



Markus Obermüller, BSc

Gedrungene Brett-, BSH- und BSP-Querschnitte unter Druckbeanspruchung längs zur Faser sowie in Scheibenebene

MASTERARBEIT

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

Eingereicht an der
Technischen Universität Graz

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

Graz, März 2020

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG AFFIDAVIT

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

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

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

An dieser Stelle möchte mich bei allen bedanken, die mich während des Schreibens meiner Masterarbeit tatkräftig unterstützt und somit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, die es mir ermöglichte ein Studium absolvieren zu dürfen. Während dieser Zeit stieß ich immer wieder auf neue Herausforderungen durch die ich mich weiterentwickeln konnte. Dabei war immer auf meine Familie Verlass und vor allem in stressigen Zeiten konnte ich Zuhause Rückhalt finden und Kraft tanken. Danke dafür!

Ein weiteres großes Danke geht an meinen Betreuer Assoc.Prof. Reinhard Brandner. Er fand immer Zeit für mich und hatte ein offenes Ohr für meine Fragen. Auf sein Wort konnte man sich stets verlassen und durch seine Expertise konnte er mir immer weiterhelfen wenn ich Zweifel hatte.

Dem Institut für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz möchte ich danken für die Möglichkeit hier meine Abschlussarbeit zu verfassen und für das in mich gesteckte Vertrauen, mir beim Ausarbeiten meiner Arbeit freie Hand zu lassen. Weiters möchte ich an dieser Stelle auch noch Uwe Fülöp vom Labor für Konstruktiven Ingenieurbau danken welcher mir bei der Durchführung der Prüfungen zur Seite gestanden ist, sowie dem Leiter des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau, Priv.-Doz. Bernhard Freytag.

Zu guter Letzt möchte ich bei meinen StudienkollegInnen und FreundInnen bedanken. Mit ihnen konnte ich mich immer austauschen und wurde ermutigt, wenn es mal nicht so lief wie gewollt.

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden Untersuchungen an gedungenen Brett-, Brettschichtholz- und Brettsperrholz-Querschnitte unter Druckbeanspruchung längs zur Faser sowie in Scheibenebene durchgeführt. Zu Beginn wird auf die Durchführbarkeit einer Korrektur der Eigenverformungen der Prüfmaschine bei globalen Verformungsmessungen eingegangen. Infolge wird ein passendes mathematisches Modell zur Beschreibung von Brettabschnitten und Brettschichtholz ausgewählt und kalibriert. Zuletzt werden noch das Materialverhalten und die Lastausbreitung bei Druck längs zur Faser genauer untersucht. Die Prüfdurchführung erfolgt an Prüfkörpern unterschiedlicher Festigkeitsklasse, Geometrie, Lamellenanzahl und Lasteinleitungsflächen. Dabei werden lokale als auch globale Verformungen, unter anderem unterstützt durch ein optisches Bildkorrelationsmesssystem, gemessen. Die Auswertung der Daten erfolgt mittels der freien Programmiersprache R. Im Zug dieser wird der E-Modul nach EN 408 und mittels Regression im linearen Bereich ermittelt und verglichen. Aus den Ergebnissen geht eine Unterschätzung der Druckfestigkeit zugrunde liegender Normen hervor. Hinsichtlich Lastausbreitung kann keine Aktivierung benachbarter Zonen festgestellt werden. Betreffend das Spalten kann ein positives Materialverhalten beobachtet werden. Der Lastausbreitungswinkel, im Sinne der zusätzlichen Aktivierung angrenzender Querschnittsbereiche, ist baupraktisch mit Null anzunehmen.

Abstract

Within this thesis stocky cross sections of boards, glued laminated timber (glulam; GLT) and cross laminated timber (CLT) loaded in compression parallel to grain as well as parallel to plane are investigated. At the beginning, the feasibility of a correction of the testing machine's inherent deformations in global deformation measurements is discussed. As a result, a suitable mathematical model for the description of board sections and glued laminated timber is further developed and its parameters calibrated on test data. Finally, the material behaviour and the load distribution under compressive load parallel to grain is investigated in more detail. Therefore, specimens of different strength class, geometry, number of laminations and load application areas are tested. Local as well as global strains are measured, among others by means of an optical image correlation measuring system. The data is analysed using the free programming language R. In the course of this, the modulus of elasticity is determined according to EN 408 and by regression in the linear range, and both are compared. The results show an underestimation of the compressive strength in current product standards. With regard to the load distribution, no activation of adjacent zones can be found. Concerning splitting, a positive material behaviour can be observed. For practical applications and in respect to the activation of adjacent zones, the load distribution angle can be set zero.

Inhaltsverzeichnis

KAPITEL 1: EINLEITUNG	1
1-1 ALLGEMEINES	1
1-2 ZIEL DER ARBEIT	2
KAPITEL 2: LITERATURERCHE	3
2-1 MERKMALSFREIE KLEINPROBEN VS. BAUHOLZ.....	3
2-1.1 Materialkenngrößen von Merkmalsfreien Kleinproben und Bauholz	3
2-1.2 Festigkeit bzw. Widerstand in Abhängigkeit des Last-Faserwinkels	5
2-1.3 Druckversagen von gedrunenen Querschnitten parallel zur Faser	5
2-1.4 Einflussparameter Holzfeuchte.....	7
2-2 WEITERE EINFLUSSPARAMETER SOWIE ERGÄNZENDES BETREFFEND SCHNITTHOLZ	10
2-2.1 Einfluss durch Äste (lokale Schrägfaser)	10
2-2.2 Lastausbreitung bei Druck parallel zur Faser	10
2-3 BRETTBASIERTE HOLZBAUPRODUKTE SOWIE GRÖSSEN- UND SYSTEMEFFEKTE.....	13
2-3.1 Brettschichtholz.....	13
2-3.2 Brettsperrholz	14
2-3.3 System- und Grösseneffekte	15
2-3.3.1 Allgemeines.....	15
2-3.3.2 Parallele Systeme – Systemeffekte	15
2-3.3.3 Serielle Systeme – Größeneffekte	16
2-3.3.4 Serielle, sub-parallele Systeme.....	16
2-4 MATHEMATISCHE MODELLE ZUR BESCHREIBUNG DES ARBEITSVERHALTENS	16
2-4.1 Modell nach Glos	17
2-4.2 Adaptiertes Glos Modell.....	18
2-5 OFFENE WISSENSCHAFTLICHE FRAGESTELLUNGEN	19
KAPITEL 3: MATERIAL UND METHODEN	20
3-1 PRÜFFREIHE-BRETTABSCHNITTE.....	20
3-1.1 Prüfkörper.....	20
3-1.2 Prüfkfiguration	21
3-1.3 Prüfungen von Stahlprüfkörpern	23
3-2 PRÜFFREIHE BSH UND BSP.....	23
3-2.1 Prüfkörper.....	23
3-2.2 Prüfkfiguration	27
3-3 MASCHINENWEGKORREKTUR FÜR PRÜFUNGEN AN BRETTABSCHNITTEN.....	29
3-3.1 Allgemeines.....	29

3-3.2	Auswertung der Stahl-Stahl-Prüfreiheiten	30
3-3.3	Anpassung an Messung der Wegaufnahme	33
3-4	PRÜFDATENAUSWERTUNG DER BRETTABSCHNITTE.....	37
3-4.1	Allgemeines	37
3-4.2	Prüfdatenaufbereitung.....	37
3-4.3	Anwendung der Maschinenwegkorrektur.....	38
3-4.4	Druck-Elastizitätsmodul und -Festigkeit	38
3-4.4.1	Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung.....	38
3-4.4.2	Druck-E-Modul parallel zur Faserrichtung nach EN 408.....	39
3-4.4.3	Druck-E-Modul parallel zur Faserrichtung gemäß Regression im linearen Bereich ...	39
3-4.5	Prüfungen mit Kraftgesteuerter Lastaufbringung	41
3-4.6	Vergleich von „Zwick“- und „Cat“-Daten.....	41
3-4.7	Vergleich der Druck-E-Moduln	42
3-4.8	Definition und Kalibrierung eines mathematischen Modells.....	43
3-4.8.1	Vergleich der beiden Modelle	43
3-4.8.2	Kalibrierung des gewählten Modells	45
3-4.9	Auswertung der Daten	46
3-4.9.1	Allgemeines	46
3-4.9.2	Feuchtekorrektur.....	46
3-4.9.3	Zu ermittelnde Kenngrößen und Beseitigung von Extremwerten.....	47
3-4.9.4	Bestimmung des theoretischen Verteilungsmodells	47
3-4.9.5	Rechtszensierte Daten.....	49
3-4.9.6	Bestimmung statistischer Kenngrößen.....	49
3-4.9.7	Erstellung von Korrelationsmatrizen	50
3-5	PRÜFDATENAUSWERTUNG BSP- UND BSH-PRÜFKÖRPER	50
KAPITEL 4: ERGEBNISSE UND DISKUSSION		53
4-1	REPRÄSENTATIVES VERSAGENSBILD DER PRÜFKÖRPER	53
4-1.1	Prüfkörper aus Brettabschnitten.....	53
4-1.2	Prüfkörper aus BSH unter Teilflächenbelastung	54
4-2	ERGEBNISSE AUS DEM VERGLEICH UNTERSCHIEDLICHER VERTEILUNGSMODELLE	55
4-3	PRÜFREIHEITEN DER BRETTABSCHNITTE	55
4-3.1	Wahl des Parameters η und Vergleichsstudien	55
4-3.2	Prüfreiheit CB	55
4-3.3	Prüfreiheit BB	58
4-3.3.1	Prüfreiheit BB-lang	58
4-3.3.2	Prüfreiheit BB-kurz.....	60
4-3.4	Prüfreiheit L40	63
4-3.4.1	Prüfreiheit L40-lang-weggesteuert.....	63

4-3.4.2	Prüfreihe L40-kurz	66
4-3.4.3	Prüfreihe L40-lang-kraftgesteuert	69
4-3.5	Diskussion der Eingangsparameter des mathematischen Modells	72
4-3.6	Fazit aus Brettabschnittsprüfungen	74
4-4	PRÜFREIHEN MIT BRETTSCHICHTHOLZ	75
4-4.1	Prüfreihe A	75
4-4.2	Prüfreihe B.....	82
4-4.3	Prüfreihe C.....	91
4-4.4	Prüfreihe D	93
4-4.5	Auftretende Homogenisierungseffekte.....	95
4-4.6	Diskussion der Eingangsparameter für das mathematische Modell	97
4-4.7	Fazit aus BSH-Prüfungen	98
4-5	PRÜFREIHE MIT BRETTSPERRHOLZ	100
4-5.1	Prüfreihe E.....	100
4-6	DISKUSSION DER LASTAUSBREITUNG	103
4-7	SCHLUSSFOLGERUNGEN	106
ANHANG A	LITERATURVERZEICHNIS	I
ANHANG B	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
ANHANG C	DIVERSE ANDERE ANHÄNGE	VII
C-1	VERGLEICHE ZWISCHEN DEN DRUCK-E-MODULN LÄNGS ZUR FASER IN ABHÄNGIGKEIT DES PARAMETERS H	VII
C-1.1	Prüfreihe CB.....	VII
C-1.2	Prüfreihe BB-lang.....	VIII
C-1.3	Prüfreihe BB-kurz	VIII
C-1.4	Prüfreihe L40-lang-weggesteuert	IX
C-1.5	Prüfreihe L40-kurz	IX
C-2	AUSGANGSDATEN DER PRÜFREIHEN – BRETTABSCHNITTE.....	VIII
C-3	AUSGANGSDATEN DER PRÜFREIHEN – BSH.....	XVI
C-4	AUSGANGSDATEN DER PRÜFREIHEN – BSP	XXII
C-5	MERCURY – MESSUNGEN DER PRÜFREIHEN BSH UND BSP.....	XXIII
C-5.1	Prüfreihe A-TF1 und A-TF4	XXIII
C-5.2	Prüfreihe B-TF1 bis B-TF4	XXV
C-5.3	Prüfreihe E-TF1	XXVII

KAPITEL 1: EINLEITUNG

1-1 ALLGEMEINES

Für die Bemessung von Holzkonstruktionen ist es notwendig, das Material- und Produktverhalten und die damit einhergehenden Material- und Produkteigenschaften zu kennen. Um diese erforderlichen Grundlagen zu ermitteln werden Material- bzw. Produktprüfungen durchgeführt und in Folge ausge- und bewertet. Anschließend wird das Material bzw. Produkt in Festigkeitsklassen mit definierten physikalischen / mechanischen Kenngrößen eingeordnet. Dabei gilt das Hauptaugenmerk auf Festigkeit und Steifigkeit.

Holz ist ein natürlich gewachsener Rohstoff mit inhärent hohen Streuungen in einigen seiner für den Baubereich wesentlichen Kenngrößen. Die Streuung bzw. Variabilität innerhalb des Materials erklärt sich durch die Vielzahl an Einflussgrößen, wie z.B. Dichte, Feuchtegehalt, Astigkeit, Holzart, Wachstumsrate, Faserneigung, Schnittart und nicht zuletzt Standort (lokal) und Provenienz (global). Des Weiteren ist Holz ein zylindrisch anisotropes Material, welches in den drei Hauptrichtungen longitudinal, radial und tangential unterschiedliche Eigenschaften aufweist. Im Bauwesen werden die Eigenschaften i. A. vereinfacht als transversal-isotrop beschrieben, d.h. alleinig in und quer zur Faserrichtung angegeben.

In der Ermittlung von Kenngrößen für das Bauwesen liegt der Fokus vor allem auf den unteren Verteilungsbereich, insbesondere dem 5 %-Quantil. Zur allgemeineren Beschreibung der Verteilung dieser Kenngrößen werden diese i.d.R. durch theoretische Verteilungsmodelle abstrahiert, welche es ermöglichen, anhand weniger aber für das Modell essentielle Kennzahlen, den Modellparametern, jegliche interessierende statistische Kennzahl zu ermitteln oder für Simulationen entsprechende pseudo-Zufallszahlen zu generieren.

Kommen Holzprodukte in Tragstrukturen zum Einsatz, müssen diese auf Basis einer zugrundeliegenden statischen Berechnung vordimensioniert und anschließend auf ausreichende Tragsicherheit nachgewiesen werden. Dabei wird bei der Nachweisführung in Querschnittsnachweise (lokal) und Bauteilnachweise (global) unterschieden. Für beide ist es notwendig, die Festigkeit des Materials zu kennen. Im Falle von Druckbeanspruchungen, wie z.B. bei Stützen, Wandscheiben oder Fachwerkgurten, kommt es bei stabilitätsgefährdeten Bauteilen in der Nachweisführung zu einer rechnerischen Abminderung der Querschnittstragfähigkeit. Genauer betrachtet wechselt der Versagensmodus bei Stabilitätsproblemen von einem Druck- zu einem Biegeversagen, welches jedoch auch wieder in eine Druck- und eine Zugzone unterteilt werden kann. Der Widerstand von knickgefährdeten Bauteilen hängt dabei vordergründig von der Geometrie des Bauteils ab, welche diesbezüglich als Schlankheit definiert ist. Lange, schlanke Bauteile besitzen dabei eine größere Schlankheit als kurze, gedrungene Querschnitte und sind anfälliger auf ein Versagen durch Stabilität (Knicken). Weiteren Einfluss auf den Widerstand gegen Druckbelastungen längs zur Faser hat dabei auch die Art der Lasteinleitung. Diese kann vollflächig oder teilflächig, zentrisch oder exzentrisch, Letzteres im Sinne der Geometrie sowie materialinhärenter Variabilität, erfolgen. Im Falle einer teilflächigen Lasteinleitung ist auch der Lastausbreitungswinkel von Interesse, um z.B. bei größeren Wandscheiben einschätzen zu können, wie viel Tragstruktur abseits der Lasteinleitungsfläche zusätzlich aktiviert werden kann, oder ob vorhandene Öffnungen sich in Folge der Lastausbreitung im Bereich der mitwirkenden Tragstruktur befinden.

Auch Biegeträger sind in eine Druck- und eine Zugzone zu unterteilen. Dabei ist das Versagensverhalten des Querschnittes abhängig von der Holzqualität. Je höher diese ist desto eher tritt ein Versagen auf Druck mit anschließender Spannungumlagerung in die Zugzone ein, bis auch diese ihre maximale Tragfähigkeit erreicht und schließlich der gesamte Biegeträger versagt. Demzufolge ist auch bei Biegeträgern eine Kenntnis der Druckfestigkeit von Bedeutung.

Ein baupraktischer Anwendungsfall in dem Kenntnisse über Druck längs zur Faser grundlegend sind, ist beispielsweise die Ausbildung eines Fachwerkträgers; siehe Abbildung 1-1 links. In diesem Fall kommt es im Obergurt sowie in den Druckstreben zu Druckspannungen. Entsprechende Querschnittsnachweise im Anschlussbereich sowie Stabilitäts- bzw. Bauteilnachweise sind zu führen. Ein weitere Anwendungsfall mit Fokus auf den Anschlusspunkt und in Kombination einer Teilflächenbeanspruchung wäre die lokale Lasteinleitung im Fußpunkt einer Stütze; siehe Abbildung 1-1 rechts.



Abbildung 1-1: *Baupraktische Anwendungen von Druck längs zur Faser, beispielhaft gegeben durch einen Fachwerksträger (links, adaptiert aus [1]) und dem Fußpunkt einer Stütze (rechts, adaptiert aus [2])*

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Druckverhalten in Faserrichtung, also in longitudinaler Richtung, von Holz und Holzprodukten untersucht. Dabei gilt der Fokus gedungenen, nicht stabilitätsgefährdeten Prüfkörpern. Dabei werden Brettabschnitte unterschiedlicher Festigkeitsklasse, Abschnitte daraus hergestellter Brettschichtholzträger (BSH) sowie Abschnitte von Brettspertholz (BSP) untersucht wobei die beiden letztgenannten Produkte sowohl unter Voll- als auch Teilflächenbeanspruchung geprüft werden.

1-2 ZIEL DER ARBEIT

Im ersten Teil der Arbeit erfolgt die Auswertung von bereits bestehenden Daten von Druckprüfungen längs zur Faser, durchgeführt an Brettabschnitten im Rahmen von drei Prüfreiheiten mit unterschiedlicher Holzqualität. Die Brettabschnitte selbst wurden festigkeitssortierten Brettern aus der Produktion von Brettschichtholz entnommen. Bedingt durch die im Zuge dieser Prüfungen angewandten Verformungsmessung – lokal in Prüfkörpermitte und global über den Maschinenweg – gilt in dieser Auswertung ein besonderes Augenmerk der Korrektur des Maschinenweges. Dies, um das Verformungsverhalten des gesamten Prüfkörpers über die gesamte Prüfdauer, einschließlich des Bereichs der Entfestigung nach Erreichen der Maximallast, entsprechend analysieren zu können. In weiterer Folge gilt es anhand dieser Auswertung ein nichtlineares mathematisches Modell für das Längsdruckverhalten an die entsprechend korrigierten Prüfdaten zu kalibrieren, wobei die entsprechenden Modellparameter wiederum stochastisch erfasst und in Folge bewertet werden. Das Modell zur Beschreibung des Kraft-Verformungsverhalten von Brettabschnitten unter Druckbelastung in Faserrichtung einschließlich stochastischer Beschreibung seiner Modellparameter dient wiederum als Grundbaustein zur stochastisch-mechanischen Modellierung von Brettschichtholzlamellen und in weiterer Folge von Brettschichtholz, wobei diese beiden zuletzt genannten Punkte nicht Inhalt dieser Arbeit sind.

Im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit werden Druckprüfungen längs zur Faser an Holzbauprodukten durchgeführt. Der Fokus gilt dabei Brettschichtholz (BSH); zudem wird aber auch Brettspertholz (BSP) in geringem Umfang geprüft. Neben der Bestimmung der Grundkenngrößen dieser Produkte bei vollflächiger Beanspruchung werden auch Untersuchungen mit Teilflächenbelastungen durchgeführt. Dies um den Lastausbreitungswinkel in Folge einer lokalen Druckbeanspruchung parallel zur Faser bei BSH und BSP versuchstechnisch zu bestimmen und mit jenen Angaben aus der Literatur entsprechend abzugleichen bzw. diese zu validieren.

KAPITEL 2: LITERATURRECHERCHE

2-1 MERKMALSFREIE KLEINPROBEN VS. BAUHOLZ

2-1.1 MATERIALKENNGRÖSSEN VON MERKMALSFREIEN KLEINPROBEN UND BAUHOLZ

Unter „merkmalsfreien Kleinproben“ („clear wood“) versteht man i.d.R. merkmalsfreies Holz, d.h. Holzproben mit i.d.R. geringen Abmessungen, frei von Ästen und Drehwuchs sowie mit stehenden Jahrringen. Da diese Kleinproben augenscheinlich keine Störzonen aufweisen, besitzen sie, im Vergleich zu herkömmlichem Bauholz, deutlich höhere Festigkeiten. Dem gegenüber steht das Bauholz, welches, je nach Festigkeitsklasse, im Wesentlichen und auch bedingt durch die geometrischen Abmessungen, sämtliche lokale (insbesondere Äste) und globale Wuchsmerkmale (Drehwuchs, Reaktionsholz, etc.) enthält.

Mit Fokus auf Nadelholz und hier insbesondere auf die im Weiteren analysierte Fichte (*Picea abies*) werden als Vergleichswerte für Bauholz jene der Festigkeitsklasse C24 nach EN 338 [3] herangezogen, da diese Klasse in Mitteleuropa weitgehend sägefällendem Bauholz ohne wesentliche Sortierung entspricht. In Tabelle 2-1 und Tabelle 2-2 sind entsprechende Materialkenngrößen angeführt.

