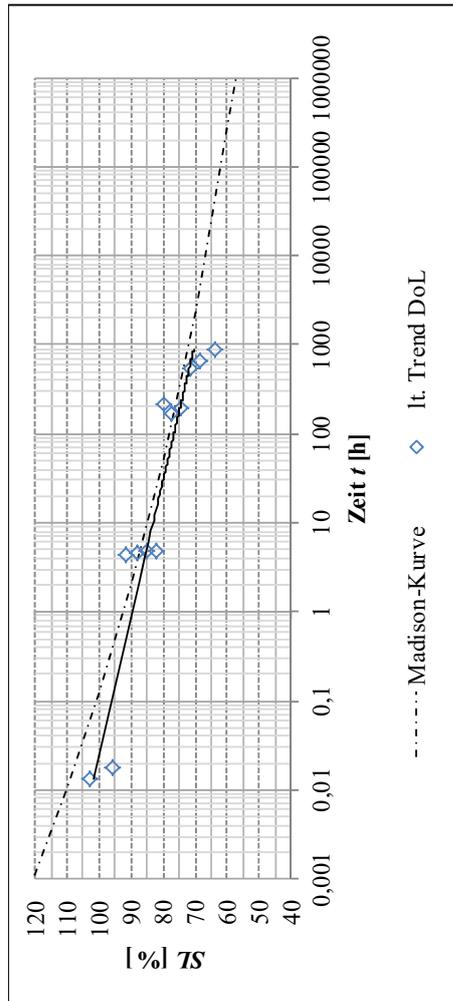


Prototyp1-60-00-070-Fichte-XYZ-ABC	
Holzart	FI Fichte
L1	70 %
Schraubentyp	P1 Prototyp1
Eindrehlänge	60 mm
Einbindelänge	00 mm
P-fostenbezeichnung	XYZ-ABC

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u		ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SL [%]	It. Versuchstagebuch				It. Madison		It. Trend DoL	
	[%]					t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]
K09-1-P1-60-00-070-FI-B05-104													
K09-2-P1-60-00-070-FI-B05-104													
K09-3-P1-60-00-070-FI-B06-104	16,2		472	462	74,5*	0,01	347,72	14,49	3250	384,51	16,02	414,47	17,27
K09-4-P1-60-00-070-FI-B06-104	16,5		439	429	73,35*	0,01	592,41	24,68	3250	731,36	30,47	834,98	34,79
K09-5-P1-60-00-070-FI-B07-104					71,45*	0,02	1.853,41	77,23	3250	2.819,92	117,50	3.617,75	150,74
K09-6-P1-60-00-070-FI-B07-104													
K09-3-P1-60-00-070-FI-B08-104	16,0		462	452	72,36*	0,01	486,21	20,26	3250	768,09	32,00	1.001,24	41,72
K09-4-P1-60-00-070-FI-B08-104	16,7		456	445	70,6*	0,02	2.657,23	110,72	3250	4.381,92	182,58	6.126,07	255,25
K09-3-P1-60-00-070-FI-B02-105	16,1		431	422	78,08*	0,00	1,54	0,06	3250	3,19	0,13	4,73	0,20
K09-4-P1-60-00-070-FI-B02-105	16,1		427	418	75,94*	0,01	1,57	0,07	3250	3,22	0,13	4,77	0,20
K09-3-P1-60-00-070-FI-B12-104													
K09-4-P1-60-00-070-FI-B12-104													
Median	16,2	448	437	437	73,35*	0,01	486,21	20,26	3250	731,36	30,47	834,98	34,79
Mittelwert	16,3	448	438	438	73,76*	0,01	848,58	35,36	3250	1298,89	54,12	1714,86	71,45
Standardabweichung	0,3	18	18	18	2,63*	0,01	1013,54	42,23	-	1664,14	69,34	2305,91	96,08
CV [%]	1,6	4,0	4,0	4,0	3,56*	63,97	119,44	119,44	-	128,12	128,12	134,47	134,47

Abb. Anhang B-13: FI-P1-00-070_K09



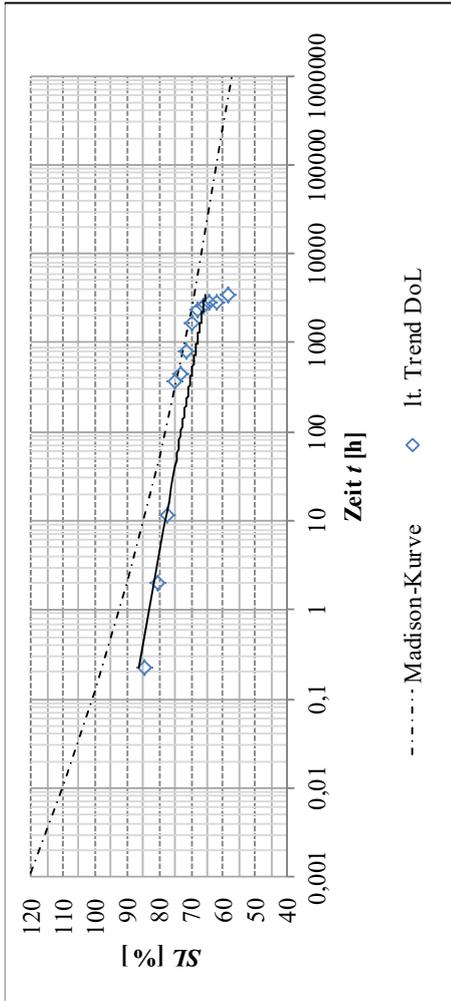
Referenzschraube-60-16-080-Fichte-XYZ-ABC

Holzart	FI	Fichte
LJ	80	%
Schraubentyp	RF	Referenzschraube
Eindrehlänge	60	mm
Einbindelänge	16	mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC	

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u [%]	ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstagebuch				It. Madison		It. Trend DoL	
					t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]
K10-1-RF-60-16-080-FI-B07-008	15,8	437	429	85,14	0,01	9,95	0,41	4820	6,03	0,25	4,90	0,20
K10-2-RF-60-16-080-FI-B07-008	15,9	437	428	68,50	0,12	2.017,91	84,08	4820	879,05	36,63	644,81	26,87
K10-3-RF-60-16-080-FI-B08-009	16,4	455	445	64,04	0,25	2.398,86	99,95	4820	1.138,17	47,42	872,78	36,37
K10-4-RF-60-16-080-FI-B08-009	16,2	459	449	74,63	0,08	1.015,68	42,32	4820	314,55	13,11	198,31	8,26
K10-5-RF-60-16-080-FI-B09-008	16,1	455	445	77,26	0,03	889,05	37,04	4820	265,12	11,05	164,29	6,85
K10-6-RF-60-16-080-FI-B09-008	16,1	461	451	82,41	0,02	9,96	0,41	4820	6,03	0,25	4,90	0,20
K10-5-RF-60-16-080-FI-B10-009	16,0	438	429	91,63	0,02	10,16	0,42	4820	5,55	0,23	4,40	0,18
K10-6-RF-60-16-080-FI-B10-009	16,1	439	431	88,14	0,04	10,31	0,43	4820	5,63	0,23	4,47	0,19
K10-5-RF-60-16-080-FI-B01-011	16,3	447	438	79,82	0,04	443,40	18,47	4820	264,20	11,01	215,89	9,00
K10-6-RF-60-16-080-FI-B01-011	16,2	483	473	71,79	0,07	1.308,64	54,53	4820	697,70	29,07	541,96	22,58
K10-1-RF-60-16-080-FI-B02-011	16,2	434	425	96,04	0,01	0,05	0,00	4771	0,02	0,00	0,02	0,00
K10-2-RF-60-16-080-FI-B02-011	16,1	449	440	102,72	0,01	0,03	0,00	4771	0,02	0,00	0,01	0,00
Median	16,1	448	439	81,12	0,03	226,85	9,45	4820	135,11	5,63	84,59	3,52
Mittelwert	16,1	449	440	81,84	0,06	676,17	28,17	4812	298,50	12,44	221,39	9,22
Standardabweichung	0,2	14	14	11,51	0,07	856,61	35,69	19	395,98	16,50	300,92	12,54
CV [%]	1,0	3,1	3,1	14,06	119,22	126,69	126,69	0	132,66	132,66	135,92	135,92

Abb. Anhang B-14: FI-RF-16-080_K10

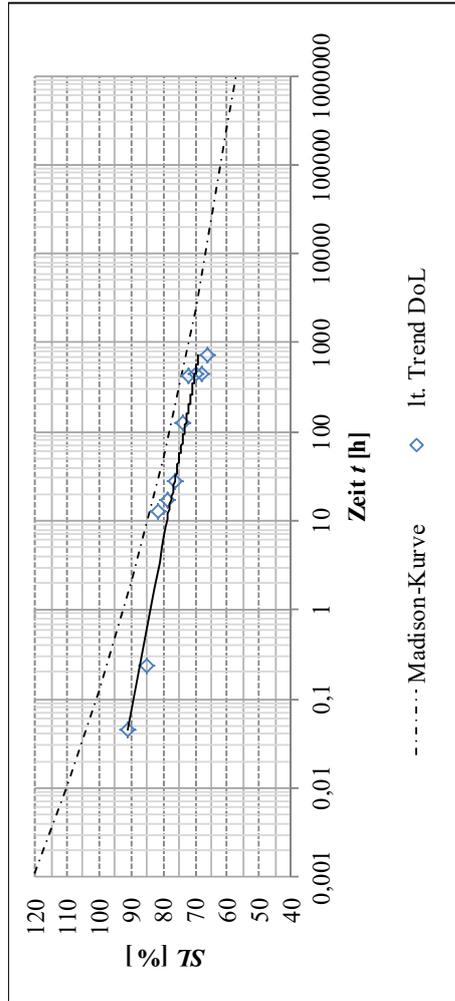


Referenzschraube-60-00-070-Fichte-XYZ-ABC	
Holzart	FI Fichte
LJ	70 %
Schraubentyp	RF Referenzschraube
Eindrehlänge	60 mm
Einbindelänge	00 mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u		ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstagebuch					It. Madison		It. Trend DoL	
	[%]					t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]	t [h]
K10-1-RF-60-00-070-FI-B11-103	16,1		455	445	75,31	0,01	344,34	14,35	4050	367,93	15,33	374,01	15,58	
K10-2-RF-60-00-070-FI-B11-103	16,0		468	459	71,47	0,04	648,28	27,01	4050	773,43	32,23	806,54	33,61	
K10-3-RF-60-00-070-FI-B01-104	16,3		448	438	67,96	0,04	1.971,14	82,13	4050	2.277,16	94,88	2.354,12	98,09	
K10-4-RF-60-00-070-FI-B01-104	16,0		460	451	58,73	40,63	2.936,93	122,37	4050	3.310,68	137,94	3.413,00	142,21	
K10-5-RF-60-00-070-FI-B02-104	16,2		460	450	77,61	0,01	10,27	0,43	4050	11,05	0,46	11,30	0,47	
K10-6-RF-60-00-070-FI-B02-104	16,0		475	466	73,30	0,02	392,70	16,36	4050	434,50	18,10	445,50	18,56	
K10-5-RF-60-00-070-FI-B03-104	16,2		458	448	64,19	40,58	2.441,35	101,72	4050	2.756,45	114,85	2.843,40	118,48	
K10-6-RF-60-00-070-FI-B03-104	16,6		459	449	61,89	40,58	2.471,59	102,98	4050	2.792,99	116,37	2.881,51	120,06	
K10-1-RF-60-00-070-FI-B04-104	16,3		456	446	69,71	40,55	1.445,61	60,23	4050	1.593,23	66,38	1.631,76	67,99	
K10-2-RF-60-00-070-FI-B04-104	16,3		456	447	66,16	40,60	2.288,65	95,36	4050	2.537,25	105,72	2.606,46	108,60	
K10-5-RF-60-00-070-FI-B10-104	16,7		472	461	80,50	0,02	1,13	0,05	4050	1,80	0,07	2,00	0,08	
K10-6-RF-60-00-070-FI-B10-104	18,1		438	424	84,83	0,01	0,11	0,00	4050	0,20	0,01	0,23	0,01	
Median	16,2		458	448	70,59	0,04	1046,94	43,62	4050	1183,33	49,31	1219,15	50,80	
Mittelwert	16,4		459	449	70,97	16,92	1246,01	51,92	4050	1404,72	58,53	1447,49	60,31	
Standardabweichung	0,6		10	11	7,77	20,89	1126,96	46,96	-	1270,81	52,95	1310,14	54,59	
CV [%]	3,4		2,2	2,4	10,94	123,43	90,45	90,45	-	90,47	90,47	90,51	90,51	