Die nachfolgenden Variablen sind wie folgt definiert:

- ρ Rohdichte
- f_m Biegefestigkeit
- $f_{t,0}$ Zugfestigkeit in Faserrichtung
- $f_{c,0}$ Druckfestigkeit in Faserrichtung
- E_0 Elastizitätsmodul in Faserrichtung

Tabelle 2-1: *Materialkenngrößen von merkmalsfreien Kleinproben der Holzart Fichte (Picea abies)*

Merkmalsfreie Kleinprobe	ρ [kg/m ³]	f_m [N/mm ²]	$f_{t,0}$ [N/mm ²]	$f_{c,0}$ [N/mm ²]	E_0 [N/mm ²]
$X_{\text{mean}}^{1)}$	470	78	90	50	11.000

Anmerkungen:

¹⁾... nach Wagenführ [4]

Tabelle 2-2: *Materialkenngrößen von Bauholz der Festigkeitsklasse C24 nach EN 338 [3]*

C24	ρ [kg/m ³]	f_m [N/mm ²]	$f_{t,0}$ [N/mm ²]	$f_{c,0}$ [N/mm ²]	E_0 [N/mm ²]
X_{05}	350 ²⁾	24 ²⁾	14,5 ²⁾	21 ²⁾	7.400 ²⁾
X_{mean}	420	34,9	22,5	26,5	11.000 ²⁾
CV[X]	-	25% ³⁾	30% ³⁾	15% ⁴⁾	-

Anmerkungen:

²⁾... nach ÖNORM EN 338 [3]

³⁾... nach JCSS [5]

⁴⁾... nach Erfahrungen am Lignum Test Center (LTC) des Instituts für Holzbau und Holztechnologie | TU Graz

Die Umrechnung der charakteristischen Werten, welche 5 %-Quantilwerten (X_{05}) entsprechen, auf Mittelwerte (X_{mean}) erfolgte durch Umformen der in Glg. (2.1) - (2.3) angeführten Formeln. Die dafür erforderlichen Variationskoeffizienten ($CV[X]$) und das zugrundeliegende theoretische Verteilungsmodell, eine logarithmische Normalverteilung (LNV), wurden nach den Empfehlungen von JCSS – “Probabilistic Model Code“ [5] übernommen. Nur der Variationskoeffizient für die Druckfestigkeit in Faserrichtung wurde auf Grundlage von Erfahrungswerten am Lignum Test Center (LTC) anstatt der vorgeschlagenen 20 % auf 15 % reduziert.

Formeln zur Umrechnung eines 5 %-Quantilwertes in einen Mittelwert mit zugrundeliegender logarithmischer Normalverteilung (LNV):

$$X_{05} = e^{(\mu_y - 1,645 \cdot \sigma_y)} \quad (2.1)$$

mit:

$$\mu_y = \ln\left(\frac{\mu_x}{\sqrt{1 + CV[X]^2}}\right) \quad (2.2)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\ln(1 + CV[X]^2)} \quad (2.3)$$

Dabei sind:

X_{05} 5 %-Quantilwert [N/mm²]

μ_y Lageparameter der Lognormalverteilung

σ_y Streuungsparameter der Lognormalverteilung

μ_x Erwartungswert der lognormalverteilten Zufallsvariable X [N/mm²]

$CV[X]$ Variationskoeffizient der lognormalverteilten Zufallsvariable X [-]

In der zuvor getätigten Gegenüberstellung der Kenngrößen von merkmalsfreien Kleinproben und Vollholz der Festigkeitsklasse C24 nach [3] ist für Ersterer eine höhere Rohdichte ausgewiesen, welche zudem deutlich höher erscheint als für Fichte mitteleuropäischer Provenienz im Mittel erwartbar. Davon abgesehen sind die Festigkeiten von merkmalsfreien Kleinproben im Mittel deutlich höher als jene von Bauholz üblicher Qualität. So zeigt sich die mittlere Zugfestigkeit parallel zur Faser, $f_{t,0,mean}$, rund viermal und die Druckfestigkeit parallel zur Faser, $f_{c,0,mean}$, sowie die Biegefestigkeit, $f_{m,mean}$, rund zweimal so hoch wie für Bauholz C24 zu erwarten. In der Festlegung der Druckfestigkeit $f_{c,0,mean}$ für C24 ist zudem zu berücksichtigen, dass diese Kenngröße für ihre Sensitivität gegenüber Holzfeuchteänderungen bekannt ist (siehe Abschnitt 2-1.4), und, da der Eurocode 5 [6] hier im Modifikationsbeiwert k_{mod} , jener Beiwert welcher u.a. den Einfluss der Holzfeuchte auf die charakteristischen Festigkeitskenngrößen berücksichtigt, nicht zwischen Nutzungsklasse NK 1 und 2 unterscheidet, auf für das Referenzklima von 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte bezogen, auf einem konservativem Niveau festgelegt ist. Dies trägt auch zu einem gewissen Ausmaß zum gegebenen Missverhältnis zwischen den festgelegten Kenngrößen bei: Während das Verhältnis $f_{c,0,mean}/f_{t,0,mean}$ merkmalsfreien Kleinproben 0,6 beträgt ist dieses 1,4 für C24. Das ist auch darauf zurückzuführen, dass Äste die Zugfestigkeit deutlich mehr schwächen als die Druckfestigkeit, was sich in Folge auch in einem höheren Variationskoeffizient für diese niederschlägt. Betrachtet man das Verhältnis $f_{c,0,mean}/f_{m,mean}$ so ergibt dies 0,6 für merkmalsfreie Kleinproben und 0,76 für C24, was, mit Bezug auf das Verhältnis $f_{c,0,mean}/f_{t,0,mean}$, deutlich ausgeglichener ist. Zu berücksichtigen ist, dass ein Biegezugversagen eines Trägers insbesondere bei merkmalsfreien Kleinproben aber auch bei Bauholz hoher Qualität von beiden Kenngrößen, Zug- und Druckfestigkeit parallel zur Faser, bestimmt wird. In Hinblick auf den E-Modul werden im Mittel für merkmalsfreie Kleinproben als auch für Bauholz üblicher Qualität idente Kenngrößen erwartet.

2-1.2 FESTIGKEIT BZW. WIDERSTAND IN ABHÄNGIGKEIT DES LAST-FASERWINKELS

Grundsätzlich ist das Druckversagen von Holz, sowohl längs als auch quer zur Faser, ein duktiles. Dieser Umstand steht im Gegensatz zum spröden Zug- bzw. Schubversagen. Wie bei allen Kenngrößen im Holz spielt auch beim Druckversagen längs zur Faser der Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung eine große Rolle. Dazu wurde 1921 von Hankinson ein Bericht über die Untersuchungen von verschiedenen Winkeln zwischen Kraft und Faser, durchgeführt an merkmalsfreien Kleinproben aus Fichte, veröffentlicht. Aus diesen Untersuchungen resultierte die empirisch ermittelte, sogenannte „Hankinson Formel“, wie in Gl. (2.4) dargestellt; im Original verwendete Variablen wurden an die heute üblichen Bezeichnungen und für den hier interessierenden Fall der Druckfestigkeit angepasst (siehe [7]):

$$f_{c,\alpha} = \frac{f_{c,0} \cdot f_{c,90}}{f_{c,0} \cdot \sin^2(\alpha) + f_{c,90} \cdot \cos^2(\alpha)} \quad (2.4)$$

Dabei sind:

- $f_{c,\alpha}$ Druckfestigkeit bei Winkel α [N/mm²]
- $f_{c,0}$ Druckfestigkeit in Faserrichtung [N/mm²]
- $f_{c,90}$ Druckfestigkeit normal zur Faserrichtung [N/mm²]
- α Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung [°]

Der Basiswert $f_{c,90}$ wird nach Eurocode 5 [6] noch mit dem Multiplikationsfaktor $k_{c,90}$ erhöht, welcher bei Druck quer zur Faser die Aktivierung von angrenzenden Bereichen zur Lastabtragung berücksichtigt.

Obwohl Last-Faserwinkel ungleich 0 bzw. 90° im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen von weniger Relevanz sind, ist es doch auch das Verhältnis der Druckfestigkeiten quer und längs zur Faser, was im Speziellen bei den Prüfungen von BSP-Elementen verbunden mit dem produktinhärenten orthogonalen Schichtaufbau von Interesse ist. Dabei ist ergänzend anzumerken, dass auch der Querdruck-Modul deutlich geringer ist als jener parallel zur Faser, was bei Einleitung von Druckkräften in die Schmalseite, wie bei BSP-Wandelementen primär gegeben, zu einem Entziehen der Querlagen an der Mitwirkung der Lastabtragung führt. Näheres dazu später in Abschnitt 4-5.1.

2-1.3 DRUCKVERSAGEN VON GEDRUNGENEN QUERSCHNITTEN PARALLEL ZUR FASER

Um das Druckversagen parallel zur Faser genauer zu untersuchen, werden im Folgenden Studien, durchgeführt an gedrungenen „clear wood“-Prüfkörper, analysiert. Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Beschreibung des Versagensmechanismus wird zuvor noch der prinzipielle hierarchische Aufbau von Holz betrachtet. Dieser ist auf der makroskopischen Ebene durch den Aufbau der Jahrringe geprägt welcher wiederum in der Mikroebene in die Frühholzzone, aus Zellen mit dünnen Zellwänden, und die Spätholzzone, aus Zellen mit dicken Zellwänden, unterteilt wird. Zellen beider Zonen werden in Nadelholz durch Tracheiden repräsentiert und verlaufen in longitudinaler Richtung. Des Weiteren verlaufen Holzstrahlen, gebildet durch parenchymatisches Gewebe (Speichergewebe) primär in radialer Richtung bzw., je nach Holzart, auch in axialer Richtung (longitudinal). Zudem, wenn auch für die mechanischen Kenngrößen von geringerer Relevanz, verlaufen Harzkanäle in longitudinaler und auch radialer Richtung (siehe Abbildung 2-1, links). [8]

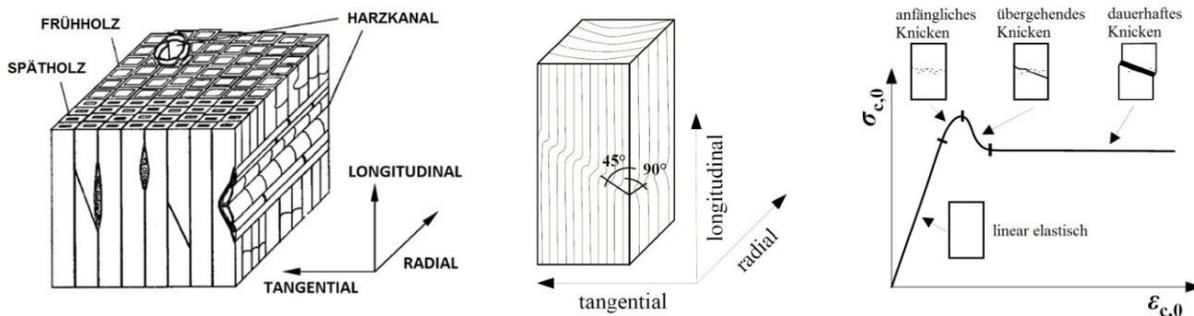


Abbildung 2-1: links: Aufbau von Holz, adaptiert aus [8]; mitte: Scherebene, adaptiert aus [9]; rechts: Versagensprozess, adaptiert aus [10]

Unter Druck parallel zur Faser kommt es zu einem lokalen Knickversagen der einzelnen Tracheiden und es bildet sich eine sogenannte Scherebene („kink band“). Dieser Prozess lässt sich in vier Hauptbereiche unterteilen (siehe Abbildung 2-1, rechts) [8, 10]:

(i) linear-elastischer Bereich

Zellverbund reagiert linear-elastisch auf äußere Druckbeanspruchung;

(ii) Bereich lokaler Akkumulation von Zellschädigungen

Stabilitätsversagen (Knicken) einzelner Zellen kumuliert sich sukzessive lokal und bildet in Folge eine Scherebene zum Zeitpunkt des Erreichens der Maximallast; in Folge der armierenden Wirkung der Holzstrahlen in radialer Richtung zeigt sich diese Scherebene tangential unter 45° und radial unter 90° ;

(iii) Übergangsbereich Stabilitätsversagen Zellen zu Gleiten

Nach Erreichen der Maximallast bei fortwährendem Stabilitätsversagen der Zellen kommt es zu einem sukzessiven Lastabfall (Entfestigungsbereich) und zur weiteren Verdichtung der Scherebene über den gesamten Querschnitt;

(iv) Bereich dauerhaften Gleitens

Bei weitgehend konstantem Kraftniveau („steady state“) kommt es in Folge andauernden Gleitens zwischen den beiden Probeabschnitten zu ausgeprägten Verformungen.

Dabei zeigt sich, dass das Verhalten für die radial-longitudinal Ebene unterschiedlich ist zur tangential-longitudinal Ebene. In der tangential-longitudinal Ebene bildet die Scherebene einen bestimmten Winkel aus. Dieser ist für Fichte nach Beobachtungen von Poulsen et al. [9] rd. 23° und nach nachfolgenden Beobachtungen von Mattheck [11] rd. 45° , wohingegen in der radial-longitudinal Ebene die Scherebene normal zu den Fasern ist (siehe Abbildung 2-1, mitte). An merkmalsfreien Kleinproben wurde beobachtet, dass sich die Scherebene oft bei Harzkanälen auszubilden beginnt. Dies ist, wie oben erläutert, dadurch begründet, dass es durch die Harzkanäle zu zwangsbedingten lokalen Abweichungen der Fasern kommt. In Analogie dazu wird bei Vollholz oder Holzbauprodukten der Beginn der Ausbildungen der Scherebene oft an Ästen beobachtet; siehe Abbildung 2-2.



Abbildung 2-2: *Ausbildung einer Scherebene beginnend bei Ast, adaptiert aus [12]*

Des Weiteren ergeben Versuche unterschiedliche Versagensmuster (siehe Abbildung 2-3), wobei die am meisten auftretenden die Keilspaltung, das Abscheren und die Kombination aus beiden sind. [13]

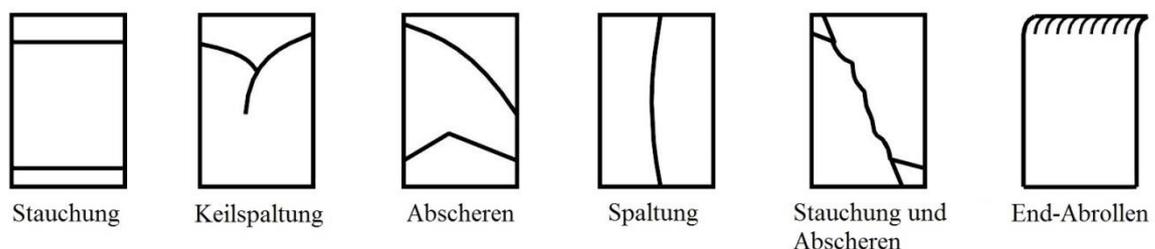


Abbildung 2-3: *Versagsmuster, adaptiert aus [13]*

Sollte es eine Abweichung der Druckkraft von der Faserrichtung geben, so kommt es bei einem Winkel von 20 - 45° zu einem Schubversagen an der sogenannten „Winter-Oberfläche“, der Grenze zwischen dem Spätholz des vorhergehenden und dem Frühholz des nächsten Jahrrings. Dies ist durch den Dichtesprung zwischen dem Früh- und Spätholz erklärt. [14]

Abschließend wird noch darauf hingewiesen, dass die meisten auf Druck belasteten Bauteile deutlich schlanker sind als Proben welche üblicherweise zur Bestimmung von Druckkenngrößen parallel zur Faser herangezogen werden. Dadurch sind diese Bauteile weitaus anfälliger für ein Stabilitätsversagen, was im Fall von z.B. Knicken mit deutlich differenten Versagensmechanismen und -mustern in Verbindung steht. [10]

2-1.4 EINFLUSSPARAMETER HOLZFEUCHTE

Die Druckfestigkeit von Holz weist im Vergleich zu vielen anderen Festigkeitskenngrößen eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit auf. Daher sollte bei Druckprüfungen besonderes Augenmerk auf die Holzfeuchte gelegt werden. Dabei ist der Bereich von 6 - 20 % Holzfeuchte für die Praxis am relevantesten. Dieser wird auch durch die Nutzungsklassen (NK) 1 und 2 nach Eurocode 5 [6] abgedeckt. In diesem Bereich kann i.Allg. auch von einer linearen Beziehung zwischen den Kenngrößen und der Holzfeuchte ausgegangen werden. Bei rd. 25 - 30 % Holzfeuchte spricht man vom Bereich der Fasersättigung. Das bedeutet, dass in den Zelllumen noch kein bzw. nur unwesentlich freies Wasser vorhanden ist, während die Zellwände mit gebundenem Wasser gesättigt sind (siehe Abbildung 2-4). Dieser Grenzbereich, sowie Holzfeuchten darüber hinaus, werden im Eurocode 5 [6] durch die NK 3 abgedeckt. Je nach Nutzungsklasse kommt es lt. Eurocode 5 [6] zu festgelegten Abminderungen der Festigkeit aufgrund der Holzfeuchte. Diese Abminderungen sind im Eurocode 5 gemeinsam mit Langzeiteinflüssen über den k_{mod} -Faktor geregelt, welcher allerdings für NK 1 und 2, wie bereits erwähnt, idente Werte aufweist. Die Reduktion der Druckfestigkeit mit zunehmender Holzfeuchte ist dabei von der Dichte unbeeinflusst. [15]

Neben einer Abminderung der Druckfestigkeit mit zunehmender Holzfeuchte ändert sich auch das Versagensverhalten. Kraft-Weg-Diagramme von Prüfkörpern mit geringen Holzfeuchten zeigen deutlich weniger Duktilität im Versagensverhalten, sowohl vor als auch nach Erreichen der Maximallast, als jene mit höheren Holzfeuchten. Duktileres Versagensverhalten ermöglicht allgemein und im Gegensatz zu sprödem Versagen Lastumlagerungen im Sinne des Ausgleiches lokaler Potentiale, wodurch ein in Summe gutmütiges Tragverhalten und eine höhere Zuverlässigkeit von Tragsystemen resultieren. [16]

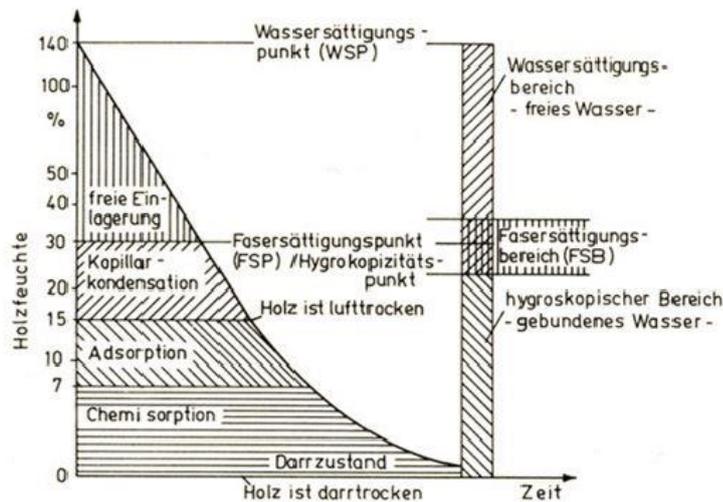


Abbildung 2-4: Feuchtegehalt von Holz, adaptiert aus [17]

Da der Einfluss der Holzfeuchte maßgeblich ist, ist es für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse notwendig, die ermittelten Kenngrößen auf eine sogenannte Referenzholzfeuchte zu beziehen. Diese ist, bezogen auf ein Referenzklima von üblicherweise 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit, üblicherweise im Bereich von $u_{ref} \cong 12\%$. Entsprechende Formeln für die Umrechnung der Druckfestigkeit und des Druck-E-Moduls in Faserrichtung sowie der Rohdichte sind u.a. in der ÖNORM EN 384 [18] angegeben und lauten wie folgt:

$$f_{c,0,ref} = f_{c,0,u} \left(1 + 0,03 (u - u_{ref}) \right) \quad (2.5)$$

$$E_{c,0,ref} = E_{c,0,u} \left(1 + 0,01 (u - u_{ref}) \right) \quad (2.6)$$

$$\rho_{ref} = \rho_u \left(1 - 0,005 (u - u_{ref}) \right) \quad (2.7)$$

Dabei sind:

- u Holzfeuchte (zwischen 8 % und 18 %) [%]
- u_{ref} Bezugsholzfeuchte von 12 % [%]
- $f_{c,0}$ Druckfestigkeit in Faserrichtung [N/mm²]
- $E_{c,0}$ Druck-Elastizitätsmodul in Faserrichtung [N/mm²]
- ρ Rohdichte [kg/m³]

Die in der ÖNORM EN 384 [18] angegebenen Umrechnungen werden im Folgenden noch mit weiteren Studien verglichen. Dazu wird u.a. ein Forschungsbericht von Gerhards [19] herangezogen, in welchem dieser die Einflüsse der Holzfeuchte auf die Holzkenngößen untersucht und dazu einige Studien zusammenfasst. Vergleicht man die relative Druckfestigkeit, also die Druckfestigkeit gegeben eine bestimmte Holzfeuchte bezogen auf jene bei Referenzholzfeuchte, gemäß ÖNORM EN 384 [18] mit den sechs Studien aus dem Forschungsbericht ergeben sich vor allem bei einer Holzfeuchte ab 25 % größere Abweichungen (siehe Abbildung 2-5). Der Bereich über 25 % ist für die Baupraxis aber nur von geringer Relevanz und darüber hinaus bezieht sich die in der Norm angegebene Formel (2.5) auf einen Bereich mit

einer Holzfeuchte von 8 - 18 %. Generell ist zu erkennen, dass die Steigung der Funktion welche sich durch die Korrektur gemäß ÖNORM EN 384 [18] ergibt deutlich flacher ist als durch die Ergebnisse der Studien intendiert, auch wenn diese im genannten Gültigkeitsbereich von 8 - 18 % innerhalb der Bandbreite der Studien aus dem Forschungsbericht verläuft.

Báder und Németh [16] empfehlen in ihrer Studie aus 2019 eine Abminderung der Druckfestigkeit in Faserrichtung von 3,2 % pro 1 % Zunahme der Holzfeuchte was weitestgehend den 3 % Abminderung nach der ÖNORM EN 384 [18] entspricht.

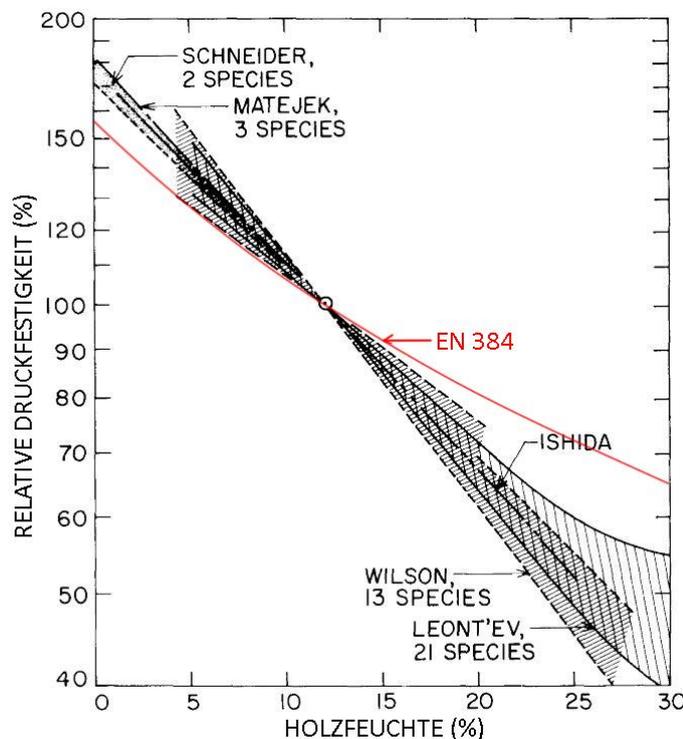


Abbildung 2-5: Druckfestigkeit in Faserrichtung in Abhängigkeit der Holzfeuchte; adaptiert aus [19] und verglichen mit ÖNORM EN 384 [18]

Zudem kann auf Basis von vier Studien aus dem Forschungsbericht von Gerhards [19] auch die Adaptierung des Druck-E-Moduls längs zur Faser bewertet werden. Auch hier zeigt sich, dass die Regelungen gemäß ÖNORM EN 384 [18] zu einer geringeren Korrektur führen als durch die Ergebnisse in diesen Studien angezeigt. (siehe Abbildung 2-6).

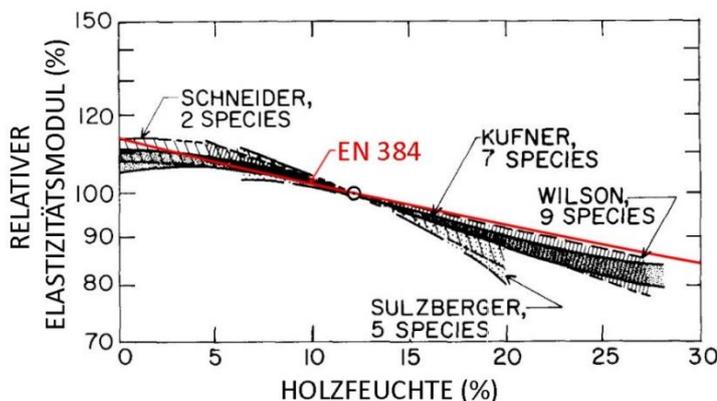


Abbildung 2-6: Druck-Elastizitätsmodul in Faserrichtung in Abhängigkeit der Holzfeuchte, adaptiert aus [19] und verglichen mit ÖNORM EN 384 [18]

2-2 WEITERE EINFLUSSPARAMETER SOWIE ERGÄNZENDES BETREFFEND SCHNITTHOLZ

Die Verwendung von Schnittholz ergibt sich zwangsweise, durch die in der Baupraxis üblichen Dimensionen der Tragelemente bzw. ihrer Komponenten, die nicht mehr aus merkmalsfreien Kleinproben sinngemäß herstellbar sind. Schnittholz / Vollholz bzw. vollholzbasierte stab- und flächenförmige Holzbauprodukte weisen im Gegensatz zu merkmalsfreien Kleinproben auch Äste, im Sinne von lokalen, sowie globale Faserneigungen und weitere Wuchsmerkmale auf, welche durch das natürliche Wachstum des Baumes bedingt sind.

2-2.1 EINFLUSS DURCH ÄSTE (LOKALE SCHRÄGFASER)

Durch die Äste im Holz kommt es lokal zu starken Faserabweichungen. Diese können, je nach Lage des Astes, zu lokalen Exzentrizitäten in der Struktur führen und zudem zu einem vorzeitigen lokalen Ausknicken der Fasern bei Druckbeanspruchung längs in Richtung der Stammachse, was in Folge einen Abfall der Druckfestigkeit parallel zur Faser zur Folge haben kann.

Im Vergleich zur Druckfestigkeit längs zur Faser bzw. Stammachse ist der Einfluss von Ästen auf die Zugkenngrößen deutlich ausgeprägter. Dabei kann die Reduktion der Festigkeit höher als der reine, auf den Querschnitt projizierte flächenmäßige Astanteil, sein. Dies ist aufgrund von Spannungskonzentrationen, und je nach Lage des Astes durch Kraftexzentrizitäten, erklärt. [20]

2-2.2 LASTAUSBREITUNG BEI DRUCK PARALLEL ZUR FASER

Die Lastausbreitung und der damit einhergehende Lastausbreitungswinkel wird im Nachweiskonzept nach Eurocode 5 [6] sowohl bei (i) lokalen Querschnittsnachweisen als auch bei (ii) globalen Stabilitätsnachweisen benötigt. Betreffend Druck quer zur Faser gibt es im Gegensatz zum Druck längs zur Faser eine Vielzahl an Untersuchungen hinsichtlich der Lastausbreitung. Beim Querdruck kommt es dabei lokal zu einer Aktivierung angrenzender Bereiche, welche in Folge an der Lastabtragung mitwirken und somit es Erlauben bei Teilflächenbeanspruchungen die Bemessungslast überproportional zur Lasteinleitungsfläche zu erhöhen. Eine der Motivatoren für die nachfolgenden Untersuchungen ist die Analyse einer möglichen Aktivierung angrenzender Zonen auch bei auf Längsdruck über Teilflächen beanspruchten Bauteilen, welche in Folge, in Analogie zum Querdruck, im Zuge des Querschnittsnachweises Berücksichtigung finden könnte. Um dies zu verdeutlichen, wird der Querdrucknachweis, wie gegenwärtig im Eurocode 5 [6] geregelt, kurz dargelegt. Dieser ist wie folgt zu führen:

$$F_{c,90,d} \leq f_{c,90} \cdot k_{c,90} \cdot A_{netto} \quad (2.8)$$

Dabei sind:

- $F_{c,90,d}$ Bemessungswert der Druckkraft normal zur Faserrichtung [N]
- $f_{c,90}$ Druckfestigkeit normal zur Faserrichtung [N/mm²]
- $k_{c,90}$ Beiwert zur Berücksichtigung der Lastabtragung über angrenzende Bereiche [-]
- A_{netto} Lasteinleitungsfläche [mm²]

In Analogie zu (2.8) würde sich für den Druck längs zur Faser folgendes Konzept ergeben:

$$F_{c,0,d} \leq f_{c,0} \cdot k_{c,0} \cdot A_{netto} \quad (2.9)$$

Dabei sind:

- $F_{c,0,d}$ Bemessungswert der Druckkraft in Faserrichtung [N]
- $f_{c,0}$ Druckfestigkeit in Faserrichtung [N/mm²]
- $k_{c,0}$ Beiwert zur Berücksichtigung der Lastabtragung angrenzender Bereiche [-]
- A_{netto} Lasteinleitungs- bzw. Querschnittsfläche [mm²]

Die Bezifferung des Beiwertes $k_{c,0}$ ist ein Teil dieser Arbeit.

Die für auf Längsdruck beanspruchten Bauteile zumeist relevanten Stabilitäts- bzw. Bauteilnachweise sind in Knick- sowie Kippnachweise (sog. Biegedrillknicken) zu unterscheiden. Entsprechende Nachweiskonzepte dafür werden im Eurocode 5 [6] derzeit nach dem Ersatzstabverfahren geregelt. Für den Knicknachweis stellt sich dieser sinngemäß wie folgt dar:

$$\frac{F_{c,0,d}}{A} \leq f_{c,0} \cdot k_{c,y(z)} \quad (2.10)$$

Dabei sind:

$F_{c,0,d}$ Bemessungswert der Druckkraft in Faserrichtung [N]

$f_{c,0}$ Druckfestigkeit in Faserrichtung [N/mm²]

$k_{c,y(z)}$ Knickbeiwert [-]

A Querschnittsfläche [mm²]

Für die Stabilitäts- bzw. Bauteilnachweise, wie jenem nach Gl.(2.10), sind hinsichtlich der Lastausbreitung mehrere Fragen zu klären: (i) zum Einen würde die Aktivierung angrenzender Bereiche bei Teilflächenbelastung den Widerstand erhöhen; (ii) auch ohne Aktivierung benachbarter Zonen und folglich Steigerung des Widerstandes führt eine Lastausbreitung in benachbarte Zonen, im Sinne einer Verteilung der einwirkenden Lasten, zur Reduktion der maximalen Längsdruckspannungen mit zunehmendem Abstand von der Lasteinleitungsstelle. Dies, zusammen mit (iii) einer daraus ebenfalls sich ergebenden effektiven Breite \geq Lasteinleitungsbreite erhöht den für den Stabilitätsnachweis ansetzbaren Querschnittsbereich womit eine Reduktion der an der jeweiligen Querschnittshöhe anzusetzenden Druckspannung einhergeht.

Zum Thema Lastausbreitungswinkel in Holz bei Beanspruchung auf Druck längs zur Faser zeigte sich im Rahmen der Literaturrecherche, dass es dazu nur sehr wenig Untersuchungen gibt. Bernasconi [21] widmete diesem Thema einen kurzen Abschnitt seiner Dissertation. Im Zuge von Untersuchungen für Armierungen von Holz erstellt er dabei ein Finite Elemente (FE) Modell. Dieses Modell betrachtet eine orthotrope Scheibe unter rein elastischem Materialverhalten. Diese Scheibe wird lokal an der Oberseite mittig durch eine Einzellast beaufschlagt und in Folge die Verteilung der Druckspannung in Faserrichtung über die Höhe der Scheibe analysiert. Die Spannungsverteilung selbst wird im Weiteren über die Maximalspannung in gegebener Scheibenhöhe zusammen mit einer mitwirkenden Breite b_e , errechnet aus der Flächenäquivalenz zwischen der numerischen und einer als konstant angenommenen Spannungsverteilung, betrachtet. In Folge kann für die jeweilige Tiefe t im Schnitt A-A der Lastausbreitungswinkel aus dem Verhältnis von b_e / t bestimmt werden; siehe Abbildung 2-7.

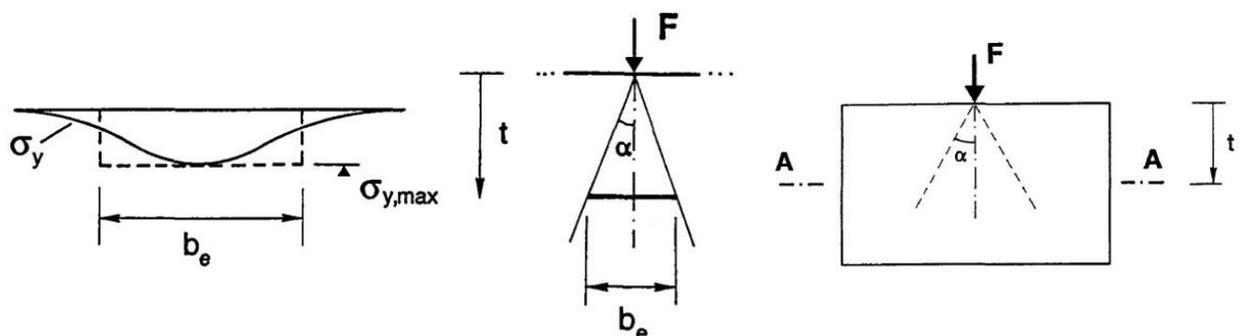


Abbildung 2-7: links: mitwirkende Breite b_e ; mitte: Verhältnis b_e / t ; rechts: Tiefe bei Schnitt A-A; aus [21], adaptiert

In den Untersuchungen von Bernasconi [21] zeigt sich, dass der Lastausbreitungswinkel α unabhängig von der Tiefe t ist. Längs zur Faser ergibt sich ein Winkel von 15° , wohingegen die Lastausbreitung quer zur Faser, welche ebenfalls anhand numerischer Berechnungen analysiert wurde, einen Winkel von 60° einnimmt; siehe Abbildung 2-8. Als Grund für die doch deutlich unterschiedlichen

Lastausbreitungswinkel bei Druckbeanspruchung längs und quer zur Faser werden die deutlich unterschiedlichen Steifigkeiten längs und quer zur Faser genannt. Die hohe Steifigkeit in Faserrichtung zieht demnach deutlich mehr Last an und es kommt zu einem geringen Lastausbreitungswinkel als quer zur Faser. Ergänzend dazu ist anzumerken, dass die strenge Faserorientierung von Holz in Längsrichtung strukturbedingt einen Einfluss auf den Lastausbreitungswinkel erwarten lässt.

Bei den Untersuchungen von Bernasconi [21] werden keine Angaben gemacht, ob der Lastausbreitungswinkel für Stabilitäts- und / oder Querschnittsnachweise zur Anwendung kommen soll. Da die Arbeit lokal eingeklebte Stahlstangen als Armierungen behandelt ist jedoch anzunehmen, dass auch der Lastausbreitungswinkel im Zuge dessen für lokale Nachweise dienen soll.

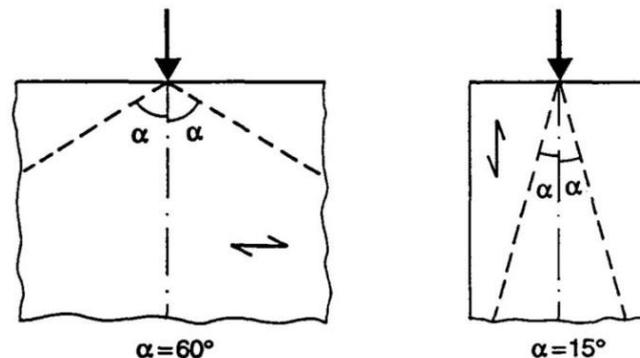


Abbildung 2-8: Lastausbreitung in und quer zur Faserrichtung; aus [21], adaptiert

Eine weitere Arbeit welche Hinweise zur Lastausbreitung lokal und in Faserrichtung auf Druck beanspruchte Holzbauprodukte liefert, ist jene von Bogensperger und Augustin [22]. In dieser wurde die lokale Lasteinleitung in Wandscheiben aus Brettsperrholz (BSP), welche in Folge der Material- und Produktstruktur als orthotrop betrachtet wurde, analytisch und numerisch untersucht. Die Motivation dabei war die Lastausbreitung für Stabilitätsprobleme, vordergründig Knicken, bei lokal beanspruchten Wandscheiben zu bestimmen. Eingangs und als Basis für die Modellerweiterung wurde die lokale Lasteinleitung in eine isotrope Halbscheibe betrachtet. Es zeigte sich dabei, dass sich bei der isotropen Halbscheibe im Grenzübergang der Tiefe gegen Unendlich, ein Lastausbreitungswinkel von $\alpha = 38^\circ$ einstellt. Weiteres wurden numerische Lösungen der Spannungsverläufe basierend auf effektive Breiten für orthotrope Scheiben unterschiedlicher endlicher Höhen mit unterschiedlichen Lasteinleitungsweiten betrachtet, wodurch die qualitative aber auch quantitative Form der Lastausbreitung in BSP ersichtlich wird. [22]

Auch Gräfe et al. [23] untersuchten den Lastausbreitungswinkel in BSP im Zuge eines Forschungsvorhabens zum Vorspannen von Brettsperrholzkonstruktionen. Die Motivation zur Untersuchung des Lastausbreitungswinkels war dabei die Bestimmung des Stabilitätsverhaltens von BSP-Scheiben bei teilflächiger Lasteinleitung. Der Lastausbreitungswinkel wurde über die Höhe als konstant angenommen. Im Unterschied zu Bernasconi [21], wurde jedoch von Gräfe et al. [23] keine konstante Spannung angenommen um eine effektive Breite zu bestimmen. Stattdessen wurden zur Bestimmung der effektiven Breite die Ränder der realen Spannungsverteilung nach Westermayr [24] durch Abtrennung von jeweils 5 % des Flächenintegrals (und somit von der tatsächlichen Kraft) eingeschränkt, da ansonsten sich unrealistisch breite Verteilungen ergeben würden da diese asymptotisch auslaufen; siehe Abbildung 2-9. Es wurden BSP-Elemente mit unterschiedlichem Querlagenanteil numerisch mittels FE-Studie untersucht und anschließend experimentell mit den Ergebnissen aus Prüfungen an BSP-Wandelementen, beaufschlagt mit lokaler Lasteinleitung, verglichen. Die FE-Studie ergab dabei einen Lastausbreitungswinkel zwischen 21° , bei einem Querlagenanteil von 10 %, und 28° , bei einem Querlagenanteil von 50 %. Anhand der Prüfdaten, ermittelt an Proben mit Querlagenanteilen zwischen 25 und 40 %, wurde ein Lastausbreitungswinkel von $21,9^\circ$ bis $23,2^\circ$ ermittelt. [23]

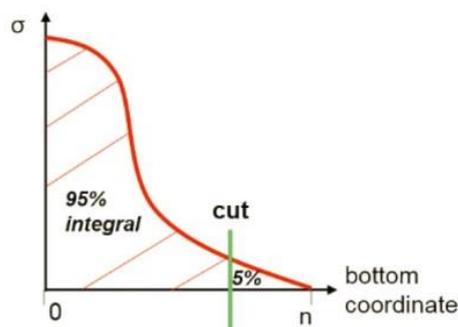


Abbildung 2-9: Ansatz zur Berechnung des Lastausbreitungswinkels in den Untersuchungen von Gräfe et al. [23]; aus [24] adaptiert

Darüber hinaus gehende Untersuchungen zum Lastausbreitungswinkel von auf Längsdruck beanspruchtem Vollholz bzw. von brettbasierten Produkten sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht bekannt.

2-3 BRETTBASIERTE HOLZBAUPRODUKTE SOWIE GRÖSSEN- UND SYSTEMEFFEKTE

Im Folgenden werden die Grundlagen der beiden Holzbauprodukte Brettschichtholz und Brettsperrholz kurz erläutert. Dies dient dem besseren Verständnis für diese Holzbauprodukte im weiteren Verlauf der Arbeit, bzw. dem Zweck einer klaren Definition dieser Holzbauprodukte.

2-3.1 BRETTSCHICHTHOLZ

Bei Brettschichtholz (BSH) handelt es sich um einen Verbundwerkstoff bei dem i.d.R. keilgezinkte Brettware parallel zur Faser flächig miteinander verklebt wird. Das fertige Produkt muss dabei der ÖNORM EN 14080 [25] entsprechen. Man unterscheidet bei BSH zwischen vertikal und horizontal laminiert und zwischen einem homogenen und inhomogenen Aufbau. Für den homogenen Aufbau wird nur Brettware der gleichen Festigkeitsklasse verwendet, im Gegensatz dazu kommen für den inhomogenen Aufbau unterschiedliche Festigkeitsklassen innerhalb des Querschnittes zur Anwendung. Weiters kann der inhomogene Aufbau in einen symmetrischen und asymmetrischen (nicht zulässig gemäß EN 14080 [25]) unterschieden werden (siehe Abbildung 2-10).

Wesentliche Ausgangsfaktoren für BSH sind die Brettware, das Leistungspotential der Endverbindung, i.d.R. der Keilzinkung nach ÖNORM EN 15497 [26], und die Flächenverklebung. Dabei muss die Brettware festigkeitssortiert sein, eine Dicke von ≤ 40 (45) mm und eine Breite von ≥ 80 mm aufweisen. Die Endverbindung ist notwendig um sogenannte „Endloslamellen“ produzieren zu können. Bezüglich der Flächenverklebung und für die Keilzinkung sind für den dauerhaft tragenden Einsatz zugelassene und anerkannte Klebstoffe gemäß ÖNORM EN 301 [27] zu verwenden und entsprechend den Angaben des technischen Merkblattes und des Sicherheitsdatenblatts, mit Regelungen u.a. betreffend die erforderliche Klebstoffauftragsmenge sowie zum Pressdruck und Klima, einzusetzen. [17]

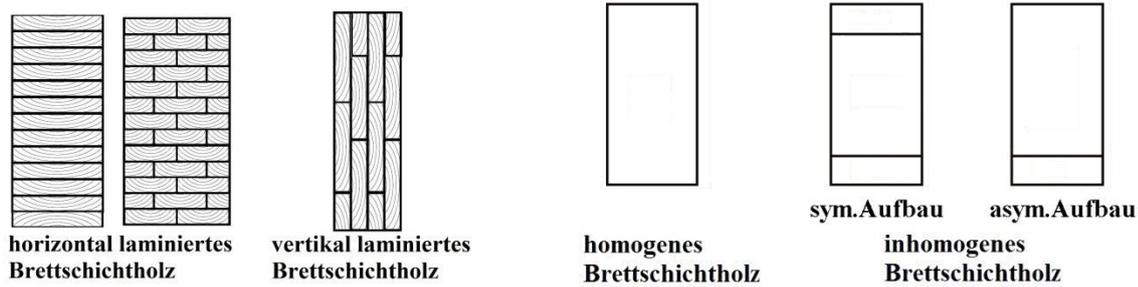


Abbildung 2-10: Aufbau Brettschichtholz, adaptiert aus [17]

Baupraktische Anwendungen in denen bei BSH Druckkräfte längs zur Faser auftreten sind z.B. Stützen, die Ausbildung eines Fachwerks oder auch ein herkömmlicher Biegeträger (Druckzone). Im Gegensatz zu Vollholz weist BSH durch Homogenisierungseffekte im Sinne von Systemeffekten ein höheres Leistungspotential und damit eine größere Anwendungsbandbreite auf.

Die Festigkeitsklassen mit ihren zugehörigen Druckfestigkeiten längs zur Faser nach EN 1194 [28] sind in Tabelle 2-3 angeführt.

Tabelle 2-3: Festigkeitsklassen mit zugehörigen Druckfestigkeiten längs zur Faser nach EN 1194 [28]

Festigkeitsklasse	GL24c	GL24h	GL28c	GL28h	GL32c	GL32h	GL36c	GK36h
$f_{c,0,k}$ [N/mm ²]	21	24	24	26,5	26,5	29	29	31

2-3.2 BRETTSPERRHOLZ

Als Brettsperrholz (BSP) werden mehrschichtig verklebte, flächenhafte Holzbauprodukte bezeichnet, bei denen die Faserlängsrichtung der einzelnen Schichten rechtwinklig zueinander ist. Die einzelnen Schichten bestehen aus Lamellen welche wiederum aus keilverzinkten Brettern gefertigt wurden. Der Aufbau von BSP ist zur Mittelebene symmetrisch hinsichtlich Orientierung, Dicke und Festigkeitsklasse der einzelnen Schichten. Je nach Anforderung können diese Eigenschaften variiert werden. Brettsperrholzplatten sind mit Dicken von 42 - 500 mm und bis zu einer Breite von 3 m bzw. einer Länge von 16,5 m und mehr herstellbar (siehe Abbildung 2-11). Damit stellt BSP ein Holzprodukt dar, welches geschosshohe Elemente ermöglicht und für den Massivholzbau bestens geeignet ist. Es ist in der Lage Lasten sowohl in Scheiben- als auch in Plattenebene abzutragen.