Abb. Anhang B-15: FI-RF-00-070_K10



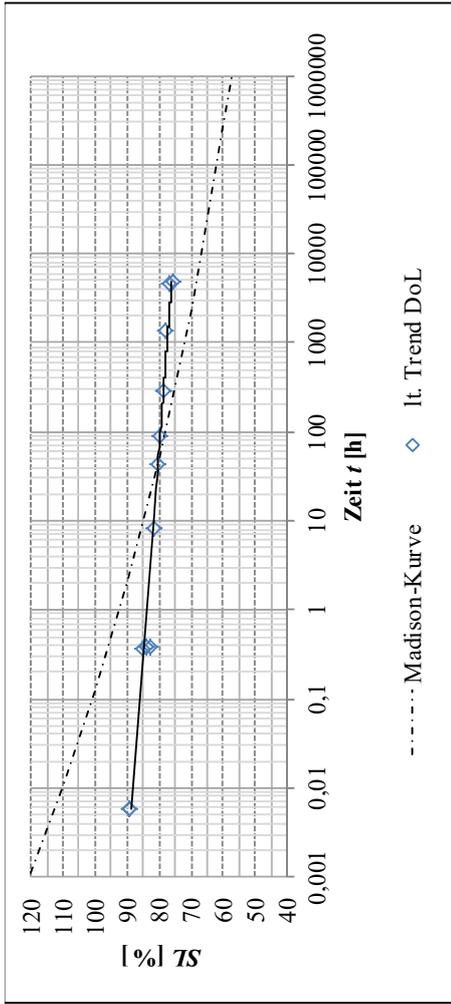
Referenzschraube-60-16-070-Fichte-XYZ-ABC

Holzart	FI	Fichte
LJ	70	%
Schraubentyp	RF	Referenzschraube
Eindrehlänge	60	mm
Einbindelänge	16	mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC	

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u [%]	ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstagebuch					It. Madison		It. Trend DoL		
					t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]		
K10-1-RF-60-16-070-FI-B02-103	16,1	445	436	91,00	0,01	0,04	0,00	4220	0,04	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00
K10-2-RF-60-16-070-FI-B02-103	17,3	470	458	85,30	0,01	0,17	0,01	4220	0,22	0,01	0,23	0,23	0,01	0,01
K10-3-RF-60-16-070-FI-B03-103														
K10-4-RF-60-16-070-FI-B03-103														
K10-5-RF-60-16-070-FI-B12-102	16,2	483	473	69,99	0,05	519,66	21,65	4220	448,67	18,69	437,51	18,23		
K10-6-RF-60-16-070-FI-B12-102	17,4	480	467	71,96	0,04	508,17	21,17	4220	436,27	18,18	424,89	17,70		
K10-1-RF-60-16-070-FI-B05-103	16,2	444	434	78,68	0,01	16,25	0,68	4220	16,82	0,70	17,06	0,71		
K10-2-RF-60-16-070-FI-B05-103	16,2	432	423	81,58	0,01	13,29	0,55	4220	12,75	0,53	12,68	0,53		
K10-1-RF-60-16-070-FI-B06-103	16,9	450	439	66,08	0,04	810,77	33,78	4220	736,88	30,70	725,29	30,22		
K10-2-RF-60-16-070-FI-B06-103	17,3	447	435	76,22	0,01	23,03	0,96	4220	26,88	1,12	27,82	1,16		
K10-5-RF-60-16-070-FI-B08-102														
K10-6-RF-60-16-070-FI-B08-102				68,05	0,03	491,96	20,50	4220	453,74	18,91	448,42	18,68		
K10-1-RF-60-16-070-FI-B09-103				74,01	0,01	170,88	7,12	4220	129,34	5,39	122,65	5,11		
K10-2-RF-60-16-070-FI-B09-103														
Median	16,6	448	437	75,11	0,01	96,95	4,04	4220	78,11	3,25	75,23	3,13		
Mittelwert	16,7	456	446	76,29	0,02	255,42	10,64	4220	226,16	9,42	221,66	9,24		
Standardabweichung	0,6	19	18	7,94	0,02	299,15	12,46	-	268,10	11,17	263,31	10,97		
CV [%]	3,4	4,1	4,1	10,41	79,94	117,12	117,12	-	118,55	118,55	118,79	118,79		

Abb. Anhang B-16: FI-RF-16-070_K10

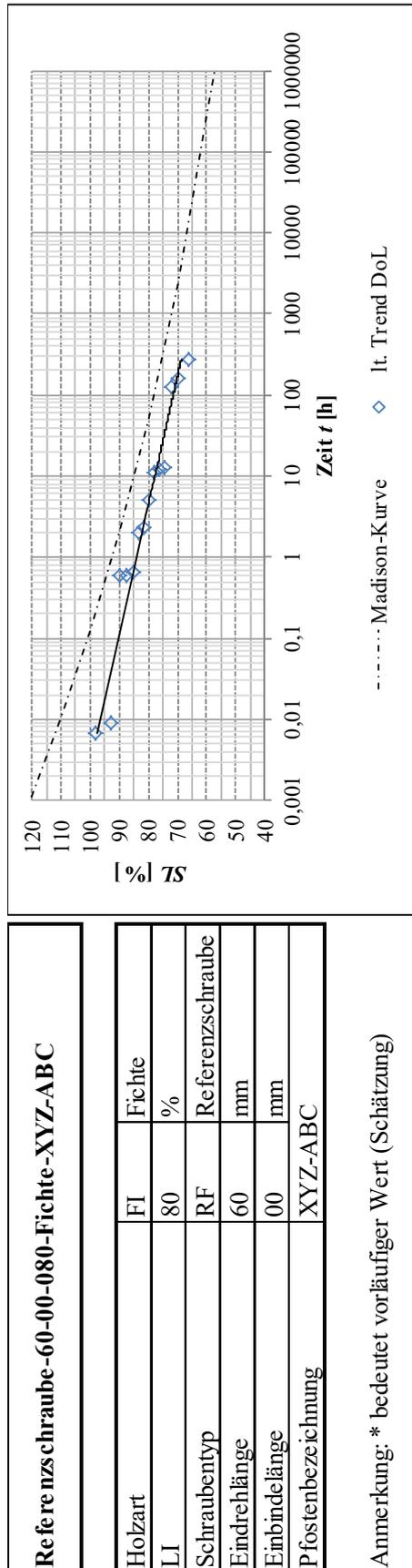


Prototyp1-60-00-080-Fichte-XYZ-ABC	
Holzart	FI Fichte
LJ	80 %
Schraubentyp	P1 Prototyp1
Eindrehlänge	60 mm
Einbindelänge	00 mm
P-fostenbezeichnung	XYZ-ABC

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

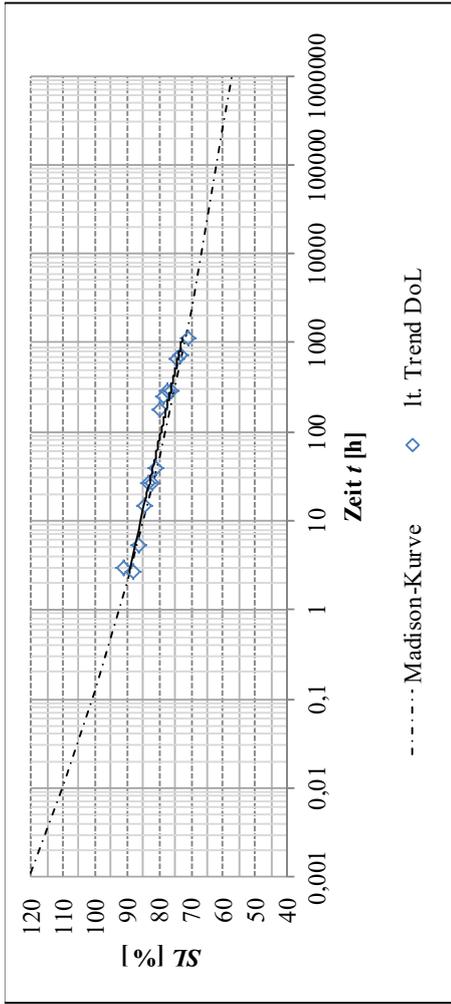
Bezeichnung Probekörper	u		ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstagebuch					It. Madison		It. Trend DoL			
	[%]					t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]	
K11-1-P1-60-00-080-FI-B05-009	16,5		434	425	89,23	0,01	0,02	0,00	3710	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
K11-2-P1-60-00-080-FI-B05-009	16,6		432	422	82,70	0,06	0,74	0,03	3710	0,03	0,37	0,02	0,38	0,02	0,38	0,02
K11-3-P1-60-00-080-FI-B04-009	16,3		470	460	85,15	0,03	0,67	0,03	3710	0,03	0,34	0,01	0,36	0,01	0,36	0,01
K11-4-P1-60-00-080-FI-B04-009	16,3		464	454	81,66	0,06	56,36	2,35	3710	0,06	16,90	0,70	8,07	0,34	8,07	0,34
K11-5-P1-60-00-080-FI-B06-009	16,6		451	440	89,23	0,01	0,02	0,00	3710	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
K11-6-P1-60-00-080-FI-B06-009	16,2		502	491	83,83	0,05	0,74	0,03	3710	0,05	0,37	0,02	0,38	0,02	0,38	0,02
K11-5-P1-60-00-080-FI-B01-010	16,4		451	441	75,55	0,12	5.374,59	223,94	3710	0,12	4.761,05	198,38	4.752,80	198,03	4.752,80	198,03
K11-6-P1-60-00-080-FI-B01-010	16,5		450	439	78,77	0,03	805,47	33,56	3710	0,03	398,69	16,61	288,35	12,01	288,35	12,01
K11-1-P1-60-00-080-FI-B08-010	15,7		423	415	76,73	0,09	5.100,40	212,52	3710	0,09	4.571,31	190,47	4.602,43	191,77	4.602,43	191,77
K11-2-P1-60-00-080-FI-B08-010	16,1		437	428	79,73	0,02	592,33	24,68	3710	0,02	195,48	8,14	89,60	3,73	89,60	3,73
K11-3-P1-60-00-080-FI-B10-010					74,11*											
K11-4-P1-60-00-080-FI-B10-010					72,09*											
K11-1-P1-60-00-080-FI-B09-104	16,0		454	445	77,78	0,03	1.560,73	65,03	3710	0,03	1.430,05	59,59	1.374,44	57,27	1.374,44	57,27
K11-2-P1-60-00-080-FI-B09-104	16,0		450	441	80,68	0,01	120,15	5,01	3710	0,01	64,83	2,70	42,03	1,75	42,03	1,75
Median	16,3		450	440	81,17	0,03	88,25	3,68	3710	0,03	40,86	1,70	25,05	1,04	25,05	1,04
Mittelwert	16,3		451	442	81,75	0,04	1134,35	47,26	3710	0,04	953,28	39,72	929,90	38,75	929,90	38,75
Standardabweichung	0,3		21	20	4,50	0,03	1975,13	82,30	-	0,03	1781,37	74,22	1793,34	74,72	1793,34	74,72
CV [%]	1,7		4,6	4,6	5,50	80,97	174,12	174,12	-	186,87	186,87	186,87	192,85	192,85	192,85	192,85