Brettsperrholzplatte

Kombination von längs- und querorientierten Einschichtplatten

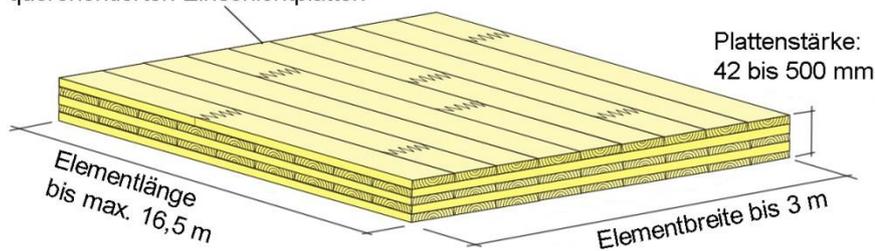


Abbildung 2-11: Aufbau von BSP anhand einer fünf-schichtigen Platte; adaptiert aus [17]

Das Ausgangsmaterial für BSP sind sägeraue Bretter, welche vorwiegend, so die ursprüngliche Idee, aus Stammandzonen eingeschnitten werden (Seitenware, siehe Abbildung 2-12 links). Diese haben eine Dicke zwischen 10 - 35 mm bei einer Breite von 80 - 240 mm und ein Verhältnis der Breite zur Dicke von zumeist $\geq 4 : 1$ (siehe Abbildung 2-12 rechts). Die Bretter werden durch Keilzinkung gemäß

ÖNORM EN 15497 [26] zu Lamellen verbunden. Diese Lamellen werden, je nach Produktionsprozess, direkt zu BSP, oder, in einem Zwischenschritt, zuerst zu Einschichtplatten und erst danach zu BSP verklebt. Eine Fugenvermeidung durch Seitenverklebung ist dabei anzustreben und wird für höhere Anforderungen empfohlen. Generell gilt bei allen Verklebungen, außer der gegenwärtig i.d.R. gegebenen nichttragenden Schmalseitenverklebung, einen Klebstoff für tragende Bauteile gemäß ÖNORM EN 301 [27] zu verwenden. [17]

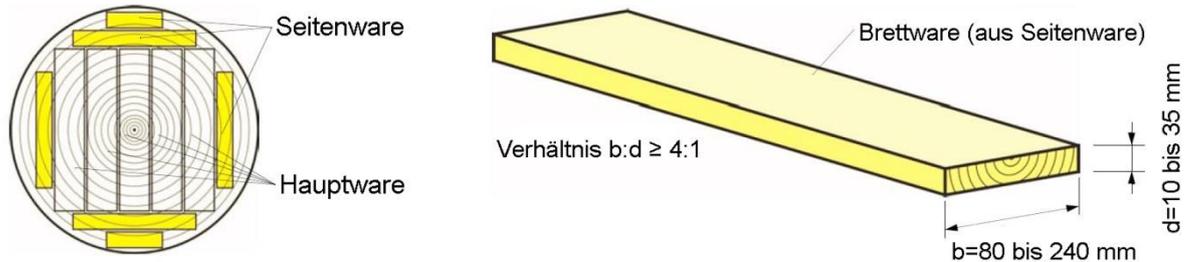


Abbildung 2-12: links: Bretter aus Stammrandzone; rechts: Brettware als Ausgangsmaterial für BSP, jeweils adaptiert aus [17]

Baupraktische Anwendungen in denen bei BSP in den Hauptlagen Druckkräfte längs zur Faser auftreten sind vor allem Wandscheiben. Werden BSP-Elemente in horizontaler Ebene und haben eine aussteifende Wirkung erfahren sie auch in dieser Anwendung Druckkräfte längs zur Faser. Da BSP meist flächenartig zum Einsatz kommt unterscheidet es sich in ihren Anwendungsfällen grundlegend von Vollholz oder BSP, welche stabförmige Anwendung finden.

2-3.3 SYSTEM- UND GRÖSSENEFFEKTE

Diese Effekte werden an dieser Stelle kurz erläutert und dienen als Hintergrundwissen für die Diskussion in Abschnitt 0.

2-3.3.1 Allgemeines

Vollholzbasierte Holzbauprodukte wie BSH und BSP weisen gegenüber dem Grundmaterial i.d.R. höhere charakteristische Kenngrößen auf. Dies ist i.d.R. auf sogenannte Homogenisierungseffekte im Sinne von Systemeffekten zurückzuführen. Diese Systemeffekte lassen sich grundsätzlich in zwei Arten unterscheiden: Zum einen in parallele und zum anderen in serielle Systemeffekte, welche jeweils aus dem parallelem bzw. seriellen Systemverhalten. Letztere werden in der Regel als Größen- bzw. Volumeneffekte berücksichtigt, Erstere zumeist schlicht über Systembeiwerte geregelt. Das Zusammenwirken von Vollholz bzw. Lamellen in den zuvor genannten Holzbauprodukten BSH und BSP lässt sich als das Zusammenspiel beider Arten von Systemeffekten, im Sinne von seriellen, sub-parallelen Systemen beschreiben.

2-3.3.2 Parallele Systeme – Systemeffekte

Bei parallelen Systemen steigt die Zuverlässigkeit mit (i) zunehmender Anzahl paralleler Elemente, (iii) der Duktilität, also dem Lastumverteilungspotential, (iii) der Dimensionalität und (iv) dem globalen Lastverteilungsmechanismus. [29]

Parallele Systemeffekte sind auf zwei Effekte zurückzuführen: Zum einen auf den Effekt der Lastumverteilung, welcher dem mechanischen Anteil des Systemeffekts entspricht und eine Lastumverteilung auf andere Elemente nach einem Teilversagen ermöglicht. Zum anderen auf den Effekt der Variabilität, welcher dem stochastischen Anteil des Systemeffekts entspricht und durch räumliche Variabilität und Korrelation einen Homogenisierungseffekt, im Sinne eines Ausgleichs lokaler Potentiale, hervorruft. [29]

Am Beispiel eines BSH-Biegeträgers wäre der mechanische Anteil die Lastumverteilung bei einer lokalen Störzone einer Lamelle an die benachbarte(n) Lamelle(n). Der stochastische Anteil wäre dadurch zu beschreiben, dass die Wahrscheinlichkeit, dass die Lamelle mit der geringsten Festigkeit in der an der stärksten beanspruchten Randzone liegt, äußerst gering ist. [29]

Im Eurocode 5 [6] wird der Systemeffekt durch den Faktor k_{sys} in Form eines bi-linearen Modells geregelt und wirkt dabei erhöhend auf die Festigkeit, ist aber mit einem maximalen Wert von 1,2 begrenzt ($1 \leq k_{sys} \leq 1,2$).

$$k_{sys} = \frac{f_{N,05}}{f_{1,05}} \quad (2.11)$$

Dabei sind:

k_{sys}Systembeiwert k_{sys} [-]

$f_{N,05}$charakteristische Festigkeit bei N parallelen Elementen [N/mm²]

$f_{1,05}$ charakteristische Festigkeit bei einem Element [N/mm²]

2-3.3.3 Serielle Systeme – Größeneffekte

Serielle Systemeffekte im Sinne von Größen- bzw. Volumeneffekten werden häufig im Sinne einer Erweiterung des Sprödbruchmodells nach Weibull beschrieben bzw. mit diesem in Beziehung gebracht. Nach diesem Modell kommt es in Analogie zu einer Kette zu einem Versagen durch das schwächste Glied und folglich zu einer Reduktion der Tragfähigkeit einer Kette mit zunehmender Anzahl an Kettengliedern. In quasi-spröd versagenden, hierarchisch aufgebauten Materialien, wie z.B. Holz, treten ebenfalls serielle System- bzw. Größeneffekte auf, welche aber nur bedingt den Gesetzen des Sprödbruchmodells, einem Modell für ideal spröd-versagende Materialien, folgen. Sie sind, im Gegensatz zu ideal-spröden Materialien, auch an Referenzabmessungen, im Sinne von repräsentativen Größen der jeweiligen hierarchischen Materialebene, wie etwa den Dimensionen von für diese Ebene typischen Strukturstörungen, z.B. Äste im Holz auf der Makro-Ebene, gebunden. [29]

Je nach Verhältnis des jeweils betrachteten Volumens zum Referenzvolumen können Größeneffekte die Festigkeit abmindern oder erhöhen. Im Eurocode 5 [6] werden Größeneffekte in Abhängigkeit der jeweiligen Dimension, z.B. als Höhenbeiwert k_h , als Längen- oder Volumenbeiwert k_l oder k_{vol} , geregelt.

2-3.3.4 Serielle, sub-parallele Systeme

Bei den Holzbauprodukten BSH und BSP werden als Grundmaterial Bretter verwendet, welche mittels Keilzinkung zu Lamellen verbunden werden. Im Falle dieser Lamellen handelt es sich bei Beanspruchung in Faserrichtung um ein serielles System. Durch die nachfolgende flächige Verklebung der Lamellen zu BSH bzw. BSP wird das serielle System zu sub-parallelen Systemen erweitert. [29]

2-4 MATHEMATISCHE MODELLE ZUR BESCHREIBUNG DES ARBEITSVERHALTENS

Die nachfolgend dargelegten mathematischen Modelle dienen im weiteren Verlauf der Arbeit als Basis zur Definition eines Modells zur Beschreibung des Arbeitsverhaltens von auf Längsdruck beanspruchten Brett- sowie BSH- und BSP-Abschnitten. Als weitem Ausblick dient vor allem das später für Brettabschnitte definierte Modell einschließlich seiner stochastischen Parameter als Grundlage für den Aufbau eines stochastisch-mechanischen Modells zur Beschreibung von brettbasierten Holzbauprodukten wie BSH und BSP im Falle einer Druckbeanspruchung längs zur Faser. Dazu werden die beiden mathematischen Modelle später in Abschnitt 3-4.8 analysiert und auf ihre Anwendbarkeit überprüft.

2-4.1 MODELL NACH GLOS

Glos [30] veröffentlichte 1978 ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Spannungs-Dehnungsbeziehung von Brettschichtholz unter Druckbeanspruchung längs zur Faser. Dieses folgt einem rational gebrochenem Polynomansatz mit vier Koeffizienten, wobei die Funktion selbst unter Annahme eines „steady-state“ Grenzzustandes, dem Erreichen eines konstant-verbleibenden Entfestigungsniveaus, asymptotisch gegen diesen Grenzzustand verläuft, welcher im Bereich von 50 - 100 % der Festigkeit erwartet wird (siehe Abbildung 2-13). Die vier Koeffizienten lassen sich als vier Kenngrößen anhand der Prüfdaten von Spannungs-Dehnungsbeziehungen ermitteln, die Konstante N wird durch Kalibration des Modells an die Versuchsdaten gefunden. Dabei dient die Konstante N als Formparameter der Funktion im Bereich der Festigkeit. Für N , welches nach Glos eine ganze positive Zahl sein soll, wird, basierend auf stochastischen Untersuchungen an zufällig ausgewählten Spannungs-Dehnungsbeziehungen, der Wert $N = 7$ empfohlen. Das Modell nach Glos [30] ist in Abbildung 2-13 und in den Glg. (2.12) - (2.16) dargelegt.

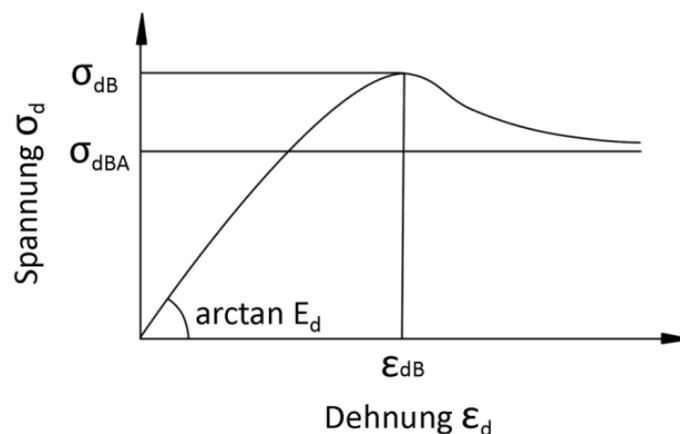


Abbildung 2-13: Modell nach Glos, adaptiert aus [30]

$$\sigma_{c,0} = \frac{\varepsilon_{c,0} + k_0 \cdot \varepsilon_{c,0}^N}{k_1 + k_2 \cdot \varepsilon_{c,0} + k_3 \cdot \varepsilon_{c,0}^N} \quad (2.12)$$

mit:

$$k_0 = \frac{f_{c,0}}{(N-1) \cdot E_{c,0} \cdot \varepsilon_{c,0,B}^N \cdot \left(1 - \frac{f_{c,0, \text{end}}}{f_{c,0}}\right)} \quad (2.13)$$

$$k_1 = \frac{1}{E_{c,0}} \quad (2.14)$$

$$k_2 = \frac{1}{f_{c,0}} - \frac{N}{N-1} \cdot \frac{1}{E_{c,0} \cdot \varepsilon_{dB}} \quad (2.15)$$

$$k_3 = \frac{1}{(N-1) \cdot E_{c,0} \cdot \varepsilon_{c,0,B}^N \cdot \left(1 - \frac{f_{c,0, \text{end}}}{f_{c,0}}\right)} \quad (2.16)$$

Dabei sind:

- $\sigma_{c,0}$ Druck-Spannung längs zur Faser [N/mm²]
- $\varepsilon_{c,0}$ Stauchung infolge Druckbeanspruchung längs zur Faser [-]
- $\varepsilon_{c,0,B}$ der Festigkeit zugeordnete Stauchung [-]
- $E_{c,0}$ Druck-Elastizitätsmodul in Faserrichtung [N/mm²]
- $f_{c,0}$ Druckfestigkeit in Faserrichtung [N/mm²]
- $f_{c,0, \text{end}}$ asymptotische Endfestigkeit [N/mm²]
- N Glos-Konstante [-]

2-4.2 ADAPTIERTES GLOS MODELL

Für Untersuchungen des Ausziehverhaltens von selbstbohrenden Holzbauschrauben wurde 2015 das Glos Modell von Brandner et al. [31] zur Beschreibung von Arbeitslinien herangezogen und entsprechend adaptiert. Dabei wurde vereinfachend der asymptotische Endwiderstand auf Null gesetzt. Des Weiteren wurde eine horizontale Verschiebung, begründet durch verzögerte Verfestigung am Beginn der Belastung, hinzugefügt. Zuletzt wurde noch ein linearer Anteil (Δw_{lin}) zwischen w_{ini} und w_{lin} eingeführt. Dadurch wurde das Modell nach Glos [30] auf drei Koeffizienten reduziert.; siehe Abbildung 2-14 und Glg. (2.17) - (2.21).

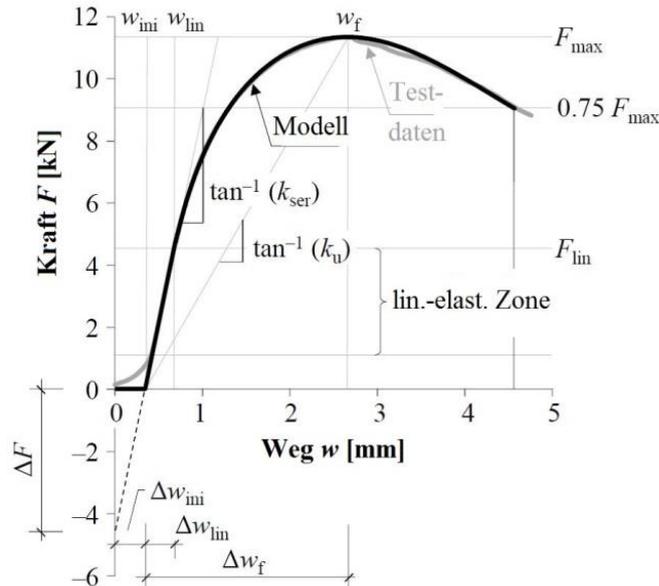


Abbildung 2-14: Adaptiertes Glos Modell, adaptiert aus [31]

$$F(w) = \begin{cases} 0 & \text{für } w \leq w_{ini} \\ k_{ser} \cdot w + \Delta F & \text{für } w_{ini} \leq w \leq w_{lin} \\ \frac{w_x}{k_1 + k_2 \cdot w_x + k_3 \cdot w_x^c} + (k_{ser} \cdot w_{lin} + \Delta F) & \text{für } w \geq w_{lin} \end{cases} \quad (2.17)$$

mit:

$$w_x = w - w_{lin} \text{ und } \Delta F = -k_{ser} \cdot w_{ini} \quad (2.18)$$

und den Koeffizienten:

$$k_1 = \frac{1}{k_{ser}} \quad (2.19)$$

$$k_2 = \frac{1}{F_{max} - (k_{ser} \cdot w_{lin} + \Delta F)} - \frac{c}{(c-1) \cdot k_{ser} \cdot (w_f - w_{lin})} \quad (2.20)$$

$$k_3 = \frac{1}{(c-1) \cdot k_{ser} \cdot (w_f - w_{lin})^c} \quad (2.21)$$

Dabei sind:

- F Kraft [N]
- F_{max} maximale Kraft [N]
- k_{ser} Verschiebungsmodul [N/mm]
- w Weg [mm]
- w_x Weg ab w_{lin} [mm]

- w_f Weg bei maximaler Kraft [mm]
 w_{lin} Weg am Ende des lin.-elast. Bereiches [mm]
 w_{ini} Weg durch Anfangsverschiebung [mm]
 c adaptierte Glos-Konstante [-]

2-5 OFFENE WISSENSCHAFTLICHE FRAGESTELLUNGEN

Im Verlauf der getätigten Literaturrecherche bzw. während der Durchführung der Materialprüfungen sind bezüglich des Materialverhaltens unterschiedlicher Holzbauprodukte unter Druck längs zur Faser noch einige bisher offene wissenschaftliche Fragestellungen aufgetaucht. Diese betreffen die Verformungsmessung bei Prüfdurchführung, die Analyse bestehender mathematischer Modelle und die Lastausbreitung sowie der damit einhergehende Lastausbreitungswinkel. Diese Themen werden im weiteren Verlauf der Arbeit behandelt. Im Folgenden sind die Fragestellungen aufgelistet und ausführlich dargelegt.

- (i) Die gegenwärtige Verformungsmessung während der Durchführung von Prüfungen erfolgt nach EN 408 [32] zentral und lokal an den Prüfkörpern. Um die Prüfungen zu vereinfachen bietet sich eine globale Messung der Verformung über den Maschinenweg an. Dabei werden allerdings auch Eigenverformungen der Prüfmaschine selbst aufgrund ihrer Nachgiebigkeit miteinbezogen. Die Idee ist die global bestimmten Verformungen um die Eigenverformungen der Prüfmaschine zu korrigieren. Es gilt die Machbarkeit dieser Korrektur anhand vorhandener lokaler und globaler Prüfdaten zu überprüfen.
- (ii) Ein weiterer Inhalt dieser Arbeit ist die Analyse der Anwendbarkeit bestehender, unter Abschnitt 2-4 dargelegter, mathematischer Modelle zur Beschreibung der Arbeitslinie von Vollholz und vollholzbasierter Holzbauprodukten sowie gegebenenfalls deren Adaptierung sowie folglich die Ermittlung der Modellparameter und deren Abhängigkeiten untereinander. Dies dient als Basis für ein stochastisch-mechanisches Modell zur Modellierung von Brettabschnitten und in weiterer Folge von vollholzbasierter Holzbauprodukten wie BSH und BSP beansprucht auf Druck längs zur Faser.
- (iii) Bei der Lasteinleitung parallel zur Faser, z.B. in Stützenquerschnitten, sind vollflächige Lasteinleitungen von jenen mit einer Teilflächenbelastung zu unterscheiden. Bei Letzteren kommt es im Zuge der Druckbeanspruchung zu einer Querdruk-Schubinteraktion zwischen dem Querschnittsbereich im Bereich der Lasteinleitung und der Seitenholzbereiche. Da bei derartigen Beanspruchungssituationen ein geringer Schubwiderstand zu erwarten ist, gilt es im Zuge der nachfolgenden Untersuchungen auch das Spaltverhalten von BSH in Folge einer Teilflächenlasteinleitung auf Druck längs zur Faser bei einer Holzfeuchte von 12 % zu analysieren.
- (iv) Die im folgenden durchgeführten Untersuchungen dienen auch zur Analyse der Lastausbreitung in Folge Druckbeanspruchung in Faserrichtung. Für lokale Querschnittsnachweise sind eventuell auftretende Effekte der Lastverteilung an angrenzende Bereiche in Analogie zum Querdrukdruckverhalten aufzuzeigen. Diesbezüglich soll ein möglicherweise auftretender $k_{c,0}$ Beiwert untersucht und beziffert werden. Darüber hinaus gilt es die Lastausbreitung über die Tiefe in Form eines Lastausbreitungswinkel zu ermitteln. Dabei sind die Form und Größenordnung des Lastausbreitungswinkel zu bestimmen. Dies ist für globale Stabilitätsnachweise noch abzuklären, um verlässliche Annahmen bezüglich der Größe des aktivierbaren Querschnittes in beliebiger Höhe zu ermöglichen. Entsprechende bestehende Angaben der Ansätze dazu sind abschließend zu vergleichen bzw. gegebenenfalls zu validieren.

KAPITEL 3: MATERIAL UND METHODEN

3-1 PRÜFREIHE-BRETTABSCHNITTE

Die für die Brettabschnitte zugrunde liegenden Daten stammen aus Druckprüfungen längs zur Faser an Probekörpern der Holzart Fichte (*Picea abies*) aus mitteleuropäischer Provenienz. Diese Prüfungen wurden bereits vor mehreren Jahren im Zeitraum von Juli bis August 2008 im Prüflabor Lignum Test Center (LTC) des Instituts für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz durchgeführt.

3-1.1 PRÜFKÖRPER

Die Prüfkörper lassen sich aufgrund ihrer Sortier- und zugeordneten Festigkeitsklassen in drei Hauptprüfreiheiten unterteilen (siehe Tabelle 3-1). Dafür wurden die Festigkeitsklassen nach ÖNORM EN 338 [3] und EN 14081 [33] herangezogen. Die Prüfreihe CB war der Festigkeitsklasse C24, die Prüfreihe BB C30, jeweils nach EN 338 [3], und die Prüfreihe L40 der Festigkeits- bzw. Lamellenklasse L40 nach EN 14081 [33] zugeordnet. Die Brettabschnitte wurden entsprechend sortierten und in die genannten Festigkeitsklassen klassierten ungezinkten Brettern der Länge $l = 4$ m entnommen. Da im Zuge dieser Entnahme keine weiteren Sortiermaßnahmen gesetzt wurden enthalten die Brettabschnitte all jene für die jeweilige Festigkeitsklasse typischen globalen und lokalen Wuchsmerkmale und sonstigen Eigenschaften und gelten somit als repräsentativ.

Jede Hauptprüfreihe besteht aus 30 Prüfkörpern. Dabei haben die Prüfkörper der Prüfreiheiten CB und BB eine Länge von 240 mm, eine Breite von 150 mm und eine Stärke von 40 mm. Die Prüfkörper der Prüfreihe L40 haben im Unterschied dazu eine Breite von 160 mm. Zusätzlich zu den oben beschriebenen Prüfkörpern gibt es für die Prüfreiheiten BB und L40 noch jeweils 10 weitere Prüfkörper mit einer reduzierten Länge von 120 mm. An dieser Stelle ist noch anzumerken, dass gemäß EN 408 [32] jeder Prüfkörper die sechsfache Länge seines kleineren Querschnittmaßes aufweisen muss. Diese Vorgaben werden von all jenen Prüfkörpern mit einer Länge von 240 mm erfüllt. Alle Prüfkörper mit reduzierter Länge (120 mm) verletzen die Vorgabe, da sie nur die Hälfte der geforderten Länge aufweisen.

Bevor die Prüfungen erfolgten, wurden die Prüfkörper in einer Klimakammer bei Normklima (20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte) bis zur Massekonstanz gelagert (vgl. [18]). Es wurden von jedem Prüfkörper die geometrischen Abmessungen durch Mittelwertbildung aus jeweils zwei Messungen je Dimension, durchgeführt mittels Messschieber, bestimmt. Nach erfolgter Prüfung wurden Darrproben aus den Prüfkörpern entnommen. Die Darrproben wurden gewogen und abgemessen. Anschließend wurden sie in einen Darrschrank bei 103 °C bis zur Massekonstanz getrocknet; siehe [34]. Auf Basis der dabei gewonnenen Daten kann die Holzfeuchte sowie die Rohdichte der Prüfkörper bestimmt werden.

Tabelle 3-1: Übersicht der Prüfreiheiten der Brettabschnitte

Bez.	Anzahl	Zuordnung	Sortier- klasse	Festigkeits- klasse	Last- aufbringung	L [mm]	B [mm]	H [mm]
CB_lang	30	CB	S10 ¹⁾	C24 ³⁾	weggesteuert	240	150	40
BB_lang	30	BB	S13 ¹⁾	C30 ³⁾		240	150	40
BB_kurz	10					120	150	40
L40_lang	17	L40	L40 ²⁾	L40 ²⁾		240	160	40
L40_kurz	10					120	160	40
L40_lang-KG	13				kraftgesteuert	240	160	40

Anmerkungen:

¹⁾... nach DIN 4074-1 [35]; Zuordnung Sortier- zu Festigkeitsklasse nach EN 1912 [36]

²⁾... nach ÖNORM EN 14081-4 [33]

³⁾... nach ÖNORM EN 338 [3]

3-1.2 PRÜFKONFIGURATION

Die Druckprüfungen längs zur Faser an den Brettabschnitten wurden an der Universalprüfmaschine der Marke Zwick Roell mit der internen Bezeichnung „lignum_uni_275“ durchgeführt. Zusätzlich zum globalen Maschinenweg wurden noch bei jeder Prüfung zur Bestimmung der lokalen Verformungen in Anlehnung an EN 408 [32] vier DMS-basierte Wegaufnehmer der Type DD1 (HBM) mittig der Höhe und Breite an jeder Seite der Prüfkörper angebracht (siehe Abbildung 3-1).

Die Last bzw. Druckkraft längs zur Faser wurde vollflächig und i.d.R. weggesteuert nach ÖNORM EN 408 [32] aufgebracht. Einzige Ausnahme davon bildeten dabei die Prüfkörper 02-14 der Prüfreihe L40; diese 13 Prüfungen wurden kraftgesteuert durchgeführt.

Beim Zuschnitt der Proben wurde auf planparallele Stirnflächen geachtet um eine exzentrische Lasteinleitungen weitgehend zu unterbinden. Zudem wurde bei der Prüfdurchführung eine zentrische Lasteinleitung nach ÖNORM EN 408 [32] sichergestellt. Dies erfolgte durch Aufbringen einer Vorkraft bei offener Kalotte und anschließender Fixierung der Kalotte. Der Prüfaufbau ist in Abbildung 3-1 zu sehen.

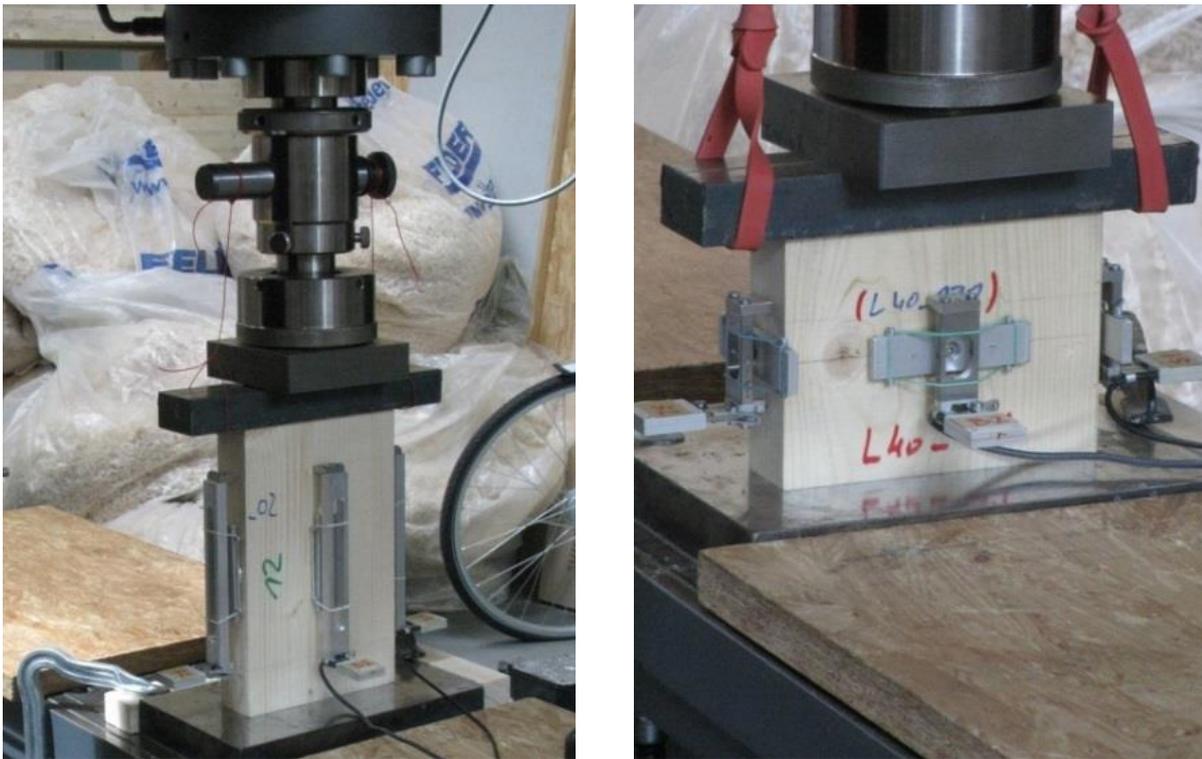


Abbildung 3-1: links: Prüfaufbau der Prüfkörper „lang“; rechts: Prüfaufbau der Prüfkörper „kurz“

Die Kraft wurde bei jeder Prüfung in Form einer Hystereseschleife aufgebracht. Dabei wurden die Prüfkörper bis zu einem Weg von 1,4 mm belastet und anschließend bis zu einem Weg von 0,3 mm entlastet; dargestellt in Abbildung 3-2. Im Anschluss daran erfolgte eine erneute sukzessive Laststeigerung bis eine ausreichende Entfestigung zur Beurteilung des Versagensverhaltens nach Erreichen der Maximallast gegeben war.

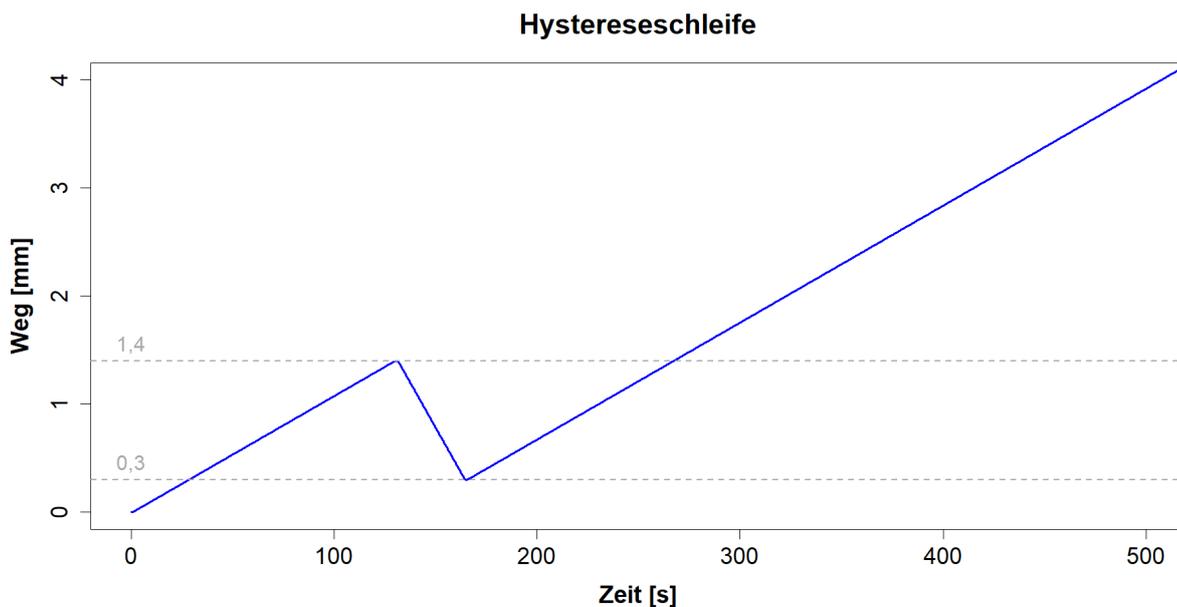


Abbildung 3-2: Hystereseschleife am Bsp. einer Prüfdurchführung

Da bei der „lignum_z_275“ direkt an das System nur zwei externe Wegmessungen anschließbar sind, wurde zudem zur Messdatenerfassung ein Catman eingesetzt. In Folge existieren für jede Prüfung ein Messdatenfile mit Zeit, Kraft und Maschinenweg der Prüfmaschine selbst, welches im weiteren als „Zwick“ bezeichnet wird, und ein weiteres mit Zeit, Kraft, Maschinenweg und lokalen Wegmessungen der vier DD1, welches im weiteren als „Cat“ bezeichnet wird. Beide Signalaufzeichnungen erfolgten mit einer Messrate von 5 Hz.

3-1.3 PRÜFUNGEN VON STAHLPRÜFKÖRPERN

Ergänzend zu den Prüfungen an Brettabschnitten der Holzart Fichte wurden in dieser ersten Phase auch Druckversuche an Stahlprüfkörpern unterschiedlicher Dimension durchgeführt. Die Motivation dabei war den Maschinenweg um Verformungen aus dem Prüfgerüst und dem Prüfaufbau selbst zu korrigieren um alleinig jene des Prüfkörpers über seine ganze Höhe und über den gesamten Prüfverlauf hinweg bestimmen zu können (siehe Kapitel 3-3). Die Stahl-Stahl-Prüfungen der ersten Prüfreihe erfolgten im Juli 2008. Dabei hatten die Prüfkörper Höhen von 0, 56, 136 und 260 mm, wobei die Höhe 0 mm zweimal geprüft wurde. Die Prüfungen der zweiten Prüfreihe erfolgten dann im November 2019. Die Prüfkörper dieser Prüfreihe hatten die Höhen 0, 100, 250 und 400 mm, wobei die Höhe 0 mm dreimal und alle anderen Höhen zweimal geprüft wurden (siehe Abbildung 3-3).

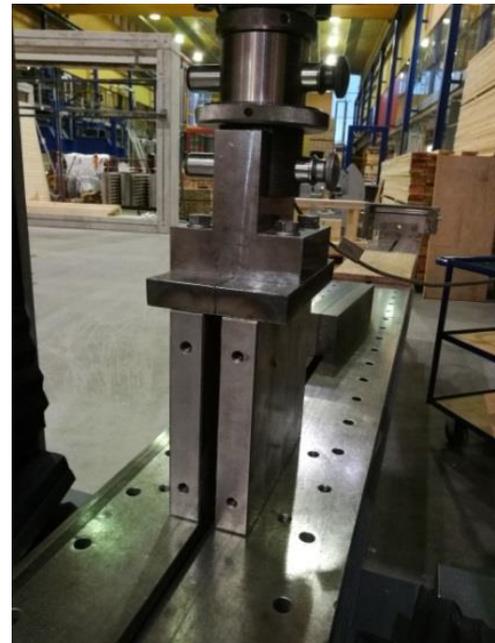


Abbildung 3-3: Stahl-Stahl-Druckprüfungen: links: Höhe 50; rechts: Höhe 250

3-2 PRÜFREIHE BSH UND BSP

Die für BSH und BSP zugrunde liegenden Daten stammen aus Druckprüfungen längs zur Faser ebenfalls durchgeführt an Probekörpern der Holzart Fichte (*Picea abies*) aus mitteleuropäischer Provenienz. Diese Prüfungen wurden im Februar 2020 im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI) der Technischen Universität Graz im Auftrag des Instituts für Holzbau und Holztechnologie durchgeführt.

3-2.1 PRÜFKÖRPER

Die BSH-Prüfkörper wurden vor Prüfbeginn in zwei Prüfreihe, Prüfreihe A und Prüfreihe B, unterteilt. Beide Prüfreihe sind der Festigkeitsklasse GL36h nach ÖNORM EN 1194 [28] zuzuordnen.

Die Prüfreihe A hatte einen Querschnitt von 160 mm Breite und 80 mm Höhe und wurde aus zwei Lamellen, je 40 mm stark, hergestellt. Ziel dieser Prüfreihe war die Bestimmung des

Lastausbreitungswinkels. Dazu wurden die Prüfkörper in fünf Gruppen (A-V0 und A-TF1 – A-TF4), gekennzeichnet durch unterschiedliche Längen, aufgeteilt; siehe Tabelle 3-2. Die Gruppe A-V0 umfasste neun Prüfkörper mit einer Länge von 720 mm und wurde vollflächig belastet. Die Gruppen A-TF1 – A-TF4 bestanden jeweils aus sieben Prüfkörpern, wobei bei diesen die Lasteinleitung über eine Teilflächenbelastung erfolgte, welche zentrisch der Prüfkörperbreite und quer über die gesamten Lamellen, mit einer Lasteinleitungsfläche von 80 mm mal 30 mm, platziert wurde; siehe Abbildung 3-4, links. Die Längen jener Prüfkörper der Gruppen A-TF1 – A-TF4 betragen aufsteigend, beginnend mit A-TF1, 78 mm, 113 mm, 179 mm und 335 mm. Unter dem Ansatz, dass bei gegebener Lastausbreitung in Verbindung mit einer Teilflächenbelastung und ausreichender Prüfkörperbreite bzw. -höhe die Tragfähigkeit von vollflächig belasteten Prüfkörpern erzielt werden kann, wurden diese Längen gewählt, um mögliche Lastausbreitungswinkel von 40° , 30° , 20° bzw. 11° zu überprüfen. Auf Basis erster Ergebnisse wurde allerdings bereits während der Prüfdurchführung entschieden, die Gruppen A-TF2 und A-TF3 nicht weiter zu betrachten.

Die Prüfreihe B hatte einen Querschnitt von 160 mm Breite und 120 mm Höhe und wurde aus drei Lamellen, je 40 mm stark, hergestellt. Ziel dieser Prüfreihe war es, die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Lasteinleitungsbreiten und eventuell auftretendes Spalten zu analysieren. Dazu wurden die Prüfkörper in fünf Gruppen (B-V0 und B-TF1 – B-TF4), gekennzeichnet durch jeweils unterschiedliche Lasteinleitungsflächen bzw. Orientierung zu den Lamellen unterteilt; siehe Tabelle 3-2. Die Gruppe B-V0 umfasste zehn Prüfkörper mit einer Länge von 720 mm und wurde vollflächig belastet. Die Gruppen B-TF1 – B-TF4 bestanden jeweils aus sieben Prüfkörpern welche einer Teilflächenbelastung ausgesetzt wurden. Die Orientierung der Lasteinleitungsplatten in B-TF1 – B-TF3 erfolgte dabei wie in den Gruppen A-TF1 – A-TF4 quer über die Lamellen und mit Lasteinleitungsbreiten von 30 mm, 60 mm und 90 mm, und in Gruppe B-TF4 mit Ausrichtung parallel zu den Lamellen sowie einer Breite der Lasteinleitungsplatte von 60 mm; siehe Abbildung 3-4, mittig u. rechts.

Zusätzlich zu den ursprünglich geplanten Prüfreihe A und B wurden noch die Prüfreihe C, D und E geprüft. Bei den Prüfreihe C und D handelt es sich um jeweils zehn vollflächig beanspruchte BSH-Prüfkörper der Festigkeitsklasse GL28h. Die Prüfkörper der Prüfreihe C wurde aus jeweils drei Lamellen mit einer Stärke von je 40 mm hergestellt und hatten einen Querschnitt von 150 mm Breite und 120 mm Höhe, sowie eine Prüfkörperlänge von 710 mm. Die Prüfkörper der Prüfreihe D wurde aus jeweils zwei Lamellen mit einer Stärke von je 40 mm hergestellt und hatten einen Querschnitt von 150 mm Breite und 80 mm Höhe, sowie eine Prüfkörperlänge von 470 mm; siehe Tabelle 3-2.

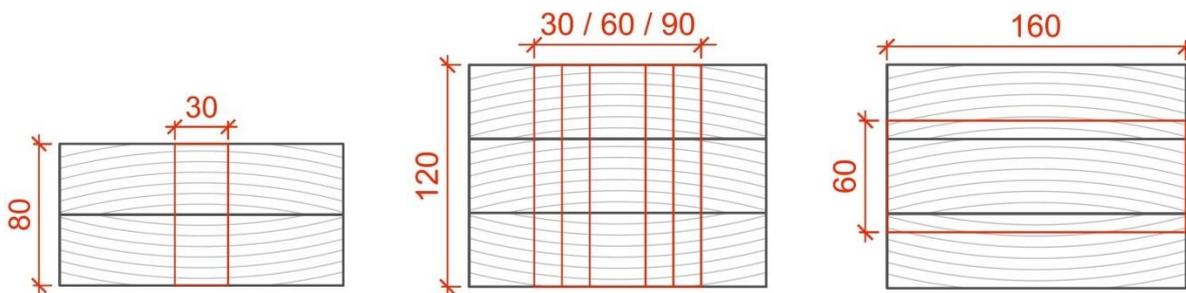


Abbildung 3-4: links: Teilflächenbelastung – Prüfreihe A, mittig u. rechts: Teilflächenbelastung – Prüfreihe B

Tabelle 3-2: Übersicht der BSH-Prüfreihe

Bez.	Anzahl	Lamellen- anzahl	Festigkeits- klasse ²⁾	Lasteinleitung			B [mm]	H [mm]	L [mm]
				Art ¹⁾	l _{LE} [mm]	b _{LE} [mm]			
A-VF0	9	2	GL36h	VF	160	80	160	80	710
A-TF1	7	2	GL36h	TF	30	80	160	80	78
A-TF2³⁾	7	2	GL36h	TF	30	80	160	80	113
A-TF3³⁾	7	2	GL36h	TF	30	80	160	80	179
A-TF4	7	2	GL36h	TF	30	80	160	80	335
B-VF0	10	3	GL36h	VF	160	120	160	120	710
B-TF1	7	3	GL36h	TF	30	120	160	120	235
B-TF2	7	3	GL36h	TF	60	120	160	120	235
B-TF3	7	3	GL36h	TF	90	120	160	120	235
B-TF4	7	3	GL36h	TF	160	60	160	120	235
C-VF0⁴⁾	10	3	GL28h	VF	150	120	150	120	710
D-VF0⁴⁾	10	2	GL28h	VF	150	80	150	80	470

Anmerkungen:

¹⁾ ... VF steht für vollflächige Lasteinleitung; TF steht für teilflächige Lasteinleitung

²⁾ ... nach ÖNORM EN 1194 [28]

³⁾ ... im Laufe des Prüfvorgangs verworfene Prüfgruppe

⁴⁾ ... zu den ursprünglich geplanten zusätzliche Prüfgruppen

Die Prüfreihe E bestand aus zehn BSP-Prüfkörpern; davon wurden fünf vollflächig geprüft und bei den verbleibenden fünf Prüfkörpern erfolgte die Lasteinleitung über eine Teilfläche; siehe Tabelle 3-3. Dabei wurden die Prüfkörper aus BSP-Platten der Firma Stora Enso so herausgeschnitten, dass Teilflächen- und vollflächig belastete Prüfkörper aus der Ursprungsplatte direkt hintereinander entnommen wurden, sodass eine bestmögliche Zuordnung zum Material in Verbindung mit hoher Homogenität im Material zwischen den Gruppen gegeben ist. Zur Erzielung einer entsprechenden Variabilität innerhalb der Gruppen wurden die zugehörigen Prüfkörper nebeneinander entnommen, sodass die Längs- (Deck-) und Mittellage(n), also jene für die Druckbeanspruchung in Scheibenebene parallel zur Decklage relevanten Lagen im Sinne der dafür eingesetzten Brettlamellen verschieden waren. Der Aufbau der Prüfkörper war dreilagig (30/30/30) und die Lamellen innerhalb der Lagen wiesen zueinander eine Schmalseitenverklebung auf. Die Lamellen waren einer Festigkeitsklasse von C24 bzw. T14 nach EN 338 [3] und somit das BSP CL24 nach EN 16351 [37] zuzuordnen. Die Prüfkörper hatten einen Querschnitt von 150 mm Länge und 90 mm Höhe und eine Prüfkörperbreite von 470 mm. Die Lasteinleitung der teilbelasteten Prüfkörper erfolgte über eine Fläche von 60 mm mal 90 mm welche quer über alle drei Lagen angeordnet war.

Tabelle 3-3: Übersicht der BSP-Prüfreihe

Bez.	Anzahl	Lagen	Festigkeits- klasse	Lasteinleitung			L [mm]	B [mm]	H [mm]
				Art ¹⁾	l _{LE} [mm]	b _{LE} [mm]			
E-VF0 ⁴⁾	5	3	CL24	VF	250	90	250	90	165
E-TF1 ⁴⁾	5	3	CL24	TF	60	90	250	90	165

Anmerkungen:

¹⁾... VF steht für vollflächige Lasteinleitung; TF steht für teilflächige Lasteinleitung

⁴⁾... zu den ursprünglich geplanten zusätzliche Prüfgruppen

Die BSP-Prüfkörper wurden nicht bei Normklima klimatisiert sondern bei herkömmlichem Raumklima gelagert. Es wurden von jedem Prüfkörper die geometrischen Abmessungen durch Mittelwertbildung aus zwei Messungen, durchgeführt mittels Messschieber, bestimmt. Nach erfolgter Prüfung wurden Darrproben aus den Prüfkörpern entnommen. Die Darrproben wurden gewogen und abgemessen. Anschließend wurden sie in einen Darrschrank bei 103 °C bis zur Massekonstanz getrocknet; siehe [34]. Auf Basis der dabei gewonnenen Daten kann die Holzfeuchte sowie die Rohdichte der Prüfkörper bestimmt werden.