Abb. Anhang B-17: FI-P1-00-080_K11



Bezeichnung Probekörper	u [%]	ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	lt. Versuchstagebuch				lt. Madison		lt. Trend DoL	
					t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]
K12-1-RF-60-00-080-FI-B01-008	16,1	439	430	78,08	0,05	16,31	0,68	4630	12,57	0,52	11,25	0,47
K12-2-RF-60-00-080-FI-B01-008	16,2	434	425	83,35	0,04	2,59	0,11	4630	2,15	0,09	1,99	0,08
K12-3-RF-60-00-080-FI-B02-008	15,9	446	437	89,91	0,01	0,76	0,03	4630	0,64	0,03	0,60	0,02
K12-4-RF-60-00-080-FI-B02-008	15,8	463	454	87,41	0,03	0,76	0,03	4630	0,64	0,03	0,60	0,02
K12-5-RF-60-00-080-FI-B03-008	16,3	472	462	69,91	0,16	311,30	12,97	4630	191,60	7,98	156,63	6,53
K12-6-RF-60-00-080-FI-B03-008	16,2	471	461	66,48	0,17	480,90	20,04	4630	324,88	13,54	277,28	11,55
K12-3-RF-60-00-080-FI-B12-009	16,0	460	451	72,37	0,12	243,18	10,13	4630	151,61	6,32	124,50	5,19
K12-4-RF-60-00-080-FI-B12-009	16,1	458	449	76,31	0,03	18,62	0,78	4630	13,91	0,58	12,31	0,51
K12-1-RF-60-00-080-FI-B11-009	16,0	474	464	74,44	0,03	24,45	1,02	4630	15,46	0,64	12,76	0,53
K12-2-RF-60-00-080-FI-B11-009	16,1	466	457	81,54	0,01	4,36	0,18	4630	2,84	0,12	2,37	0,10
K12-1-RF-60-00-080-FI-B09-010	16,1	467	457	79,80	0,03	13,75	0,57	4630	6,75	0,28	5,05	0,21
K12-2-RF-60-00-080-FI-B09-010	16,2	461	452	85,27	0,03	1,01	0,04	4628	0,75	0,03	0,66	0,03
K12-1-RF-60-00-080-FI-B06-011	16,5	441	431	97,89	0,01	0,01	0,00	4630	0,01	0,00	0,01	0,00
K12-2-RF-60-00-080-FI-B06-011	16,6	435	424	93,08	0,02	0,02	0,00	4630	0,01	0,00	0,01	0,00
Median	16,1	461	451	80,67	0,03	9,06	0,38	4630	4,79	0,20	3,71	0,15
Mittelwert	16,2	456	447	81,13	0,05	79,86	3,33	4630	51,70	2,15	43,29	1,80
Standardabweichung	0,2	14	14	9,03	0,06	151,77	6,32	1	99,41	4,14	83,74	3,49
CV [%]	1,4	3,2	3,2	11,12	106,31	190,05	190,05	0	192,27	192,27	193,46	193,46

Abb. Anhang B-18: FI-RF-00-080_K12



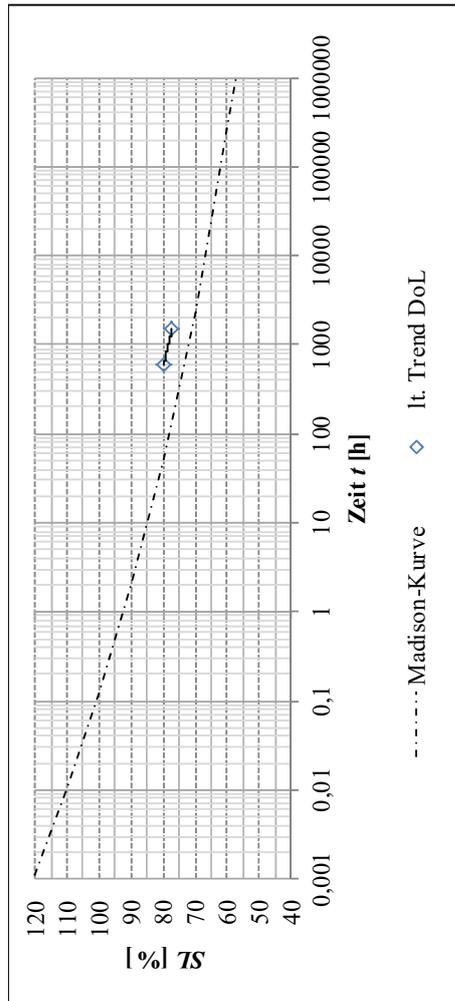
----- Madison-Kurve ♦ It. Trend DoL

Prototyp1-60-00-080-BauBuche-XYZ-ABC		
Holzart	BB	BauBuche
L1	80	%
Schraubentyp	P1	Prototyp1
Eindrehlänge	60	mm
Einbindelänge	00	mm
P-fostenbezeichnung	XYZ-ABC	

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u		ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstagebuch					It. Madison		It. Trend DoL	
	[%]					t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]	
K12-1-P1-60-00-080-BB-030-013	13,5		803	797	77,39	0,09	1.024,20	42,68	10640	10640	395,98	16,50	285,22	11,88
K12-2-P1-60-00-080-BB-030-013	13,7		797	791	79,72	0,05	545,84	22,74	10640	10640	239,06	9,96	177,61	7,40
K12-3-P1-60-00-080-BB-029-013	14,0		818	810	76,14	0,10	1.047,48	43,64	10640	10640	406,81	16,95	293,97	12,25
K12-4-P1-60-00-080-BB-029-013	14,1		820	811	70,64	0,18	2.035,27	84,80	10640	10640	1.277,04	53,21	1.127,14	46,96
K12-5-P1-60-00-080-BB-028-013	14,1		806	797	83,30	0,00	100,48	4,19	10640	10640	37,42	1,56	26,48	1,10
K12-6-P1-60-00-080-BB-028-013	14,2		794	785	82,05	0,01	100,67	4,19	10640	10640	37,52	1,56	26,57	1,11
K12-5-P1-60-00-080-BB-023-010	14,2		798	789	88,27	0,01	10,22	0,43	10640	10640	3,80	0,16	2,70	0,11
K12-6-P1-60-00-080-BB-023-010	14,2		800	791	86,27	0,02	16,32	0,68	10640	10640	7,17	0,30	5,42	0,23
K12-5-P1-60-00-080-BB-021-014	13,8		803	796	80,87	0,01	123,25	5,14	10640	10640	53,89	2,25	39,79	1,66
K12-6-P1-60-00-080-BB-021-014	13,9		816	808	78,57	0,05	897,66	37,40	10640	10640	346,97	14,46	249,71	10,40
K12-5-P1-60-00-080-BB-027-009	13,3		792	787	91,26	0,00	5,50	0,23	10640	10640	3,44	0,14	2,95	0,12
K12-6-P1-60-00-080-BB-027-009	14,2		800	791	84,68	0,03	36,17	1,51	10640	10640	17,78	0,74	14,95	0,62
K12-1-P1-60-00-080-BB-026-008	13,9		800	792	73,03	0,07	846,66	35,28	10640	10640	758,03	31,58	729,85	30,41
K12-2-P1-60-00-080-BB-026-008	14,6		803	793	74,73	0,04	757,82	31,58	10640	10640	682,83	28,45	659,29	27,47
Median	14,0		802	793	80,29	0,04	334,55	13,94	10640	10640	146,48	6,10	108,70	4,53
Mittelwert	14,0		804	796	80,49	0,05	539,11	22,46	10640	10640	304,84	12,70	260,12	10,84
Standardabweichung	0,3		9	8	5,93	0,05	598,17	24,92	-	-	379,95	15,83	345,91	14,41
CV [%]	2,3		1,1	1,1	7,36	102,29	110,96	110,96	-	-	124,64	124,64	132,98	132,98

Abb. Anhang B-19: BB-P1-00-080_K12



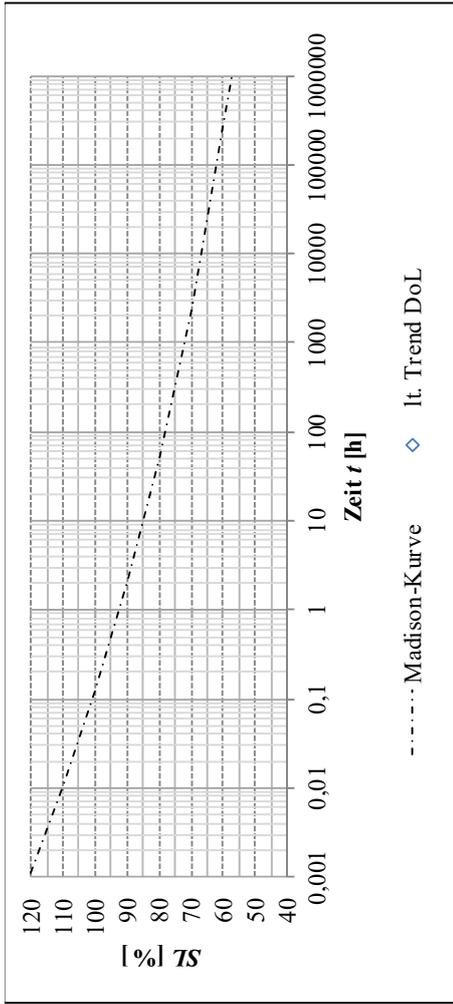
Prototyp1-60-00-070-BauBuche-XYZ-ABC

Holzart	BB	BauBuche
LJ	70	%
Schraubentyp	P1	Prototyp1
Eindrehlänge	60	mm
Einbindelänge	00	mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC	

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u	ρ_u	ρ_{12}	SL	lt. Versuchstagebuch			lt. Madison		lt. Trend DoL		
	[%]	[kg/m ³]	[kg/m ³]		t_{ramp} [h]	t_{const} [h]	t_{const} [d]	$F_{ax,0}$ [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]
K12-1-P1-60-00-070-BB-022-007												
K12-2-P1-60-00-070-BB-022-007												
K12-3-P1-60-00-070-BB-025-009												
K12-4-P1-60-00-070-BB-025-009												
K12-5-P1-60-00-070-BB-028-008	14,2	805	796	79,86*	0,01	671,08	27,96	9310	604,52	25,19	594,27	24,76
K12-6-P1-60-00-070-BB-028-008	14,8	803	791	77,24*	0,01	1.570,84	65,45	9310	1.484,52	61,85	1.471,83	61,33
K12-5-P1-60-00-070-BB-029-009												
K12-6-P1-60-00-070-BB-029-009												
Median	14,5	804	794	78,55*	0,01	1120,96	46,71	9310	1044,52	43,52	1033,05	43,04
Mittelwert	14,5	804	794	78,55*	0,01	1120,96	46,71	9310	1044,52	43,52	1033,05	43,04
Standardabweichung	0,4	2	3	1,85*	0,00	636,22	26,51	-	622,25	25,93	620,52	25,86
CV [%]	3,0	0,2	0,4	2,35*	33,28	56,76	56,76	-	59,57	59,57	60,07	60,07

Abb. Anhang B-20: BB-P1-00-070_K12



--- Madison-Kurve ♦ It. Trend DoL

Prototyp1-60-16-060-Buche-XYZ-ABC	
Holzart	BU Buche
L1	60 %
Schraubentyp	P1 Prototyp1
Eindrehlänge	60 mm
Einbindelänge	16 mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u		ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstagebuch				It. Madison		It. Trend DoL	
	t _{ramp} [h]	t _{const} [h]				t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]		
K13-1-P1-60-16-060-BU-013-007	noch kein Versagen eingetreten												
K13-2-P1-60-16-060-BU-013-007	noch kein Versagen eingetreten												
K13-3-P1-60-16-060-BU-014-007	noch kein Versagen eingetreten												
K13-4-P1-60-16-060-BU-014-007	noch kein Versagen eingetreten												
K13-5-P1-60-16-060-BU-017-007	noch kein Versagen eingetreten												
K13-6-P1-60-16-060-BU-017-007	noch kein Versagen eingetreten												
Median													
Mittelwert													
Standardabweichung													
CV [%]													