Bei allen Prüfkörpern mit Lasteinleitung über eine Teilfläche wurde im Zuge der Prüfvorbereitungen je eine Seite mit weißer Dispersionsfarbe dünn aber weitgehend deckend gestrichen. Diese Oberfläche wurde nach ausreichender Trocknung anschließend mit schwarzem Lack fein besprüht um ein zufälliges Muster mit zudem hohen Kontrast an dieser Fläche zu erzeugen; siehe Tabelle 3-2 bzw. Tabelle 3-3 und Abbildung 3-5. Der Grund hierfür war der spätere Einsatz des Bildkorrelationsmesssystems Mercury welches dazu diente, die Verformungen vollflächig und weitgehend kontinuierlich entlang des gesamten Prüfvorganges zu beobachten. Es ist in diesem Zusammenhang darauf hinzuweisen, dass es für eine ausreichende Zuverlässigkeit in der Bestimmung von Steifigkeitskenngrößen von Holz und holzbasierten Produkten aufgrund der gegebenen strukturinhärenten Inhomogenitäten in der Regel unerlässlich ist, Verformungen auf beiden bzw. allen vier Oberflächen zu messen und die entsprechenden Daten anschließend zu mitteln. Der Fokus hier lag nicht an der Bestimmung des Druck-E-Moduls längs zur Faser mit Hilfe des Mercury Systems. Der Fokus richtete sich mehr auf eine weitgehend qualitative Analyse des Verformungsfeldes und dem Abgleich der Prüfergebnisse betreffend Vergleich Lasteinleitung vollflächig zur Teilflächenbelastung und möglicher Ableitung bzw. Abstimmung der Lastausbreitung bzw. Mitwirkung von Seitenholzbereichen.


Abbildung 3-5: Kontrastfläche eines Prüfkörpers als Vorbereitung für Messungen mit dem System Mercury

3-2.2 PRÜFKONFIGURATION

Die Druckprüfungen längs zur Faser an den BSH und dem BSP Prüfkörpern wurden an der Universalprüfmaschine BETA 1000 (Messphysik) mit einer maximalen Kraftkapazität von ± 1.000 kN durchgeführt. Neben der Messung des globalen Maschinenweges wurden noch bei jeder Prüfung zur Bestimmung der Verformungen (Stauchungen) des Prüfkörpers in Anlehnung an EN 408 [32], allerdings abweichend dazu über seine gesamte Höhe, vier Wegaufnehmer mit Tastspitze (HBM WA20) am Lasteinleitungszyylinder angebracht. Zusätzlich wurden noch die Hauptdehnungen von Prüfkörpern mit Teilflächenbelastung mit dem digitalen 3D Bildkorrelationsmesssystem MercuryRT (Sobriety) erfasst (siehe Abbildung 3-6). Dieses System besteht aus zwei Kameras (ProsillicaGT) mit jeweils einer Auflösung von 16 Megapixel. Die Brennweite der Kameraobjektive betrug 28 mm. Damit ergab sich eine Genauigkeit des Messsystems von 0,1 px. Die Steuerung der Prüfmaschine sowie des Mercury Systems und in weiterer Folge auch die Auswertung der Daten aus der Mercury-Messung wurde von Hrn. Uwe Fülöp, Prüffingenieur und Messtechniker am LKI, übernommen.

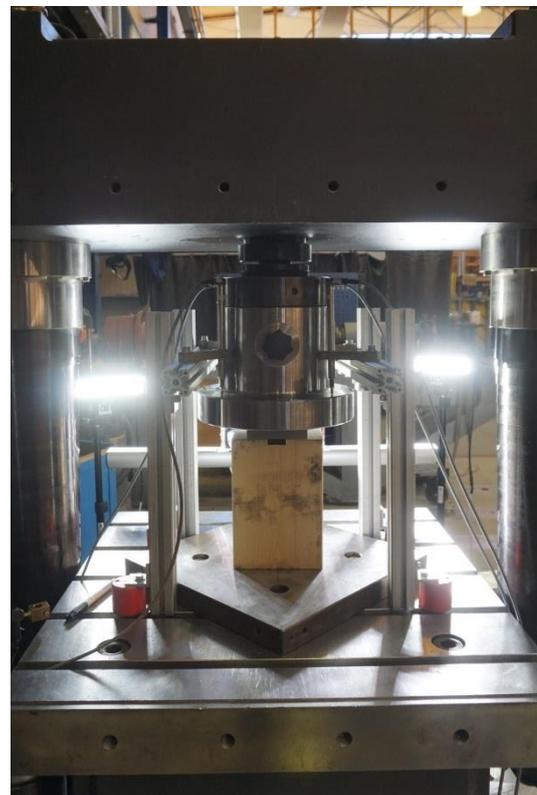


Abbildung 3-6: links: Prüfaufbau für Teilflächenpressung mit Mercury – Vorderseite; rechts: Prüfaufbau für Teilflächenpressung mit Mercury – Rückseite

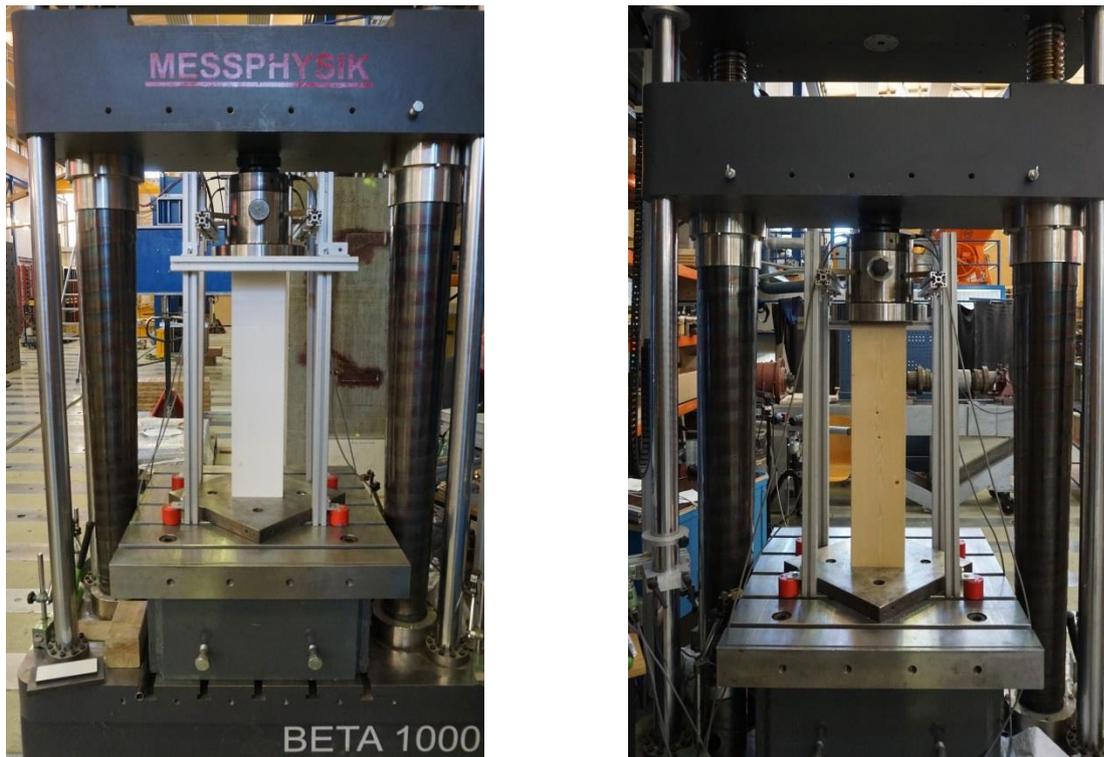


Abbildung 3-7: links: Prüfaufbau für vollflächige Lasteinleitung – Vorderseite; rechts: Prüfaufbau für vollflächige Lasteinleitung – Rückseite

Die Lastaufbringung erfolgte für alle Prüfungen weggesteuert, ohne Hysterese und mit einer Prüfgeschwindigkeit welche derart gewählt wurde, um in rd. 300 ± 120 s die Maximallast zu erreichen, wie in ÖNORM EN 408 [32] gefordert. Bei Prüfungen mit Lasteinleitung über Teilflächen wurden sogenannte Kompaktplatten mit schwarzem Kern (EGGER) [38] unter den Lastzylinder angebracht. Um eine exzentrische Lasteinleitung weitgehend zu unterbinden wurde beim Zuschnitt der Prüfkörper auf planparallele Stirnflächen geachtet.

Das Prüfgerüst der BETA 1000 besitzt eine Kompensation ihrer Eigenverformungen. Der beim Prüfaufbau verwendete Prüftisch wird in dieser Kompensation jedoch nicht berücksichtigt. Folge dessen wurden, wie bereits erwähnt, daher zusätzlich die Stauchungen über die gesamte Länge der Prüfkörper über vier externe Wegaufnehmer mit einer Messrate von 5 Hz erfasst. Die Daten dieser Messungen zusammen mit Zeit, Kraft und globaler Verformung wurden über einen QuantumX (HBM) aufgezeichnet. Die entsprechende Messdatei wurde zur nachfolgenden Auswertung der Messdaten herangezogen.

Weiters wurden noch die Hauptdehnungen der Prüfkörper mit Teilflächenbelastung vom Mercury mit einer Messrate von 0,1 Hz erfasst. Dabei wurden die Hauptdehnungen in der Ebene (2D) gemessen um vordergründig qualitativ Aufschluss über das Materialverhalten zu erlangen. Für jede Prüfung wurden zwei Bildauswertungen des Mercury gespeichert; eine repräsentativ für den linearen Bereich und eine repräsentativ für den Bereich der Maximalkraft, wie in Abbildung 3-8 exemplarisch dargestellt. Der zugehörige Prüfkörper ist in Abbildung 3-9 dargestellt.

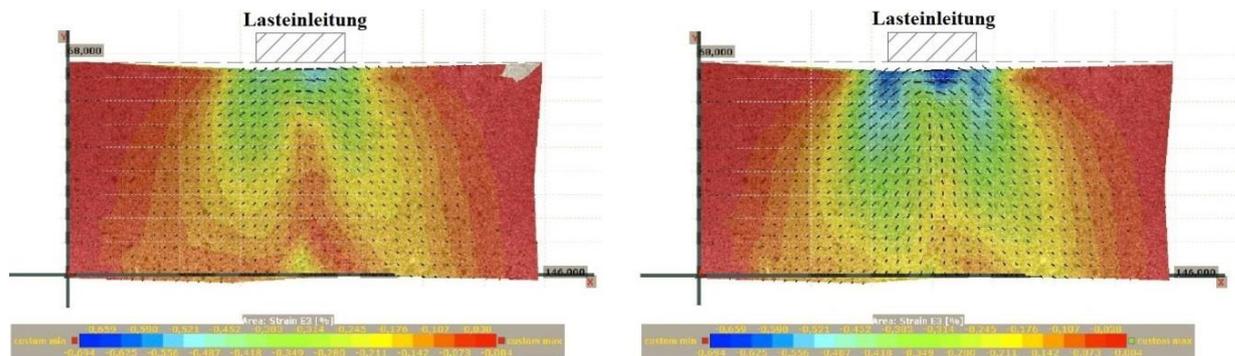


Abbildung 3-8: Hauptdehnungen gemäß Mercury System: links: linearer Bereich; rechts: Bereich der Maximalkraft



Abbildung 3-9: Prüfkörper zugehörig zu den dargestellten Hauptdehnungen gemäß Mercury

3-3 MASCHINENWEGKORREKTUR FÜR PRÜFUNGEN AN BRETTABSCHNITTEN

3-3.1 ALLGEMEINES

Der Maschinenweg ist die Summe aller Verformungen, welche durch die Nachgiebigkeit der Maschine selbst sowie durch den Prüfaufbau, den Prüfkörper bzw. den Prüfgegenstand selbst in Abhängigkeit der Last im Zusammenspiel mit dem gegebenen Widerstand verursacht werden. Da Holz in Faserrichtung relativ steif ist und das Prüfgerüst „lignum_z_275“ im Verhältnis dazu relativ nachgiebig, kommt es zu erheblichen Eigenverformungsanteilen der Maschine an der Gesamtverformung, der globalen Wegaufzeichnung. Eine rechnerische Korrektur dieses Maschinenweges ist notwendig um realitätsgetreue Ergebnisse für die Arbeitslinie und in weiterer Folge für den Druck-E-Modul unter Berücksichtigung der Stauchung über die gesamte Prüfkörperlänge zu erhalten. Ohne einer solchen Korrektur würden die Steifigkeiten des Prüfkörpers deutlich unterschätzt werden. Für eine erste Bestimmung der Verformungsanteile in Abhängigkeit der Last des Prüfgerüsts selbst einschließlich Prüfaufbau aber ohne Prüfkörper wurden Prüfreihen unter Verwendung massiver Stahlplatten durchgeführt (siehe Kapitel 3-1.3). Um diese Verformungsanteile für unterschiedliche Positionen der Quertraverse im Prüfgerüst zu bestimmen, wie ja durch die Prüfung unterschiedliche langer Prüfkörper auch gegeben, kamen unterschiedlich lange bzw. hohe Stahlplatten, als quasi starre Prüfkörper mit als bekannt anzunehmender Steifigkeit, zum Einsatz.

3-3.2 AUSWERTUNG DER STAHL-STAH-PRÜFREIHEN

Die Auswertung der Stahl-Stahl-Prüfreiheiten erfolgte mit der freien Programmiersprache R [39]. Dabei wurden aus den Daten Kraft-Weg Diagramme und Kraftinkrement-Weg Diagramme erstellt. Die Rohdaten enthielten dabei noch die bei Prüfungen zu Beginn auftretende Hystereseschleife. Da der Fokus bei der Auswertung auf den zweiten Belastungsast liegt, wurden die Daten des ersten Be- und Entlastungsastes nicht in die Auswertung miteinbezogen. Die Festlegung eines quasi linear-elastischen Bereiches erfolgte mit Hilfe des Kraftinkrement-Weg Diagramms. Beispielhaft wird dies in Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11 gezeigt.

Stahl-Stahl: S260

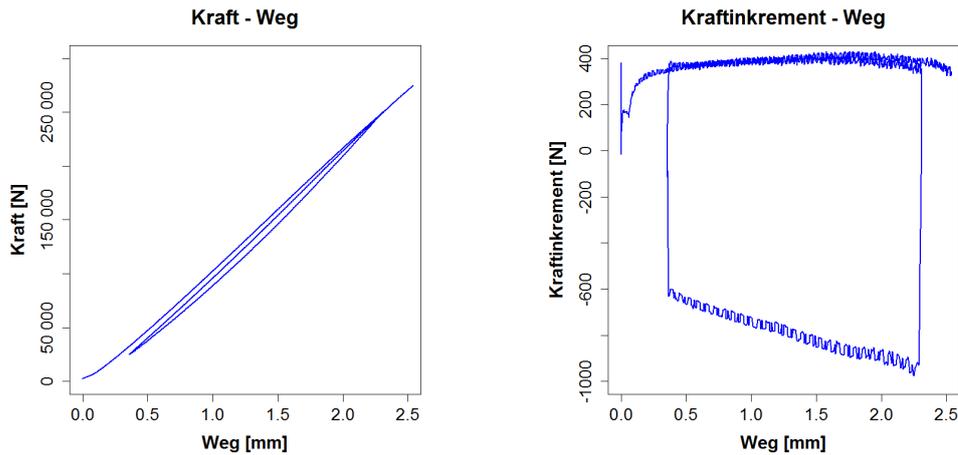


Abbildung 3-10: *Bsp.: Stahl-Stahl-Prüfung mit Hystereseschleife*

Stahl-Stahl: S260

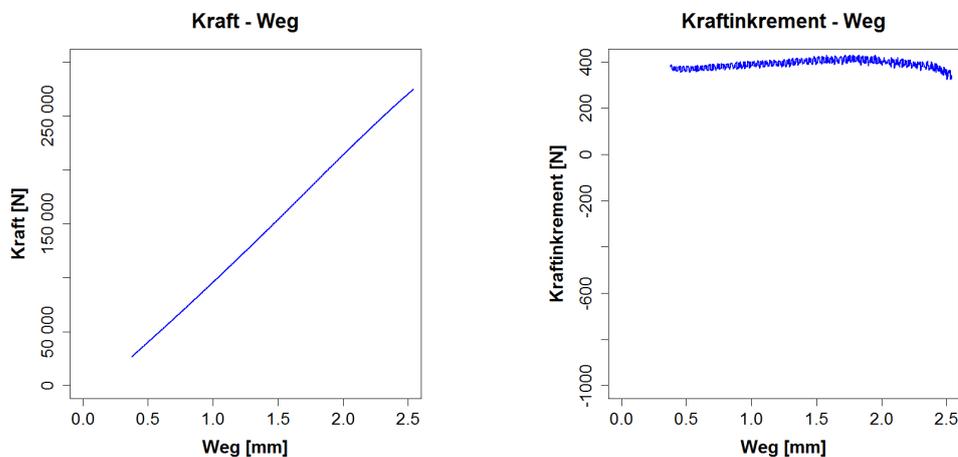


Abbildung 3-11: *Bsp.: Stahl-Stahl-Prüfung ohne Hystereseschleife*

Einen Überblick über beide Prüfreiheiten, jene aus 2008 und jene aus 2019 (siehe Abschnitt 3-1.3), gibt Abbildung 3-12. Dabei ist zu erkennen, dass die einzelnen Prüfungen pro Prüfreiheit, trotz Prüfung Stahl-auf-Stahl, leicht streuen und die Prüfreiheiten, sprich die unterschiedlichen Längen bzw. Höhen, zueinander leicht unterschiedliche Steigungen aufweisen.

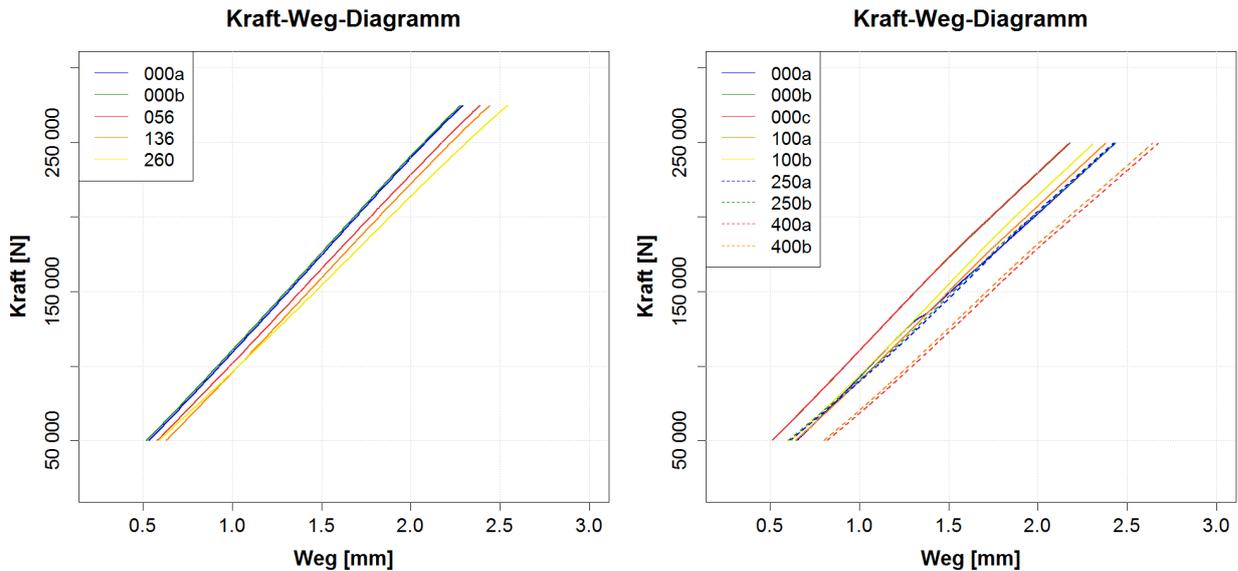


Abbildung 3-12: links: Prüfreihe 1 (2008), rechts: Prüfreihe 2 (2019)

Grundsätzlich lassen sich die Prüfkurven als weitgehend linear beschreiben. Bei genauerer Betrachtung, z.B. in Form einer Residuenanalyse bei angenommener einacher linearer Regression, weisen diese aber einen leichten degressiven Verlauf auf. Um die Prüfkurven entsprechend mit Hilfe eines mathematischen Modells zu beschreiben, wurden in weiterer Folge fünf Funktionen analysiert. Man beschränkte sich dabei auf Funktionen mit zwei Parametern um die Anzahl der Variablen in einem gut kontrollierbaren Umfang zu halten. Darüber hinaus wird noch darauf hingewiesen, dass bei den folgenden Funktionen, entgegen den Abbildungen zuvor, der Weg als abhängige und die Kraft als erklärende Variable verwendet wurden, um in Folge den Maschinenweg in Abhängigkeit der Kraft korrigieren zu können. Die gewählten Funktionen sind in den Glg. (3.1) - (3.5) dargelegt.

lineare Funktion: $y = A \cdot x + B$ (3.1)

Potenzfunktion: $y = A \cdot x^B$ (3.2)

Exponentialfunktion: $y = A + e^{(x \cdot B)}$ (3.3)

Logarithmusfunktion: $y = A + \log_B x$ (3.4)

Polynomfunktion 2. Grades: $y = A \cdot x + B \cdot x^2$ (3.5)

Dabei sind:

- y Weg aus Funktion in Abhängigkeit der Kraft
- x Prüfkraft
- A Parameter A
- B Parameter B

Für jede dieser Funktionen und jede geprüfte Länge bzw. Höhe der Stahlprüfkörper erfolgte eine Optimierung ihrer Parameter zur Anpassung an die Versuchswerte. Dazu bediente man sich der Funktion „optim“ in R und kombinierte diese mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Dabei wurde die Summe der quadrierten Differenzen zwischen dem, über die Funktionen, errechneten Weg und dem empirisch gemessenen Weg minimiert.

Um eine Güte der Anpassung der parametrisch optimierten Funktionen an die Prüfkurve zu erhalten, wurden die Residuen ermittelt. Zudem wurden die Daten noch grafisch analysiert, um eine visuelle,

qualitative Kontrolle zur numerischen, quantitativen Berechnung zu erhalten. Beispiele dafür sind in Abbildung 3-13 für eine Prüfung dargestellt. Dabei zeigte sich bei allen Prüfungen, dass die Residuen der linearen Funktion am geringsten sind aber, wie zuvor erwähnt, aufgrund des leicht degressiven Kraft-Weg-Verlaufes, keine zufällige, sondern eine systematische Abweichung vom zugrunde gelegten Modell aufweisen. Diese Abweichung wird für das weitere Vorgehen allerdings als gering bewertet und vernachlässigt.

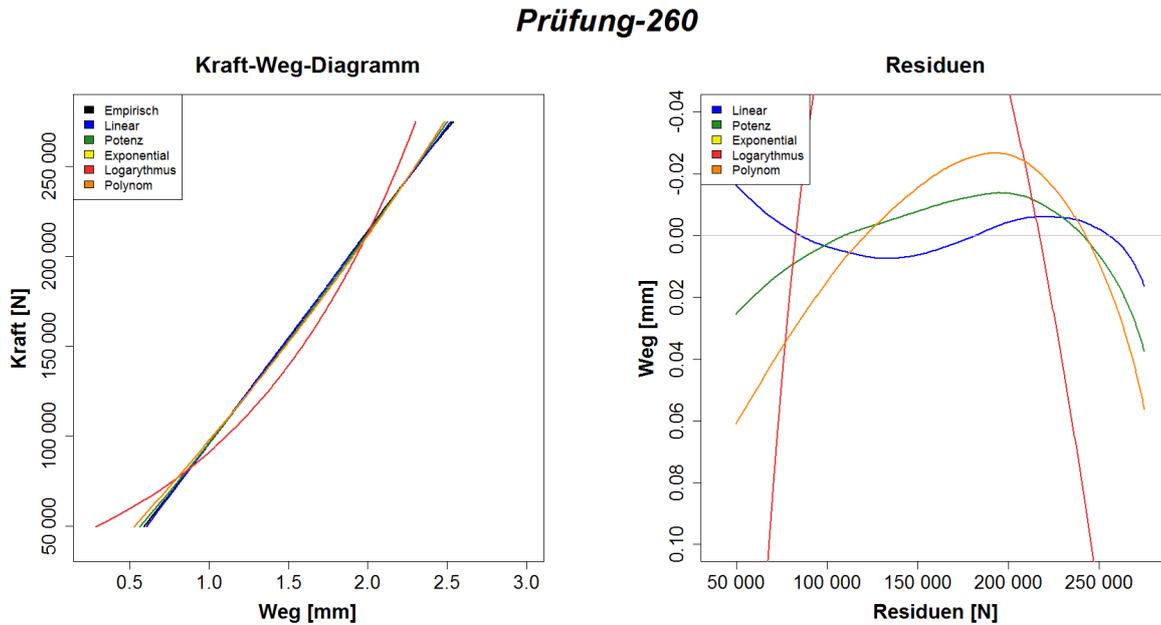


Abbildung 3-13: Kraft-Weg-Diagramm (links) und Residuen (rechts) für alle fünf angepassten Funktionen

Im Weiteren wird daher das lineare Regressionsmodell gemäß Gl. (3.1) weiterverwendet. Dabei ist vor allem der Parameter A , welcher der Steigung entspricht, von primärem Interesse, wohingegen der Parameter B , als Achsenabschnitt, weniger von Belang ist und im Folgenden nicht weiter betrachtet wird.

Der Steigungsparameter A selbst ist wiederum von der jeweiligen Prüfkörperlänge bzw. -höhe abhängig und wird daher im Weiteren als $A(H)$ definiert. Alle Werte für den Parameter $A(H)$ aus den beiden Prüfreihe wurden über ihrer zugehörigen Länge bzw. Höhe H in einem Diagramm aufgetragen. Dabei wurde bei der zweiten Prüfreihe die erste Prüfung bei Länge bzw. Höhe 0 mm (siehe Abbildung 3-12, rechts, Prüfung 000a) als nicht repräsentativ identifiziert und dementsprechend aus der weiteren Analyse ausgeschlossen. Alle anderen Parameterwerte jeder Prüfreihe wurden mit Hilfe der Funktion „optim“ und der Methode der kleinsten Fehlerquadrate durch eine Ausgleichsgerade verbunden (siehe Abbildung 3-14).

Parameter für lin. Maschinenwegkorrektur ohne Ausreißer

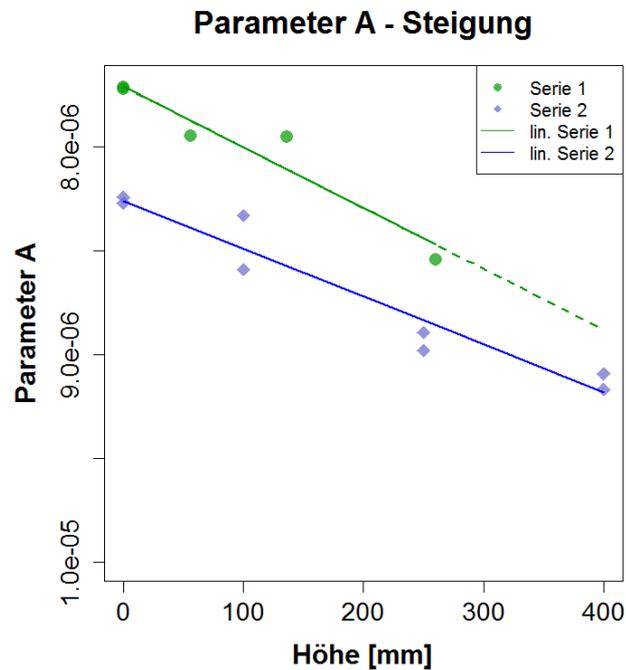


Abbildung 3-14: Parameter $A(H)$ in Abhängigkeit der Länge bzw. Höhe der beiden Prüfreiheiten

Somit erhielt man durch die zwei Prüfreiheiten zwei Geradengleichungen, welche zur Bestimmung von $A(H)$ herangezogen werden können. Bei der Betrachtung von Abbildung 3-14 ist auffällig, dass die beiden Ausgleichsgeraden jedoch entgegen der Erwartung nicht ident sind. Variabilität innerhalb einer Prüfreiheit aber auch zu einem geringen Anteil zwischen den Prüfreiheiten, da 2008 und 2019 nicht dieselben Stahlprüfkörper zum Einsatz kamen, sind u.a. auf den Umstand zurückzuführen, dass die Oberflächen der Stahlprüfkörper zwar eben geschnitten und plan gefräst aber nicht plan geschliffen waren. Durch diese Oberfläche kommt es lokal unter Last zu Einpressungen. Ein weiterer, wesentlicher Aspekt zeigt sich im Vergleich zwischen Abbildung 3-1, dem Prüfaufbau 2008, welcher in Folge auch für die Stahl-Stahl-Prüfungen zum Einsatz kam, und Abbildung 3-3, dem Prüfaufbau für die Durchführung der Stahl-Stahl-Prüfungen aus 2019. Während 2008 eine Kalotte in Verbindung mit Lasteinleitungsplatte nach oben vollflächig und somit gesperrt an die Quertraverse des Prüfgerüsts angeschlossen wurde, kam 2019 ein massives, ebenfalls wie 2008 über einen Gelenkbolzen aber nun gelenkig angeschlossenes T-Profil mit Lasteinleitungsplatte zum Einsatz. Es ist daher zu erwarten, dass die Kraftübertragung rein über den Gelenkbolzen 2019 nachgiebiger ist als jene 2008 realisierte. Da die Druckprüfungen längs zur Faser an Brettabschnitten gemäß der Prüfanordnung wie unter Abbildung 3-1 gezeigt durchgeführt wurden gilt nach diesen Überlegungen die Korrekturfunktion aus 2008 als zuverlässiger als jene auf Basis der Stahl-Stahl-Prüfungen aus 2019.

Unter Einbeziehung der äußerst kleinen Skalierung der Ordinate relativiert sich der Unterschied der beiden Ausgleichsgeraden. Bestimmt man jedoch den Parameter $A(H)$ für eine bestimmte Prüfkörperhöhe jeweils für beide Ausgleichsgeraden, führt die Maschinenwegkorrektur durch und ermittelt den Druck-E-Modul längs zur Faser, so zeigen sich merkbare Unterschiede im Bereich von rd. 5 %. Um die Methodik der Maschinenwegkorrektur noch weiter und eingehender zu analysieren wird unter Abschnitt 3-3.3 noch ein weiterer Ansatz diskutiert.

3-3.3 ANPASSUNG AN MESSUNG DER WEGAUFNEHMER

Der neue Zugang besteht darin, die globalen „Zwick“-Datensätze, welche von der Prüfmaschine selbst aufgezeichnet wurden, mit den lokalen „Cat“-Datensätzen, welche von den lokalen Wegaufnehmern aufgezeichnet wurden und somit von der Maschinenverformung unbeeinflusst sind, abzugleichen. Als

besondere Herausforderung stellt sich dabei die Implementierung in R heraus, da die beiden Datensätze durch ihre unterschiedliche Auflösung unterschiedliche Inkremente und Vektorlängen besitzen und abgeglichen werden mussten. In Abbildung 3-15 sind die unterschiedlichen Signale der beiden Messkurven dargestellt. Darin ist, im Gegensatz zu den weiteren Abbildungen, zwecks Darstellung der Unterschiede in der Signalauflösung ausnahmsweise auch das Cat-Signal als global gemessener Weg und nicht wie im Folgenden als lokaler Weg, basierend auf den Messungen der zentral zur Prüfkörperlänge angebrachten Wegaufnehmer, enthalten.

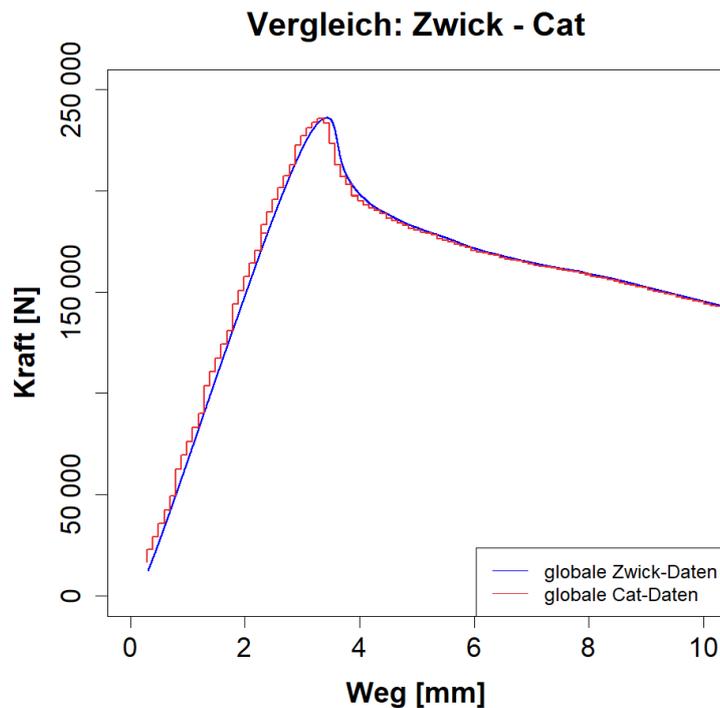


Abbildung 3-15: Vergleich Signal Zwick und Cat

Ähnlich wie bei den Stahl-Stahl-Prüfreiheiten müssen auch die Daten der beiden hier vorliegenden Datensätze aufbereitet und der erste Be- und Entlastungsast der Hystereseschleife entfernt werden. Da es sich bei diesen beiden Datensätzen jedoch um größere Datenmengen handelt wurde dies mit Hilfe von R automatisiert durchgeführt; Details dazu im Kapitel 3-4.2. Weiters wurden Prüfungen, bei denen die Aufzeichnung der Wegaufnehmer frühzeitig beendet wurde oder sich Fehlfunktionen zeigten, ausgesondert.

Im nächsten Schritt wurde die von den Wegaufnehmern lokal aufgezeichnete Verformung auf die gesamte Länge der Prüfkörper hochskaliert. Dabei wurde vereinfachend eine gleichmäßige Stauchung über den gesamten Prüfkörper angenommen. Für die „kurzen“ Prüfreiheiten, welche eine Länge von 120 mm hatten, wurde eine Messbasis von 50 mm verwendet und es ergab sich somit ein Skalierungsfaktor von 2,4. Für die „langen“ Prüfreiheiten, mit einer Länge von 240 mm und einer Messbasis von 160 mm, ergab sich ein Skalierungsfaktor von 1,5. Des Weiteren wurden für jede Prüfung, die Prüfkurven der vier Wegaufnehmer horizontal an den Ausgangspunkt der „Zwick“-Prüfkurve verschoben und gemittelt.

Danach wurde die „Zwick“-Prüfkurve um den Maschinenweg, welcher wieder durch eine lineare Funktion angenähert wurde, korrigiert, um sie dadurch an die linear hochskalierte, gemittelte „Cat“-Prüfkurve anzupassen. Hierbei wurde erneut die R-Funktion „optim“ und die Methode der kleinsten Fehlerquadrate verwendet um die Parameter für den Maschinenweg so zu optimieren, dass die beiden Prüfkurven im Bereich von 0 - 50 % von F_{max} eine maximale Übereinstimmung zeigten. Der Anpassungsbereich von 0 - 50 % von F_{max} wurde gewählt, da dieser Bereich für die Ermittlung des

Druck-E-Moduls längs zur Faser als wesentlich gilt und die Maschinenkorrektur, wie bereits erwähnt, zur Korrektur des E-Moduls angewendet wird. Der gewählte Anpassungsbereich ist auch in Hinblick auf die Regelungen der ÖNORM EN 408 [32] zu sehen, wonach der Druck-E-Modul längs zur Faser mittels linearer Regressionsanalyse im Bereich von 10 - 40 % der Maximallast zu bestimmen ist (vgl. [32]).

Für Vergleichszwecke wurden zudem die „Zwick“-Datensätze um jenen Maschinenweg korrigiert, welcher sich aufgrund der zweiten Stahl-Stahl-Prüfreihe ergibt. Wie in Abbildung 3-16 ersichtlich, gibt es augenscheinlich nur einen geringen Unterschied zwischen der korrigierten (in gelb) und der optimal korrigierten Kurve (in orange) wohingegen es bei der Auswertung der Druck-E-Moduln doch zu merklichen Unterschieden von 5 - 10 % kommt.

BB 10

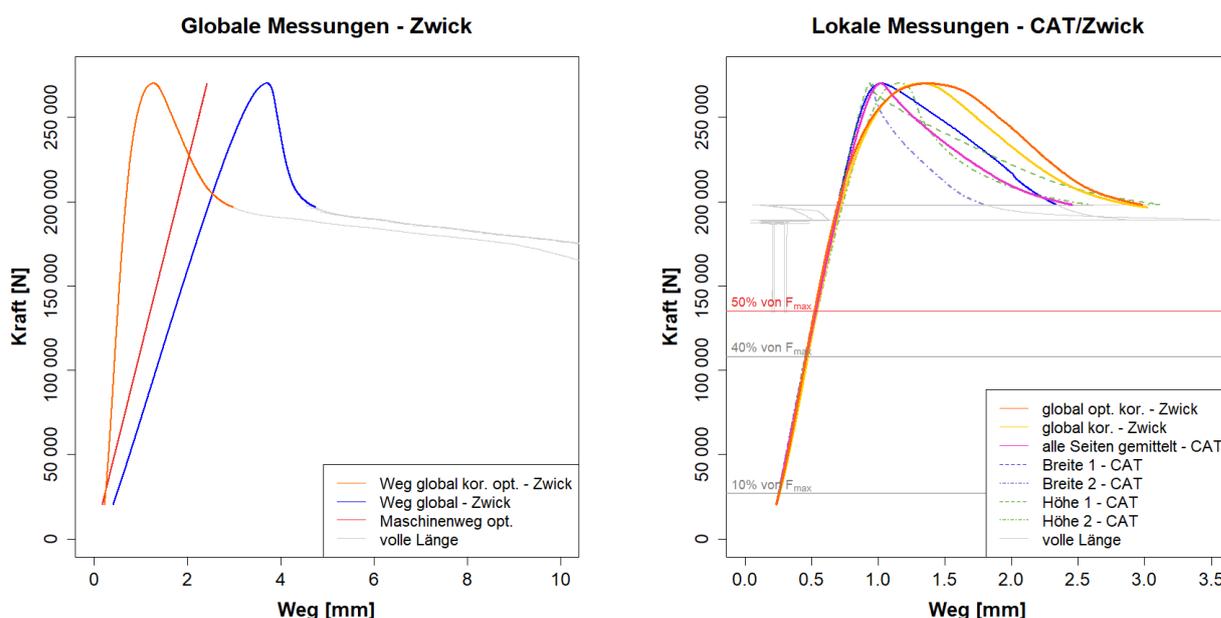


Abbildung 3-16: Optimierung der Maschinenwegkorrektur

Die Steigungsparameter, die sich für die Maschinenwegkorrektur durch die Anpassung an die Messungen der Wegaufnehmer ergeben, wurden für jede Prüfreihe als Mittelwert dieser zusammengefasst. Die Mittelwerte jeder Prüfreihe wurden zugehörig zu ihrer Prüfkörperlänge bzw. -höhe H zum Diagramm für den Parameter $A(H)$ hinzugefügt und wieder durch eine Ausgleichsgerade verbunden. Dabei ergeben sich zwei Stützstellen bei 120 mm und 240 mm Prüfkörperlänge bzw. -höhe.

Der Abbildung 3-17 ist zu entnehmen, dass alle Ausgleichsgeraden durchwegs eine ähnliche Steigung aufweisen, jedoch in ihrer Lage versetzt sind. Tendenziell nimmt der Parameter $A(H)$ mit steigender Höhe H ab, das Prüfgerüst wird in Folge zunehmend nachgiebiger. Auf Basis der Mittelwerte für den Parameter $A(H)$ der einzelnen Prüfreihe ist ersichtlich, dass der Parameter $A(H)$ für geringere Holzgüten einen geringeren Wert als für höhere Holzgüten einnimmt.

Parameter für lin. Maschinenwegkorrektur ohne Ausreißer

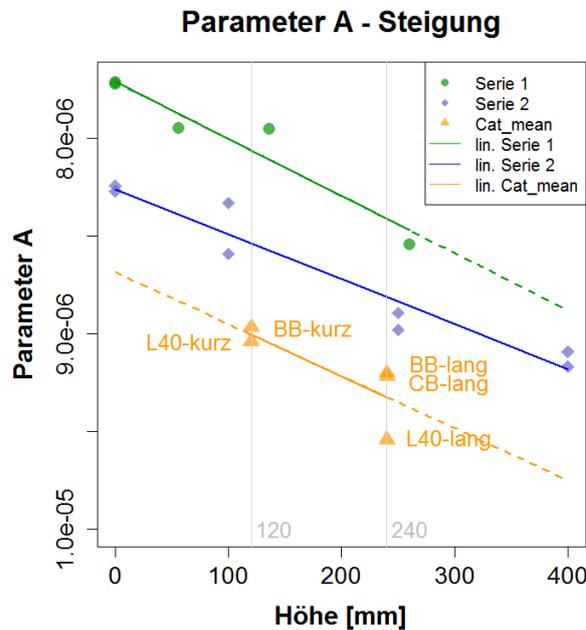


Abbildung 3-17: Zusammenfassung der Parameterwerte für die Maschinenwegkorrektur

Schlussendlich entschied man sich, auf Basis des Kenntnisstandes vor dem Vorliegen der Ergebnisse aus den BSH- und BSP-Prüfungen und den 2D-Stauchungsmessungen mittels Mercury, für die Korrektur des Maschinenweges die Parameterwerte entsprechend der Ausgleichsgerade, welche durch Anpassung an die Daten der Wegaufnehmer ermittelt wurde, heranzuziehen, da diese auf den real beobachteten Daten basiert und unabhängig der parallel durchgeführten Stahlversuche ist. Diese Ausgleichsgerade stellt eine lineare, mittlere Korrekturfunktion über die Höhe dar und wird im Rahmen der Unschärfen in der Korrektur des Maschinenweges zur weiteren Beurteilung der Kraft-Verformungs- bzw. Spannungs-Dehnungsbeziehung herangezogen. Die Gleichung dieser Korrekturfunktion ist in Gl. (3.6) dargelegt.

$$w_{kor}(F) = w(F) - \underbrace{A(H) \cdot F}_{Weg_{Maschine}} \quad (3.6)$$

Dabei sind:

$w_{kor}(F)$...um den Maschinenweg abhängig von der Kraft F korrigierter Weg [mm]

F Kraft [N]

$w(F)$ Weg abhängig von der Kraft [mm]

$A(H)$Parameter A, abhängig von der Prüfkörperlänge bzw. -höhe H [-]

H Prüfkörperlänge bzw. -höhe H [mm]

Wie allerdings erst später unter Abschnitt 4-4.1 dargelegt, da erst im Rahmen der Untersuchungen an BSH und BSP erkannt, handelt es sich bei der hier angewandten linearen Skalierung bedingt um eine Vereinfachung. Der Vergleich der Stauchungen im oberen, mittleren und unteren Drittel der Prüfkörperlänge zeigt hier insbesondere für teilflächig belastete Prüfkörper mit, im Verhältnis zum Querschnitt, relativ kleinen Lasteinleitungsflächen höhere Werte im Bereich der Lasteinleitung bzw. des Auflagers, wodurch eine lineare Skalierung der Stauchung bestimmt im mittleren Bereich der Prüfkörper zu einer geringfügigen Unterschätzung der Gesamtstauchung führt, wobei angenommen werden kann, dass sich dieser Effekt bei vollflächig beanspruchten Proben in vernachlässigbarer Größenordnung darstellen wird. Da, wenn auftretend, anzunehmen ist, dass die Zonen erhöhter Stauchung ein absolutes und nicht relatives Maß der jeweiligen Prüfkörperlänge betragen ist somit auch, in geringfügigem Ausmaß, eine Abhängigkeit der Ergebnisse, basierend auf einer linearen Skalierung, seitens der Prüfkörperlänge zu erwarten. Näheres dazu unter Abschnitt 4-4.1.

3-4 PRÜFDATENAUSWERTUNG DER BRETTABSCHNITTE

3-4.1 ALLGEMEINES

Die Prüfdatenauswertung bezieht sich auf die global gemessenen „Zwick“-Datensätze. An Stellen wo „Cat“-Datensätze verwendet werden ist dies explizit angeführt.

3-4.2 PRÜFDATENAUFBEREITUNG

Aus den vorliegenden Prüfdaten lässt sich eine Prüfkurve als Kraft-Weg Diagramm erstellen. Diese diskrete Prüfkurve beinhaltet jedoch noch die gesamte Hystereseschleife und ist mit einem gewissen Messrauschen behaftet. Die Prüfkurve lässt sich in drei Bereiche aufteilen: Dem ersten Belastungsast, gefolgt vom ersten Entlastungsast und dem zweiten Belastungsast mit sukzessiver Steigerung der Verformung (Stauchung) bis Prüfende. Wie bereits zuvor dargelegt, konzentriert man sich im Weiteren auf den zweiten Belastungsast.