Abb. Anhang B-21: BU-P1-16-060_K13

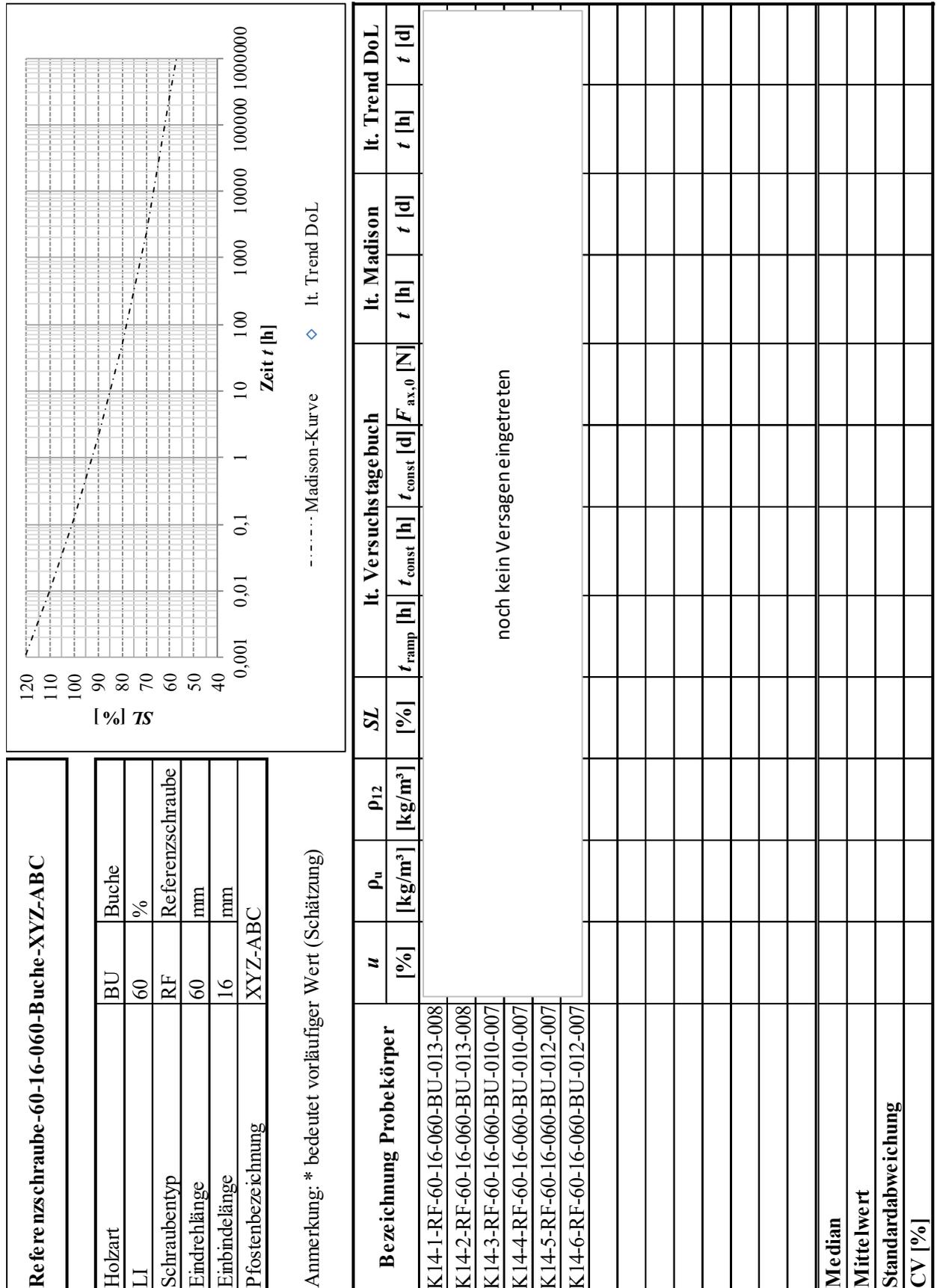
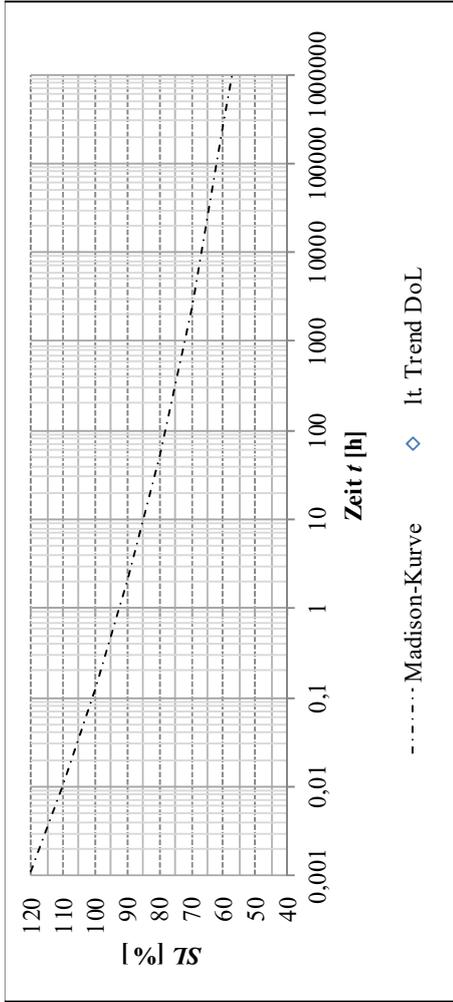


Abb. Anhang B-22: BU-RF-16-060_K14



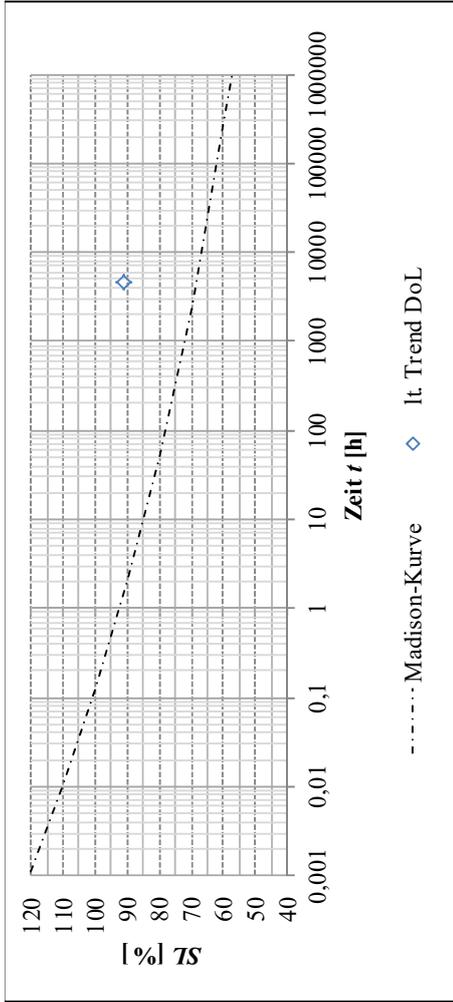
Prototyp1-60-00-060-Buche-XYZ-ABC	
Holzart	BU Buche
LJ	60 %
Schraubentyp	P1 Prototyp1
Eindrehlänge	60 mm
Einbindelänge	00 mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u		ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstage buch			It. Madison		It. Trend DoL		
	t _{ramp} [h]	t _{const} [h]				t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]		
K15-1-P1-60-00-060-BU-005-006													
K15-2-P1-60-00-060-BU-005-006													
K15-3-P1-60-00-060-BU-007-006													
K15-4-P1-60-00-060-BU-007-006													
K15-5-P1-60-00-060-BU-009-006													
K15-6-P1-60-00-060-BU-009-006													
Median													
Mittelwert													
Standardabweichung													
CV [%]													

noch kein Versagen eingetreten

Abb. Anhang B-23: BU-P1-00-060_K15



Prototyp1-60-16-070-Buche-XYZ-ABC		
Holzart	BU	Buche
LJ	70	%
Schraubentyp	P1	Prototyp1
Eindrehlänge	60	mm
Einbindelänge	16	mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC	

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u		ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstage buch				It. Madison		It. Trend DoL	
	t _{ramp} [h]	t _{const} [h]				t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]		
K17-1-P1-60-16-070-BU-019-007													
K17-2-P1-60-16-070-BU-019-007					90,8*	0,08	2.799,66	116,65	7510	3.581,83	149,24	4.535,93	189,00
K17-3-P1-60-16-070-BU-022-007													
K17-4-P1-60-16-070-BU-022-007													
K17-5-P1-60-16-070-BU-025-007													
K17-6-P1-60-16-070-BU-025-007													
Median					90,8*	0,08	2799,66	116,65	7510	3581,83	149,24	4535,93	189,00
Mittelwert					90,8*	0,08	2799,66	116,65	7510	3581,83	149,24	4535,93	189,00
Standardabweichung													
CV [%]													

Abb. Anhang B-25: BU-P1-16-070_K17

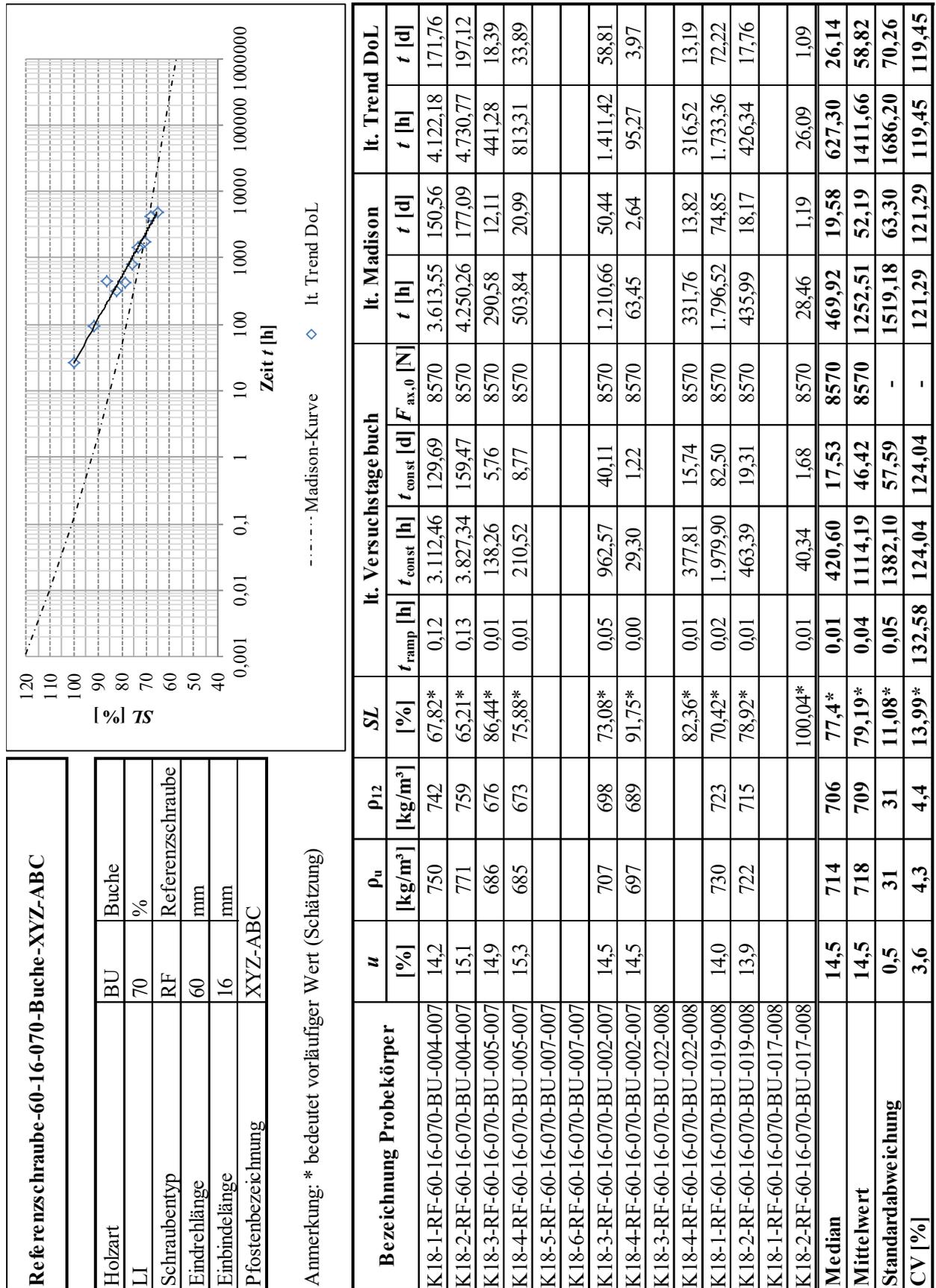
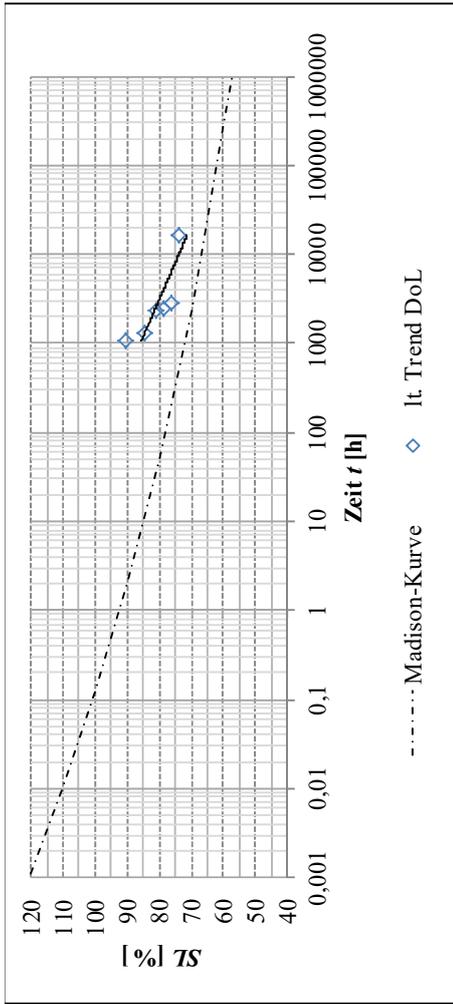


Abb. Anhang B-26: BU-RF-16-070_K18



Prototyp1-60-00-070-Buche-XYZ-ABC		
Holzart	BU	Buche
LJ	70	%
Schraubentyp	P1	Prototyp1
Eindrehlänge	60	mm
Einbindelänge	00	mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC	

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u		p _u [kg/m ³]	p ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstage buch					It. Madison		It. Trend DoL	
	[%]					t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]	t [h]
K19-1-P1-60-00-070-BU-002-006	14,2		706	698	81,19*	0,07	2.182,30	90,93	6800	2.124,82	88,53	2.275,29	94,80	
K19-2-P1-60-00-070-BU-002-006	14,6		709	699	90,27*	0,02	808,88	33,70	6800	892,16	37,17	1.079,42	44,98	
K19-3-P1-60-00-070-BU-003-006														
K19-4-P1-60-00-070-BU-003-006					78,38*	0,08	2.442,31	101,76	6800	2.318,41	96,60	2.452,77	102,20	
K19-5-P1-60-00-070-BU-004-006														
K19-6-P1-60-00-070-BU-004-006					84,78*	0,03	1.031,93	43,00	6800	1.118,81	46,62	1.313,79	54,74	
K19-1-P1-60-00-070-BU-025-006	14,6		683	674	76*	0,02	2.999,65	124,99	6800	2.879,98	120,00	2.874,12	119,75	
K19-2-P1-60-00-070-BU-025-006	14,2		683	676	73,86*	0,03	4.166,21	173,59	6800	3.723,48	155,15	16.301,97	679,25	
K19-1-P1-60-00-070-BU-019-005														
K19-2-P1-60-00-070-BU-019-005														
Median	14,4		694	687	79,78*	0,03	2312,31	96,35	6800	2221,61	92,57	2364,03	98,50	
Mittelwert	14,4		695	687	80,75*	0,04	2271,88	94,66	6800	2176,28	90,68	4382,89	182,62	
Standardabweichung	0,2		14	14	6,05*	0,03	1251,64	52,15	-	1065,75	44,41	5879,46	244,98	
CV [%]	1,6		2,0	2,0	7,49*	71,13	55,09	55,09	-	48,97	48,97	134,15	134,15	

Abb. Anhang B-27: BU-P1-00-070_K19

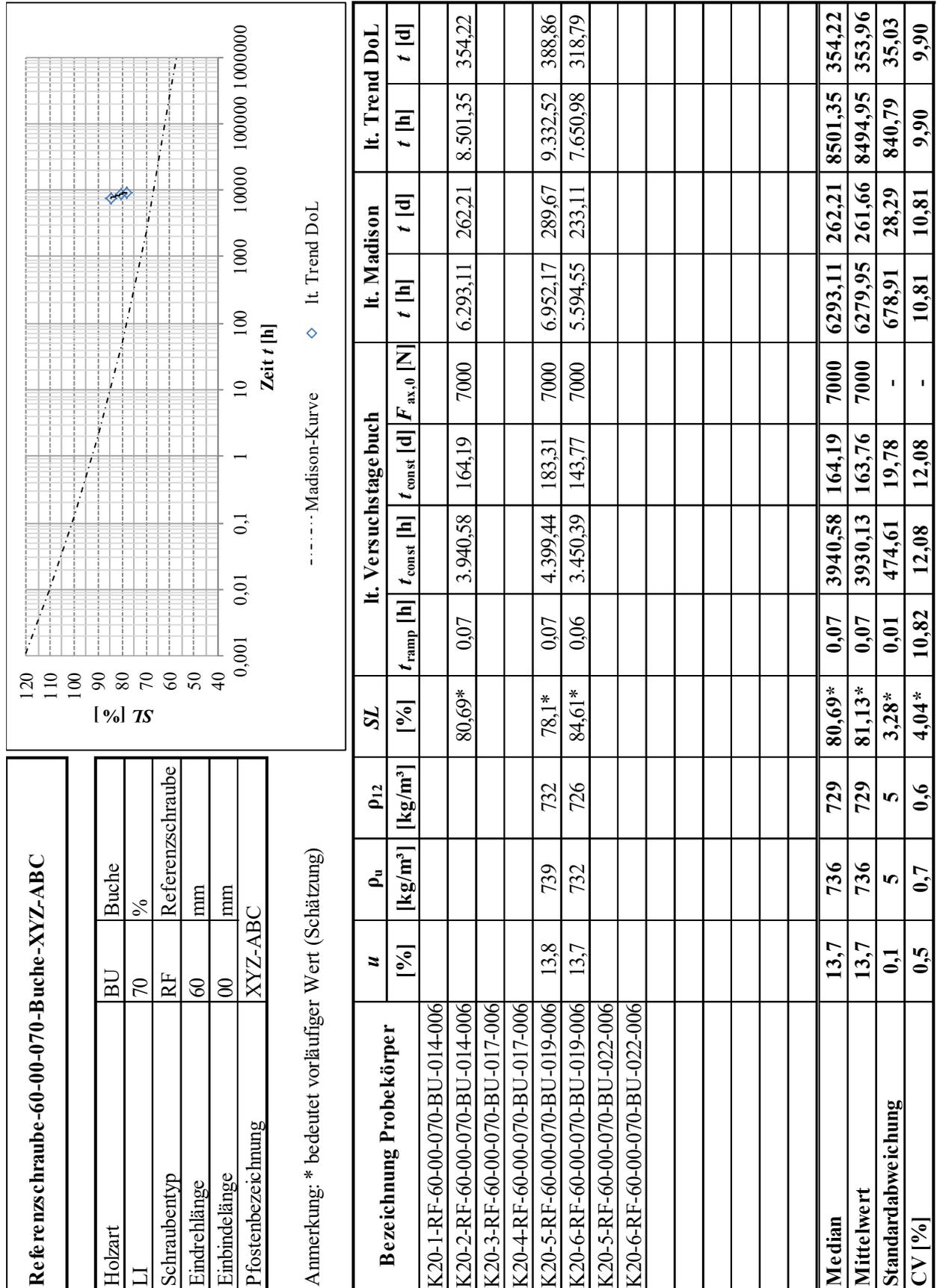
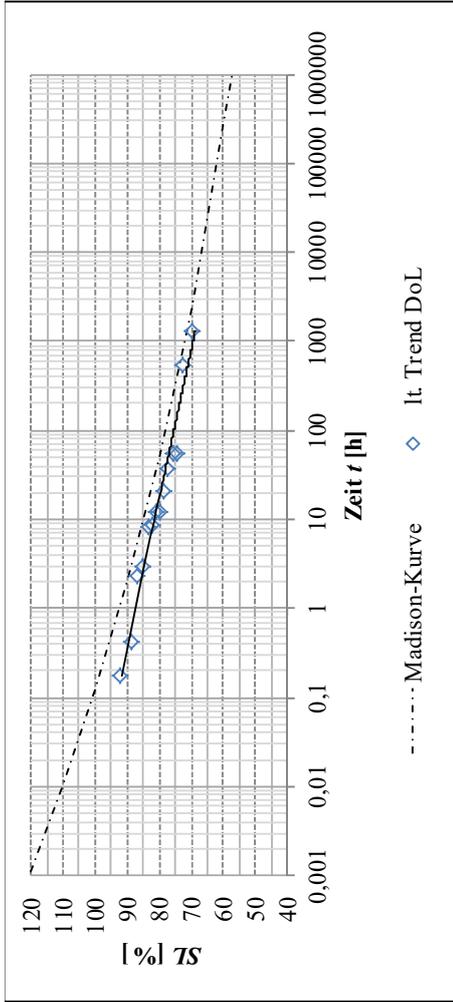


Abb. Anhang B-28: BU-RF-00-070_K20

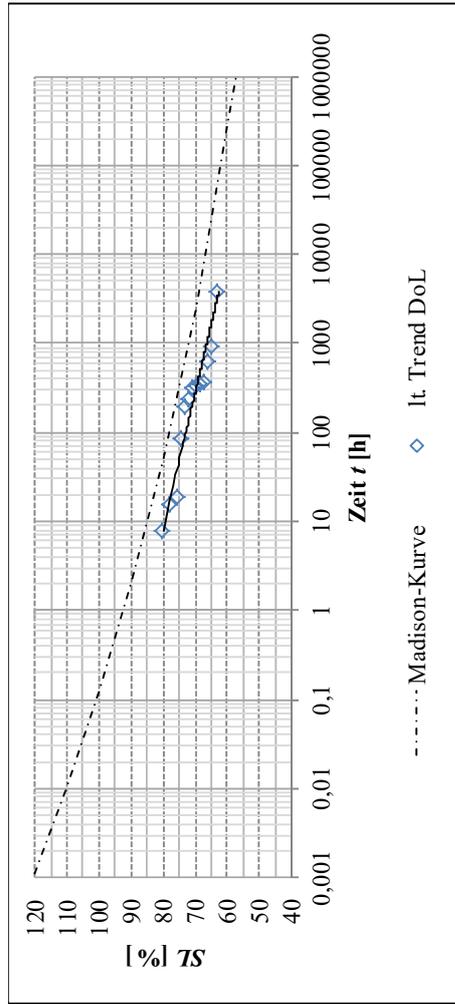


Prototyp1-60-16-080-BauBuche-XYZ-ABC		
Holzart	BB	BauBuche
LJ	80	%
Schraubentyp	P1	Prototyp1
Eindrehlänge	60	mm
Einbindelänge	16	mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC	

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	μ		ρ_u [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstage buch					It. Madison		It. Trend DoL	
	[%]					t_{ramp} [h]	t_{const} [h]	t_{const} [d]	$F_{ax,0}$ [N]	τ [h]	τ [d]	τ [h]	τ [d]	
K21-1-P1-60-16-080-BB-028-012	13,9		797	790	78,49	0,04	29,46	1,23	12940	12940	19,31	0,80	20,76	0,86
K21-2-P1-60-16-080-BB-028-012	14,8		796	785	79,72	0,03	27,00	1,13	12940	12940	13,53	0,56	11,89	0,50
K21-3-P1-60-16-080-BB-029-012	13,8		823	815	69,99	0,24	1.401,88	58,41	12940	12940	1.306,18	54,42	1.320,26	55,01
K21-4-P1-60-16-080-BB-029-012	14,5		824	814	72,54	0,20	455,67	18,99	12940	12940	489,90	20,41	532,84	22,20
K21-5-P1-60-16-080-BB-030-012	13,5		807	801	80,96	0,01	26,98	1,12	12940	12940	13,50	0,56	11,87	0,49
K21-6-P1-60-16-080-BB-030-012	14,3		809	799	77,22	0,13	38,45	1,60	12940	12940	31,86	1,33	37,41	1,56
K21-1-P1-60-16-080-BB-027-011	14,2		796	788	88,97	0,03	0,09	0,00	12940	12940	0,25	0,01	0,42	0,02
K21-2-P1-60-16-080-BB-027-011	15,0		795	783	92,22	0,01	0,04	0,00	12940	12940	0,11	0,00	0,18	0,01
K21-1-P1-60-16-080-BB-026-011	14,0		798	791	82,23	0,02	5,20	0,22	12940	12940	7,03	0,29	8,68	0,36
K21-2-P1-60-16-080-BB-026-011	14,7		805	794	83,58	0,02	5,13	0,21	12940	12940	6,79	0,28	8,25	0,34
K21-1-P1-60-16-080-BB-024-012	14,3		789	780	86,80	0,01	0,56	0,02	12940	12940	1,42	0,06	2,29	0,10
K21-2-P1-60-16-080-BB-024-012	14,9		790	779	85,07	0,03	0,76	0,03	12940	12940	1,79	0,07	2,94	0,12
K21-1-P1-60-16-080-BB-021-012	14,6		816	805	75,87	0,05	18,20	0,76	12940	12940	37,08	1,55	53,63	2,23
K21-2-P1-60-16-080-BB-021-012	13,9		816	808	74,36	0,08	18,63	0,78	12940	12940	37,77	1,57	54,60	2,27
Median	14,3		802	792	80,34	0,03	18,41	0,77	12940	12940	13,52	0,56	11,88	0,49
Mittelwert	14,3		804	795	80,57	0,06	144,86	6,04	12940	12940	140,47	5,85	147,57	6,15
Standardabweichung	0,4		12	12	6,39	0,07	380,65	15,86	-	-	358,90	14,95	364,82	15,20
CV [%]	3,1		1,4	1,5	7,93	113,85	262,77	262,77	-	-	255,51	255,51	247,22	247,22

Abb. Anhang B-29: BB-P1-16-080_K21

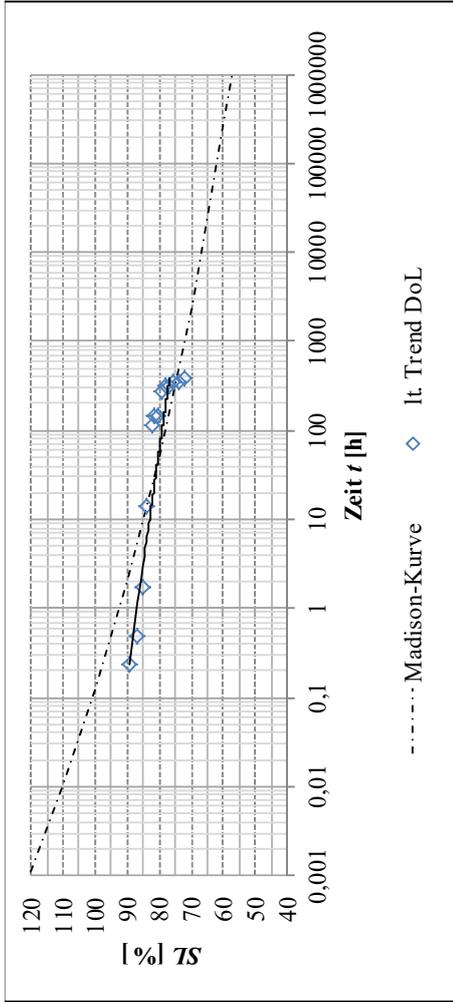


Prototyp1-60-16-070-BauBuche-XYZ-ABC	
Holzart	BB BauBuche
LJ	70 %
Schraubentyp	P1 Prototyp1
Eindrehlänge	60 mm
Einbindelänge	16 mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung	Probekörper	u [%]	ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstagebuch				It. Madison		It. Trend DoL	
						t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]
K21-1-P1-60-16-070-BB-029-007		14,3	810	801	70,84	0,04	518,17	21,59	11330	334,55	13,94	317,47	13,23
K21-2-P1-60-16-070-BB-029-007		13,8	798	791	73,13	0,03	311,76	12,99	11330	205,84	8,58	194,78	8,12
K21-3-P1-60-16-070-BB-027-014		14,3	799	790	80,69	0,01	13,85	0,58	11330	8,50	0,35	7,97	0,33
K21-4-P1-60-16-070-BB-027-014		13,8	804	797	75,95	0,02	28,43	1,18	11330	19,49	0,81	18,53	0,77
K21-5-P1-60-16-070-BB-030-008		14,7	809	799	69,76	0,05	541,15	22,55	11330	346,34	14,43	328,44	13,69
K21-6-P1-60-16-070-BB-030-008		14,2	809	800	67,57	0,07	598,05	24,92	11330	392,84	16,37	374,38	15,60
K21-3-P1-60-16-070-BB-028-011		14,9	809	797	68,68	0,04	563,58	23,48	11330	372,04	15,50	354,77	14,78
K21-4-P1-60-16-070-BB-028-011		14,3	816	806	71,95	0,02	366,55	15,27	11330	251,63	10,48	239,71	9,99
K21-1-P1-60-16-070-BB-026-007		14,2	821	812	65,06	0,06	999,17	41,63	11330	915,40	38,14	919,63	38,32
K21-2-P1-60-16-070-BB-026-007		13,9	816	808	66,39	0,05	640,30	26,68	11330	611,31	25,47	614,22	25,59
K21-3-P1-60-16-070-BB-024-104					63,48	0,06	3.133,19	130,55	11330	3.571,90	148,83	3.716,13	154,84
K21-4-P1-60-16-070-BB-024-104					61,24								
K21-5-P1-60-16-070-BB-023-104		14,4	788	779	77,85	0,01	21,42	0,89	11330	16,21	0,68	15,59	0,65
K21-6-P1-60-16-070-BB-023-104		14,0	794	787	74,44	0,01	103,04	4,29	11330	86,03	3,58	84,20	3,51
Median		14,2	809	798	70,30	0,04	518,17	21,59	11330	334,55	13,94	317,47	13,23
Mittelwert		14,2	806	797	70,50	0,04	602,98	25,12	11330	548,62	22,86	552,76	23,03
Standardabweichung		0,3	10	9	5,59	0,02	815,42	33,98	-	944,09	39,34	984,82	41,03
CV [%]		2,3	1,2	1,2	7,93	60,18	135,23	135,23	-	172,08	172,08	178,17	178,17

Abb. Anhang B-30: BB-P1-16-070_K21

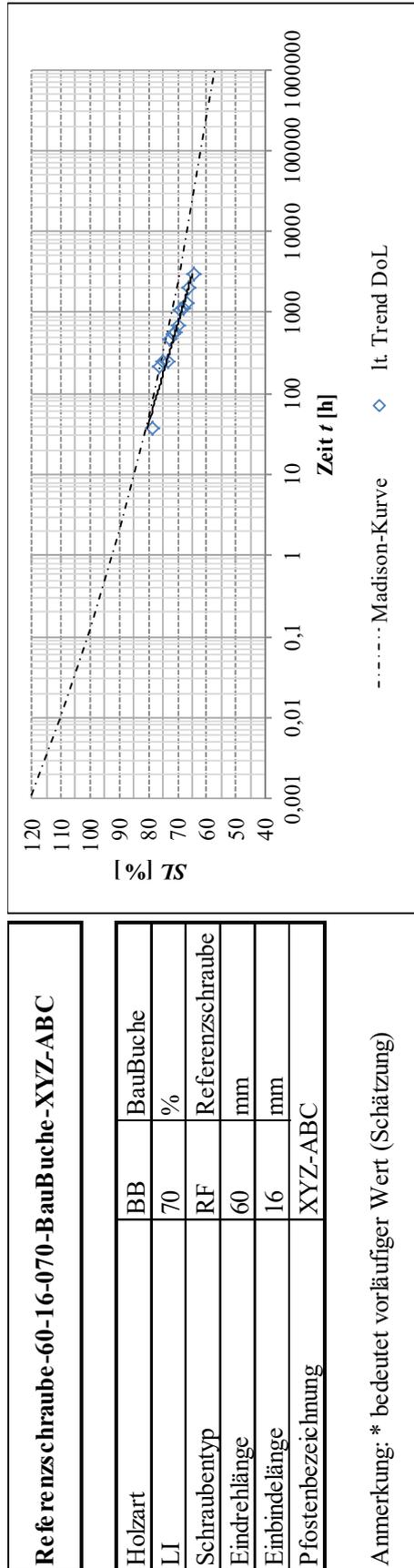


Referenzschraube-60-16-080-BauBuche-XYZ-ABC		
Holzart	BB	BauBuche
LJ	80	%
Schraubentyp	RF	Referenzschraube
Eindrehlänge	60	mm
Einbindelänge	16	mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC	

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

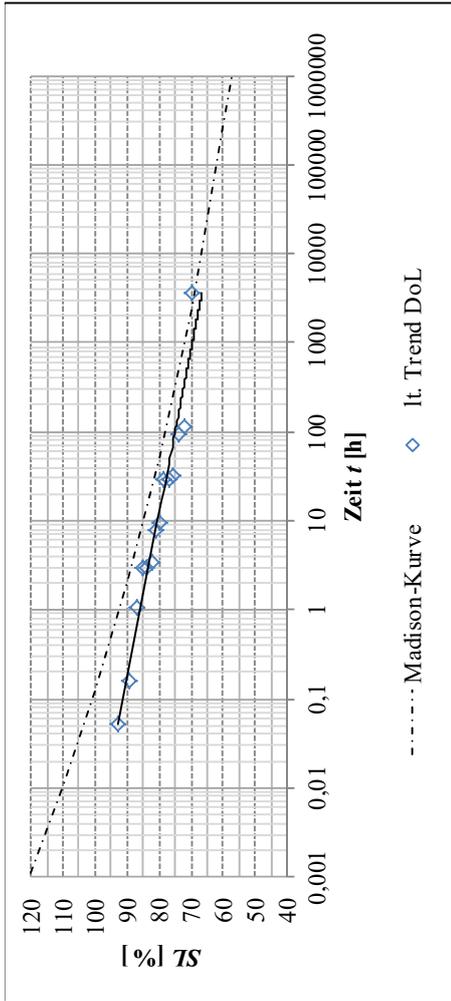
Bezeichnung Probekörper	μ		ρ_u [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstagebuch				It. Madison		It. Trend DoL	
	[%]					t_{ramp} [h]	t_{const} [h]	t_{const} [d]	$F_{ax,0}$ [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]
K22-1-RF-60-16-080-BB-021-013	13,4		822	816	74,04	0,17	217,42	9,06	12570	288,31	12,01	347,95	14,50
K22-2-RF-60-16-080-BB-021-013	13,5		827	821	75,59	0,15	210,47	8,77	12570	283,00	11,79	343,05	14,29
K22-3-RF-60-16-080-BB-024-014	14,6		795	785									
K22-4-RF-60-16-080-BB-024-014	14,7		789	778	83,71	0,01	18,81	0,78	12570	14,64	0,61	14,22	0,59
K22-5-RF-60-16-080-BB-025-012	14,5		805	795	79,15	0,08	123,74	5,16	12570	208,60	8,69	269,61	11,23
K22-6-RF-60-16-080-BB-025-012	15,0		811	799	78,05	0,09	166,49	6,94	12570	248,86	10,37	310,46	12,94
K22-3-RF-60-16-080-BB-023-012	14,4		787	777	85,15	0,03	0,31	0,01	12570	1,03	0,04	1,75	0,07
K22-4-RF-60-16-080-BB-023-012	15,1		800	787	86,93	0,02	0,09	0,00	12570	0,30	0,01	0,49	0,02
K22-3-RF-60-16-080-BB-022-012	13,9		813	805	76,88	0,07	174,17	7,26	12570	253,72	10,57	313,71	13,07
K22-4-RF-60-16-080-BB-022-012	14,5		811	801	82,47	0,01	43,69	1,82	12570	83,51	3,48	111,86	4,66
K22-5-RF-60-16-080-BB-030-011	14,3		814	805	71,86	0,12	529,66	22,07	12570	413,44	17,23	384,70	16,03
K22-6-RF-60-16-080-BB-030-011	13,7		815	808	89,57	0,01	0,02	0,00	12570	0,10	0,00	0,23	0,01
K22-4-RF-60-16-080-BB-029-011	13,5		820	814	81,32	0,06	206,50	8,60	12570	155,75	6,49	142,69	5,95
K22-3-RF-60-16-080-BB-029-011	14,2		824	815	80,23	0,08	210,87	8,79	12570	156,91	6,54	143,58	5,98
Median	14,3		812	803	80,23	0,07	166,49	6,94	12570	156,91	6,54	143,58	5,98
Mittelwert	14,2		809	800	80,38	0,07	146,33	6,10	12570	162,16	6,76	183,41	7,64
Standardabweichung	0,6		13	14	5,18	0,05	146,20	6,09	-	134,83	5,62	150,18	6,26
CV [%]	3,9		1,6	1,8	6,44	78,71	99,92	99,92	-	83,14	83,14	81,88	81,88

Abb. Anhang B-31: BB-RF-16-080_K22



Bezeichnung	Probekörper	u	ρ _u	ρ ₁₂	SZ	It. Versuchstagebuch					It. Madison		It. Trend DoL	
						t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]	
K22-1	RF-60-16-070-BB-030-014	14,4	804	794	66,99	0,05	1.511,84	62,99	11000	1.300,60	54,19	1.285,07	53,54	
K22-2	RF-60-16-070-BB-030-014	14,0	805	797	68,87	0,05	1.253,48	52,23	11000	1.061,89	44,25	1.048,56	43,69	
K22-3	RF-60-16-070-BB-029-014				64,57	0,10	3.466,74	144,45	11000	3.030,11	126,25	2.994,97	124,79	
K22-4	RF-60-16-070-BB-029-014				62,71									
K22-5	RF-60-16-070-BB-028-014	14,3	803	794	70,64	0,03	631,27	26,30	11000	582,03	24,25	578,97	24,12	
K22-6	RF-60-16-070-BB-028-014	13,9	803	796	71,55	0,02	584,69	24,36	11000	551,66	22,99	549,85	22,91	
K22-5	RF-60-16-070-BB-027-103	13,8	809	802	74,78	0,00	333,35	13,89	11000	253,50	10,56	245,67	10,24	
K22-6	RF-60-16-070-BB-027-103	13,3	810	804	73,56	0,01	336,72	14,03	11000	255,33	10,64	247,39	10,31	
K22-5	RF-60-16-070-BB-025-103	14,2	829	820	72,51	0,02	568,49	23,69	11000	473,48	19,73	468,39	19,52	
K22-6	RF-60-16-070-BB-025-103	13,8	835	828	67,96	0,03	1.401,60	58,40	11000	1.158,84	48,28	1.140,76	47,53	
K22-1	RF-60-16-070-BB-022-104	14,0	809	802	65,89	0,07	2.350,76	97,95	11000	2.049,49	85,40	2.021,73	84,24	
K22-2	RF-60-16-070-BB-022-104	13,7	805	798	76,31	0,01	251,46	10,48	11000	217,02	9,04	214,42	8,93	
K22-5	RF-60-16-070-BB-024-007	14,9	797	786	78,59	0,01	44,31	1,85	11000	38,18	1,59	37,48	1,56	
K22-6	RF-60-16-070-BB-024-007	14,5	780	770	69,76	0,01	739,59	30,82	11000	691,12	28,80	686,11	28,59	
Median		14,0	805	798	70,20	0,02	631,27	26,30	11000	582,03	24,25	578,97	24,12	
Mittelwert		14,1	808	799	70,34	0,03	1036,48	43,19	11000	897,17	37,38	886,11	36,92	
Standardabweichung		0,4	14	15	4,56	0,03	970,40	40,43	-	846,71	35,28	836,60	34,86	
CV [%]		2,9	1,7	1,8	6,49	85,84	93,62	93,62	-	94,38	94,38	94,41	94,41	

Abb. Anhang B-32: BB-RF-16-070_K22

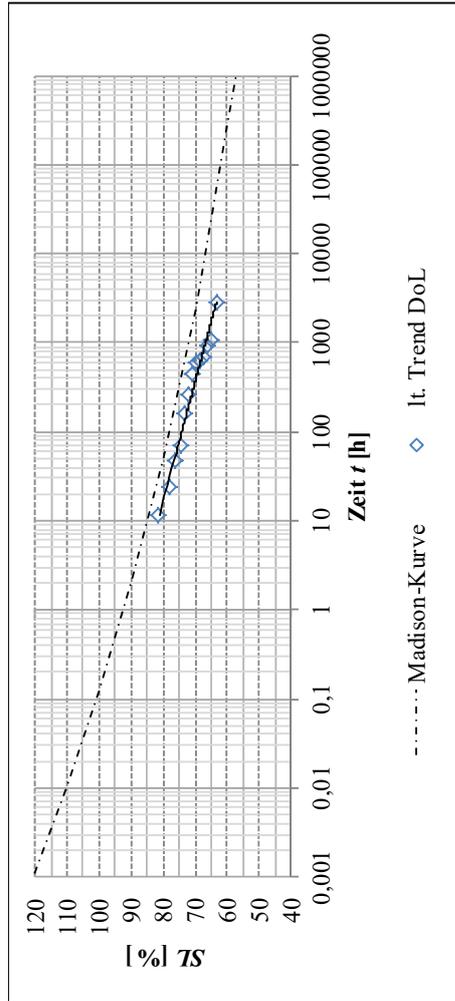


Referenzschraube-60-00-080-BauBuche-XYZ-ABC		
Holzart	BB	BauBuche
L1	80	%
Schraubentyp	RF	Referenzschraube
Eindrehlänge	60	mm
Einbindelänge	00	mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC	

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u		ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstagebuch					It. Madison		It. Trend DoL		
	[%]					t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]
K24-1-RF-60-00-080-BB-021-010	13,3		817	811	79,73	0,08	2,53	0,11	11660	0,27	0,27	6,41	0,27	9,67	0,40
K24-2-RF-60-00-080-BB-021-010	14,5		822	811	82,37	0,03	0,93	0,04	11660	2,27	0,09	2,27	0,09	3,40	0,14
K24-3-RF-60-00-080-BB-022-010	13,3		805	799	74,09	0,13	45,21	1,88	11660	73,11	3,05	73,11	3,05	94,09	3,92
K24-4-RF-60-00-080-BB-022-010	14,5		807	797	72,19	0,14	49,23	2,05	11660	84,59	3,52	84,59	3,52	112,08	4,67
K24-5-RF-60-00-080-BB-027-010	13,8		801	794	92,93	0,02	0,02	0,00	11660	0,03	0,00	0,03	0,00	0,05	0,00
K24-6-RF-60-00-080-BB-027-010	15,2		798	785	87,19	0,02	0,21	0,01	11660	0,64	0,03	0,64	0,03	1,04	0,04
K24-5-RF-60-00-080-BB-023-010	13,9		802	794	85,36	0,03	0,81	0,03	11660	1,95	0,08	1,95	0,08	2,93	0,12
K24-6-RF-60-00-080-BB-023-010	15,2		797	785	83,79	0,04	0,81	0,03	11660	1,95	0,08	1,95	0,08	2,93	0,12
K24-5-RF-60-00-080-BB-024-010	14,4		791	782	89,48	0,01	0,03	0,00	11660	0,10	0,00	0,10	0,00	0,16	0,01
K24-6-RF-60-00-080-BB-024-010	15,5		798	784	81,03	0,03	1,91	0,08	11660	5,11	0,21	5,11	0,21	7,82	0,33
K24-1-RF-60-00-080-BB-025-010	13,7		807	800	69,52	0,14	1.904,12	79,34	11660	2.880,50	120,02	2.880,50	120,02	3.581,93	149,25
K24-2-RF-60-00-080-BB-025-010	14,9		804	792	75,68	0,02	21,07	0,88	11660	26,49	1,10	26,49	1,10	31,52	1,31
K24-5-RF-60-00-080-BB-026-013	13,9		799	792	78,43	0,02	20,69	0,86	11660	25,23	1,05	25,23	1,05	29,45	1,23
K24-6-RF-60-00-080-BB-026-013	14,1		801	793	77,10	0,03	20,76	0,86	11660	25,46	1,06	25,46	1,06	29,86	1,24
Median	14,3		802	793	80,38	0,03	2,22	0,09	11660	5,76	0,24	5,76	0,24	8,74	0,36
Mittelwert	14,3		803	794	80,63	0,05	147,74	6,16	11660	223,85	9,33	223,85	9,33	279,07	11,63
Standardabweichung	0,7		8	9	6,73	0,05	505,80	21,08	-	765,12	31,88	765,12	31,88	951,29	39,64
CV [%]	4,8		1,0	1,2	8,34	91,89	342,37	342,37	-	341,81	341,81	340,88	341,81	340,88	340,88

Abb. Anhang B-33: BB-RF-00-080_K24

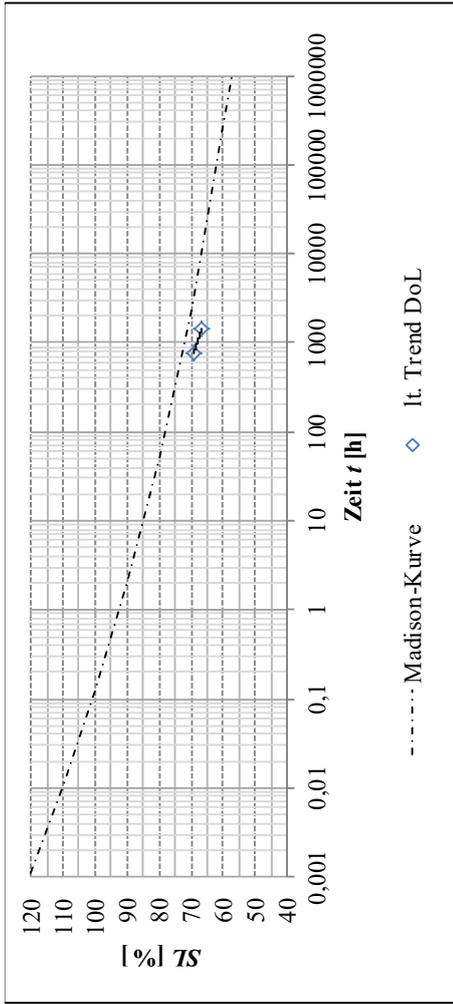


Referenzschraube-60-00-070-BauBuche-XYZ-ABC	
Holzart	BB BauBuche
LJ	70 %
Schraubentyp	RF Referenzschraube
Eindrehlänge	60 mm
Einbindelänge	00 mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u [%]	ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	lt. Versuchstagebuch					lt. Madison		lt. Trend DoL	
					t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]	
K24-1-RF-60-00-070-BB-030-010	14,0	821	813	64,83	0,14	1.246,23	51,93	10200	1.078,76	44,95	1.060,15	44,17	
K24-2-RF-60-00-070-BB-030-010	14,9	811	799	68,63	0,04	743,05	30,96	10200	649,12	27,05	638,10	26,59	
K24-3-RF-60-00-070-BB-029-010	14,0	815	807	67,46	0,05	819,07	34,13	10200	708,37	29,52	695,65	28,99	
K24-4-RF-60-00-070-BB-029-010	14,9	810	798	63,17	0,18	3.271,83	136,33	10200	2.908,97	121,21	2.869,88	119,58	
K24-5-RF-60-00-070-BB-028-010	14,4	796	786	73,32	0,01	202,91	8,45	10200	161,73	6,74	157,09	6,55	
K24-6-RF-60-00-070-BB-028-010	15,2	805	792	69,76	0,02	687,56	28,65	10200	595,90	24,83	584,99	24,37	
K24-5-RF-60-00-070-BB-027-013	14,9	798	786	76,29	0,01	46,57	1,94	10200	46,44	1,94	46,51	1,94	
K24-6-RF-60-00-070-BB-027-013	14,6	799	789	78,30	0,01	23,13	0,96	10200	23,49	0,98	23,58	0,98	
K24-5-RF-60-00-070-BB-026-104	14,1	805	797	70,90	0,11	541,93	22,58	10200	458,43	19,10	449,79	18,74	
K24-6-RF-60-00-070-BB-026-104	14,8	800	788	72,07	0,03	308,14	12,84	10200	269,01	11,21	264,70	11,03	
K24-1-RF-60-00-070-BB-025-008				66,22	0,04	1.051,47	43,81	10200	917,49	38,23	903,68	37,65	
K24-2-RF-60-00-070-BB-025-008				60,83									
K24-5-RF-60-00-070-BB-024-008	14,6	788	778	81,31	0,01	14,32	0,60	10200	11,98	0,50	11,74	0,49	
K24-6-RF-60-00-070-BB-024-008	15,0	791	779	74,69	0,02	84,59	3,52	10200	71,96	3,00	70,55	2,94	
Median	14,7	802	790	70,33	0,03	541,93	22,58	10200	458,43	19,10	449,79	18,74	
Mittelwert	14,6	803	793	70,56	0,05	695,45	28,98	10200	607,82	25,33	598,18	24,92	
Standardabweichung	0,4	10	11	5,89	0,06	876,15	36,51	-	777,80	32,41	767,20	31,97	
CV [%]	2,8	1,2	1,3	8,34	107,57	125,98	125,98	-	127,97	127,97	128,26	128,26	

Abb. Anhang B-34: BB-RF-00-070_K24

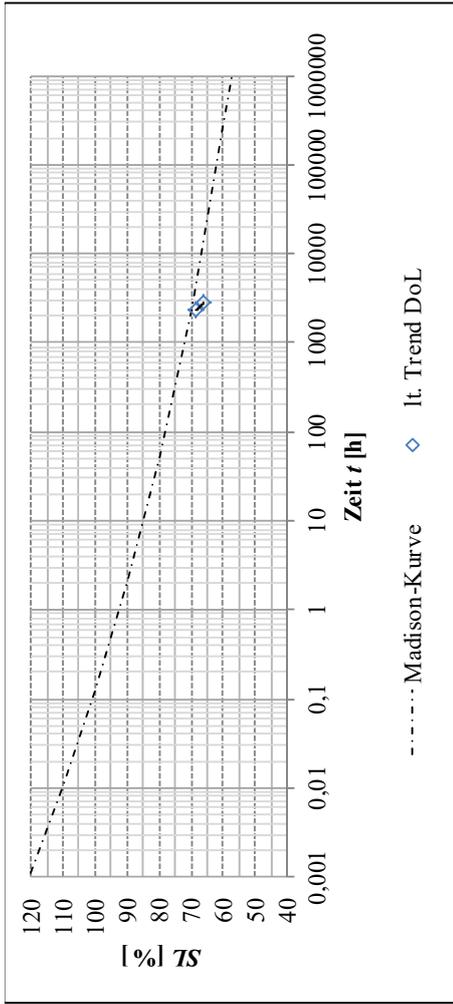


Prototyp1-60-16-060-BauBuche-XYZ-ABC		
Holzart	BB	BauBuche
L1	60	%
Schraubentyp	P1	Prototyp1
Eindrehlänge	60	mm
Einbindelänge	16	mm
P-fostenbezeichnung	XYZ-ABC	

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u		ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstagebuch				It. Madison		It. Trend DoL	
	t _{ramp} [h]	t _{const} [h]				t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]		
K25-1-P1-60-16-060-BB-022-013													
K25-2-P1-60-16-060-BB-022-013													
K25-3-P1-60-16-060-BB-023-013	14,5		798	788	69,16*	0,02	977,31	40,72	9710	767,22	31,97	775,38	32,31
K25-4-P1-60-16-060-BB-023-013	14,7		787	776	66,73*	0,03	1.550,87	64,62	9710	1.446,11	60,25	1.449,94	60,41
K25-5-P1-60-16-060-BB-024-013													
K25-6-P1-60-16-060-BB-024-013													
K25-3-P1-60-16-060-BB-026-009													
K25-4-P1-60-16-060-BB-026-009													
Median	14,6		793	782	67,95*	0,03	1264,09	52,67	9710	1106,67	46,11	1112,66	46,36
Mittelwert	14,6		793	782	67,95*	0,03	1264,09	52,67	9710	1106,67	46,11	1112,66	46,36
Standardabweichung	0,2		8	9	1,72*	0,00	405,57	16,90	-	480,04	20,00	476,99	19,87
CV [%]	1,2		1,0	1,1	2,54*	17,68	32,08	32,08	-	43,38	43,38	42,87	42,87

Abb. Anhang B-35: BB-P1-16-060_K25



Prototyp1-60-00-060-BauBuche-XYZ-ABC		
Holzart	BB	BauBuche
L1	60	%
Schraubentyp	P1	Prototyp1
Eindrehlänge	60	mm
Einbindelänge	00	mm
Pfostenbezeichnung	XYZ-ABC	

Anmerkung: * bedeutet vorläufiger Wert (Schätzung)

Bezeichnung Probekörper	u		ρ _u [kg/m ³]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	SZ [%]	It. Versuchstagebuch				It. Madison		It. Trend DoL					
	[%]					t _{ramp} [h]	t _{const} [h]	t _{const} [d]	F _{ax,0} [N]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]	t [h]	t [d]		
K27-1-P1-60-00-060-BB-021-011																	
K27-2-P1-60-00-060-BB-021-011																	
K27-3-P1-60-00-060-BB-022-011					66,21*	0,06	3.020,72	125,86	7980	2.805,14	116,88	2.813,82	117,24				
K27-4-P1-60-00-060-BB-022-011																	
K27-5-P1-60-00-060-BB-023-011					68,45*	0,02	2.378,02	99,08	7980	2.330,40	97,10	2.332,39	97,18				
K27-6-P1-60-00-060-BB-023-011																	
Median					67,33*	0,04	2699,37	112,47	7980	2567,77	106,99	2573,11	107,21				
Mittelwert					67,33*	0,04	2699,37	112,47	7980	2567,77	106,99	2573,11	107,21				
Standardabweichung					1,59*	0,03	454,46	18,94	-	335,69	13,99	340,42	14,18				
CV [%]					2,35*	78,78	16,84	16,84	-	13,07	13,07	13,23	13,23				

Abb. Anhang B-37: BB-P1-00-060_K27

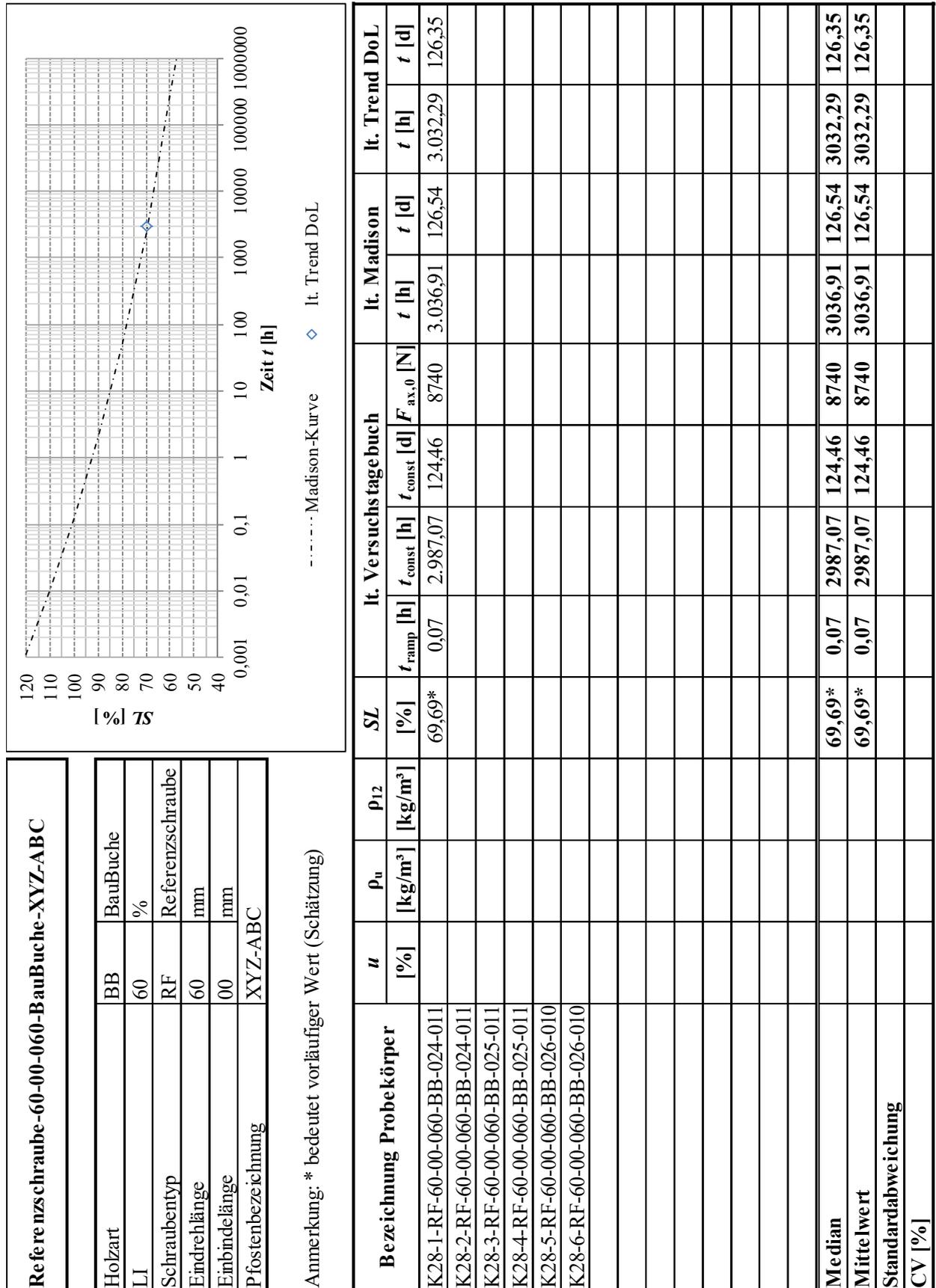


Abb. Anhang B-38: BB-RF-00-060_K28

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