Für die Entfernung der Hystereseschleife wurden schrittweise zuerst der erste Be- und dann der erste Entlastungsast aus den Daten entfernt. Dazu wurden die Kraftinkremente bestimmt. Um das Messrauschen quasi zu filtern wurde für die Bestimmung des Kraftinkrements ein Abstand von 15 Messpunkten (3 s Prüfdauer) gewählt; siehe Gl. (3.7). In einer Schleife wurde das Ende des ersten Belastungsastes mit dem Kriterium 1, Kraftinkrement kleiner Null, bestimmt; siehe Gl. (3.8). Das heißt, dass das Kraftinkrement negativ wird und man sich somit im Entlastungsast befindet. Dadurch erhält man einen Index im Bereich des Beginns des Entlastungsastes.

$$F_{j,ink} = F_i - F_{i+15} \quad (3.7)$$

$$\text{Kriterium 1: } F_{j,ink} < 0 \quad (3.8)$$

$$\text{Kriterium 2: } F_{j,ink} > 0 \quad (3.9)$$

Dabei sind:

$F_{j,ink}$ j -tes Kraftinkrement [N]

F_i Kraft bei Index i [N]

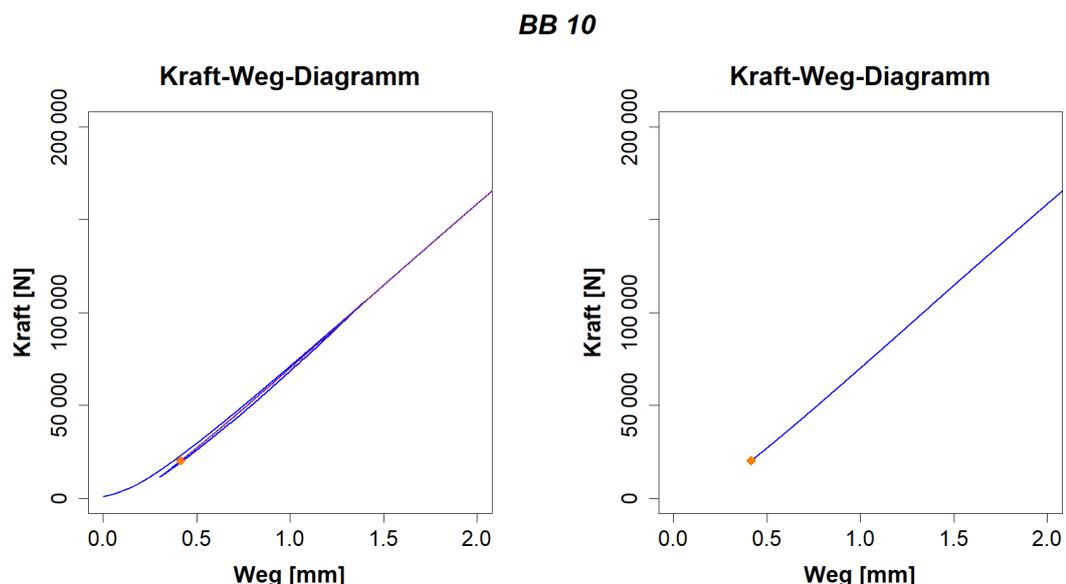


Abbildung 3-18: Entfernung des ersten Be- und Entlastungsastes, am Beispiel von Prüfung BB 10

Mit den Daten ab diesem Index wurden nun erneut mit derselben Vorgehensweise die Kraftinkremente bestimmt. Dieses Mal wurde in der Schleife jedoch das Kriterium 2, Kraftinkrement größer Null, verwendet; siehe Gl. (3.9). Dadurch gelangte man an den Anfangsbereich des zweiten Belastungsastes, jenen Bereich ab dem die Messkurve als Basis für die weitere Auswertung beginnt. Zusätzlich wurden zu diesem Index noch 50 Messpunkte (10 s Prüfdauer) hinzugefügt um eine bessere Stabilität gegen das Messrauschen über die unterschiedlichen Versuche zu erhalten. Dies ist in Abbildung 3-18 zu sehen.

3-4.3 ANWENDUNG DER MASCHINENWEGKORREKTUR

Die in Kapitel 3-3 beschriebene Maschinenwegkorrektur kommt nun zur Anwendung. Dabei wird der Eigenverformungsanteil des Prüfgerüsts einschließlich Prüfaufbau aber ohne den Prüfkörper selbst mit der linearen Korrekturfunktion errechnet und vom Weg der Prüfkurve subtrahiert. Dadurch ergibt sich die korrigierte Prüfkurve. Dies ist im Kraft-Weg-Diagramm der Abbildung 3-19 zu sehen.

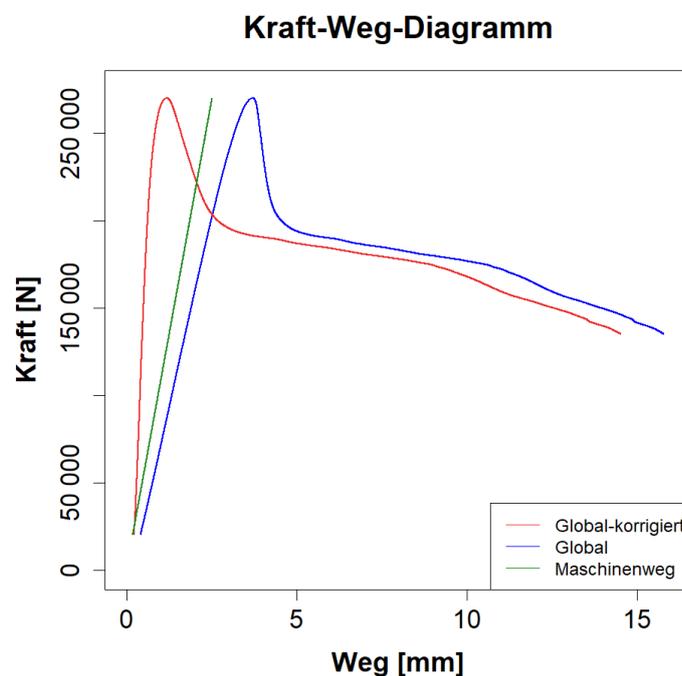


Abbildung 3-19: Unkorrigierte und korrigierte Prüfkurve, am Bsp. von BB 10

Dabei ist die unkorrigierte Prüfkurve in blau dargestellt, der Anteil Prüfgerüst und Prüfaufbau in grün und die korrigierte Prüfkurve, mit dem Ziel allein die Arbeitslinie des Prüfkörpers zu erfassen, in rot. Die Änderung der Steigung und die damit verbundene Auswirkung der Maschinenwegkorrektur auf den Druck-E-Modul längs zur Faser sind hier klar ersichtlich.

3-4.4 DRUCK-ELASTIZITÄTSMODUL UND -FESTIGKEIT

3-4.4.1 Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung

Die Festigkeit wurde durch Division der maximalen Kraft durch die Fläche des Querschnittes der jeweiligen Prüfung ermittelt; siehe Gl. (3.10).

$$f_{c,0} = \frac{F_{max}}{b \cdot h} \quad (3.10)$$

Dabei sind:

- $f_{c,0}$ Druckfestigkeit in Faserrichtung [N/mm²]
- F_{max} maximale Kraft [N]
- b Querschnittsbreite [mm]
- h Querschnittshöhe [mm]

3-4.4.2 Druck-E-Modul parallel zur Faserrichtung nach EN 408

Für die Bestimmung des Druck-E-Moduls in Faserrichtung nach der entsprechenden Prüfnorm ÖNORM EN 408 [32] wurde die Kraft bei 10 % und 40 % der Bruchlast sowie der dazugehörige Weg ermittelt. Die weitere Berechnung erfolgte gemäß Gl. (3.11) (vgl. [32]):

$$E_{c,0,Norm} = \frac{l_1(F_{40} - F_{10})}{b \cdot h \cdot (w_{40} - w_{10})} \quad (3.11)$$

Dabei sind:

- $E_{c,0,EN}$ Druck-E-Modul nach EN 408 [32] [N/mm²]
- l_1 Messbasis [mm]
- F_{40} Kraft bei 40 % der maximalen Kraft [N]
- F_{10} Kraft bei 10 % der maximalen Kraft [N]
- b Querschnittsbreite [mm]
- h Querschnittshöhe [mm]
- w_{40} Weg bei 40 % der maximalen Kraft [mm]
- w_{10} Weg bei 10 % der maximalen Kraft [mm]

3-4.4.3 Druck-E-Modul parallel zur Faserrichtung gemäß Regression im linearen Bereich

Um einen Druck-E-Modul in Faserrichtung zu bestimmen welcher innerhalb eines individuellen Auswertebereiches sich an die Steigung der jeweiligen Prüfkurve anpasst wurde ein eigenes Kriterium zur Abgrenzung des zugehörigen Messdatenbereiches definiert. Dabei wurde eine einfache lineare Regressionsgerade in den augenscheinlich bzw. per Definition bestimmten linearen Bereichs der Prüfkurve im zweiten Belastungsast gelegt. Das Ziel war, die Grenzen des linearen Bereichs angepasst für jede Prüfkurve automatisiert und anhand der Ableitung der Prüfkurve (Kraftinkremente je Zeitschritt vs. Weg) zu bestimmen. Ein entsprechendes Kriterium zur Bestimmung der Grenzen des linearen Bereichs wurde über ein Maß der Steigungsänderung in Bezug auf ihren Ausgangspunkt, der maximalen Steigung je Prüfkurve, gefunden. Im Folgenden wird die dazu angewandte Vorgehensweise näher erläutert:

Zu Beginn wurde das Kraft- und Weginkrement bestimmt. Aus diesen beiden konnte die Steigung ermittelt werden. Zwecks Reduktion des Messrauschens wurde die Steigung und das Kraftinkrement durch einen gleitenden Mittelwert über die letzten zehn Messdaten (2 s Prüfdauer) geglättet. Um nun die Grenzen des linearen Bereichs zu ermitteln, wurde, ausgehend von dem gemittelten, maximalen Kraftinkrement, in beide Richtungen Schleifen mit dem folgenden Kriterium erstellt:

$$\left| \frac{\bar{S}_{i,\Delta F_{max}} - \bar{S}_i}{\bar{S}_{i,\Delta F_{max}}} \right| > \eta \quad (3.12)$$

Dabei sind:

- $\bar{S}_{i,\Delta F_{max}}$... mittlere Steigung bei max. Kraftinkrement [N/mm]
- \bar{S}_i mittlere Steigung [N/mm]
- η Parameter η [-]

Der dazu verwendete Parameter η wird im Kapitel 3-4.7 noch eingehend behandelt.

Im nächsten Schritt wurde innerhalb des linearen Bereichs eine einfache lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Der Druck-E-Modul in Faserrichtung ergibt sich nun durch das Verhältnis der Prüfkörperlänge zur Querschnittsfläche und der Steigung der Regressionsgeraden; siehe Glg. (3.13) und (3.14):

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})(F_i - \bar{F})}{\sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2} \quad (3.13)$$

$$E_{c,0,Reg} = \frac{l_1}{b \cdot h} \cdot \beta \quad (3.14)$$

Dabei sind:

- β Steigung der Regressionsgerade [N/mm²]
- w_i Weg bei Index i [mm]
- \bar{w} Mittelwert des Weges [mm]
- F_i Kraft bei Index i [N]
- \bar{F} Mittelwert der Kraft [N]
- $E_{c,0,Reg}$ Druck-E-Modul in Faserrichtung, bestimmt mittels Regressionsanalyse [N/mm²]
- l_1 Messbasis, hier definiert über die Prüfkörperlänge [mm]
- b Querschnittsbreite [mm]
- h Querschnittshöhe [mm]

In Abbildung 3-20 ist am Beispiel von Prüfung BB 10 das Kraft-Weg Diagramm und das Kraftinkrement-Weg Diagramm dargestellt. Dabei ist der lineare Bereich, innerhalb dem der Druck-E-Modul ermittelt wird, mit grünen Kreuzen markiert. Das maximale Kraftinkrement, welches als Ausgangspunkt dient, ist mit einem grünen Punkt markiert. Jener Bereich in dem der Druck-E-Modul nach EN 408 [32] ermittelt wird ist mit orangen Kreuzen markiert.

BB-korrigiert 10

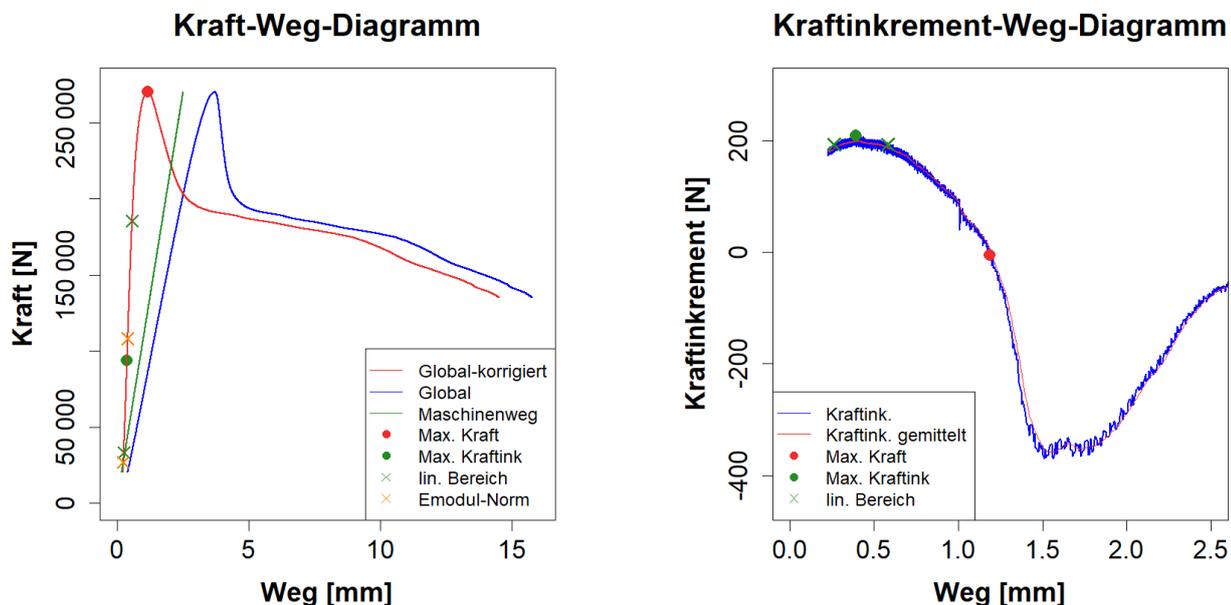


Abbildung 3-20: Korrigierte Prüfkurve einschließlich Bereichsmarkierungen zur Ermittlung des Druck-E-Moduls (links) und die abgeleitete, korrigierte Prüfkurve, am Bsp. von BB 10

3-4.5 PRÜFUNGEN MIT KRAFTGESTEUERTER LASTAUFBRINGUNG

Wie bereits erwähnt, wurden die Prüfungen 02 - 14 der Prüfreihe L40 mit kraftgesteuerter Lastaufbringung geprüft. Die Kraft kann dabei, bedingt durch das verwendete Prüfgerüst, maximal mit einer Prüfgeschwindigkeit von 500 mm/min aufgebracht werden. Die Motivation zur Durchführung kraftgesteuerter Prüfungen ist durch die grundsätzliche praktische Relevanz ausreichend gegeben. Trotz dieses Umstandes werden zur besseren Abbildung der Arbeitslinie und Stabilität des Prüfprozesses üblicherweise weggesteuerte Prüfungen durchgeführt. Zur Überprüfung möglicher Unterschiede im Arbeitsverhalten zwischen weg- und kraftgesteuerten Prüfungen, welche zudem sich auch in den Parametern des an die Prüfdaten angepassten mathematischen Modells widerspiegeln sollten, wurde die genannte Kleinserie geprüft.

Augenscheinlich zeigt sich bei kraftgesteuerter Lastaufbringung ein anderer Verlauf der Arbeitslinie als bei weggesteuerten Prüfungen. Vor allem der Entfestigungsbereich unterscheidet sich deutlich. Aber auch der Verlauf der restlichen Prüfkurve ist von der kraftgesteuerten Lastaufbringung beeinflusst. Die kraftgesteuerte Prüfung führt in Folge zu unterschiedlichen Weginkrementen, sodass das zuvor besprochene Kriterium zur Abgrenzung des quasi linearen Bereiches, welches von weggesteuerten Prüfungen abgeleitet wurde, versagt. Deshalb musste bei diesen 13 Versuchen manuell in die Datenauswertung eingegriffen werden. Der quasi lineare Bereich wurde in Folge augenscheinlich mit Hilfe des Verlaufs der Kraftinkremente vs. Weg individuell bestimmt.

3-4.6 VERGLEICH VON „ZWICK“- UND „CAT“-DATEN

Da sich die Prüfdatenauswertung bisher nur auf die global gemessenen „Zwick“-Datensätze bezog, werden nun, im Vergleich dazu, die lokal gemessenen „Cat“-Datensätze behandelt. In weiterer Folge wird zwischen einem globalen und einem lokalen Druck-E-Modul in Faserrichtung unterschieden. Der globale Druck-E-Modul basiert auf den global gemessenen Stauchungen des „Zwick“-Datensatzes, ermittelt nach entsprechender Maschinenwegkorrektur. Im Gegensatz dazu wurde der lokale Druck-E-Modul anhand der lokal mittels DD1 gemessenen Stauchungen gemäß der „Cat“-Datensätze ermittelt.

Wie schon in Kapitel 3-3.3 beschrieben, wurden die Daten der vier Wegaufnehmer hochskaliert, horizontal verschoben und gemittelt. Diese Prüfkurve der „Cat“-Datensätze durchläuft nun alle Schritte wie die Prüfkurve der „Zwick“-Datensätze (siehe Abschnitt 3-4.2 und Abschnitt 3-4.4). In der Bestimmung der lokalen und globalen Druck-E-Module basierend auf individuell festgelegten Regressionsbereichen, $E_{c,0,Reg,lok}$ und $E_{c,0,Reg,glob}$ war es notwendig, den Parameter η entsprechend anzupassen; siehe Abschnitt 3-4.7.

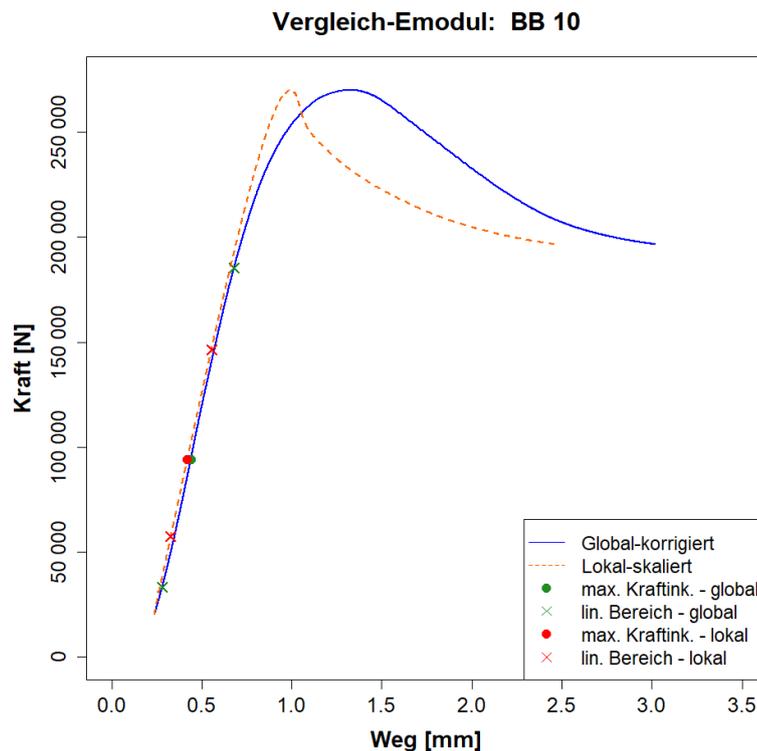


Abbildung 3-21: Vergleich der lokalen und globalen Prüfkurven sowie deren Druck-E-Moduln

In Abbildung 3-21 sind die beiden unterschiedlichen Prüfkurven derselben Prüfung dargestellt. Durch die Maschinenwegkorrektur der globalen Daten und die Skalierung der lokalen Daten stimmen beide Kurven im linear ansteigenden Bereich weitgehend überein. Differenzen sind u.a. auf eine unterschiedliche Auflösung in der Signalaufzeichnung und den damit einhergehenden unterschiedlichen Inkrementen, welche wiederum eine Abweichung des Parameters η zu Folge haben, zurückzuführen.

Weiters ist noch zu erkennen, dass sich der nichtlineare Bereich beider Kurven stark unterscheidet. Begründet wird dies dadurch, dass die lokalen Messbasen auf die Prüfkörperlänge hochskaliert wurden. Da zentral, im mittleren Bereich der Prüfkörperlänge angebrachte Wegaufnehmer die lokalen Stauchungen aufzeichneten, ist diese von den Stauchungen in den Randzonen, welche als stärker ausgeprägt gelten, nicht betroffen, die globale Prüfkurve jedoch schon. Es wird vermutet, dass diese Stauchungen vor allem auf den nichtlinearen Bereich der Arbeitslinie Auswirkungen haben, was eine plausible Erklärung der Abweichungen der beiden Kurven im nichtlinearen Bereich ergäbe; Nähere Erkenntnisse dazu unter Abschnitt 4-4.1. Dieser Umstand ist jedoch wenig von Bedeutung, da für die Findung und Optimierung eines mathematischen Modells nur „Zwick“-Datensätze verwendet werden.

3-4.7 VERGLEICH DER DRUCK-E-MODULN

Um den Parameter η aus Gl. (3.12) und seine Auswirkung auf den Druck-E-Modul besser einschätzen zu können, wurde eine Vergleichsstudie zwischen den E-Moduln nach ÖNORM EN 408 [32], basierend auf fixen Regressionsgrenzen, und den E-Moduln bestimmt mittels variablen Grenzen, unter Variation des Parameters η , als Basis zur automatisierten Festlegung der Regressionsgrenzen, durchgeführt. Die Ergebnisse daraus sind als Boxplot, mit je einem Diagramm für den lokalen und globalen Druck-E-Modul, aufgetragen, welche in Abbildung 3-22 beispielhaft dargestellt sind. Der Druck-E-Modul nach ÖNORM EN 408 [32] ist per Definition durch fixe Grenzen konstant und in diesen Diagrammen als horizontale Linie eingetragen. Die Wahl des Parameters η erfolgte subjektiv und durch visuelle Kontrolle der in Folge automatisiert bestimmten linearen Regressionsgrenzen an einzelnen Datensätzen. Bei der Entscheidungsfindung wurde mit den Grenzen und Werten der ÖNORM EN 408 [32] verglichen, die adäquate Repräsentanz, im Sinne der Abdeckung des augenscheinlich linearen Bereichs, war dabei

allerdings vorrangig. Dabei konnten beim globalen Druck-E-Modul gute Ergebnisse erzielt werden, d.h., der Parameter η führte zu homogenen, stabilen Ergebnissen. Beim lokalen Druck-E-Modul waren die Ergebnisse bei vereinzelt Prüfkurven durchaus heterogen und instabil, d.h., der lineare Bereich war zum Teil äußerst klein bzw. groß.

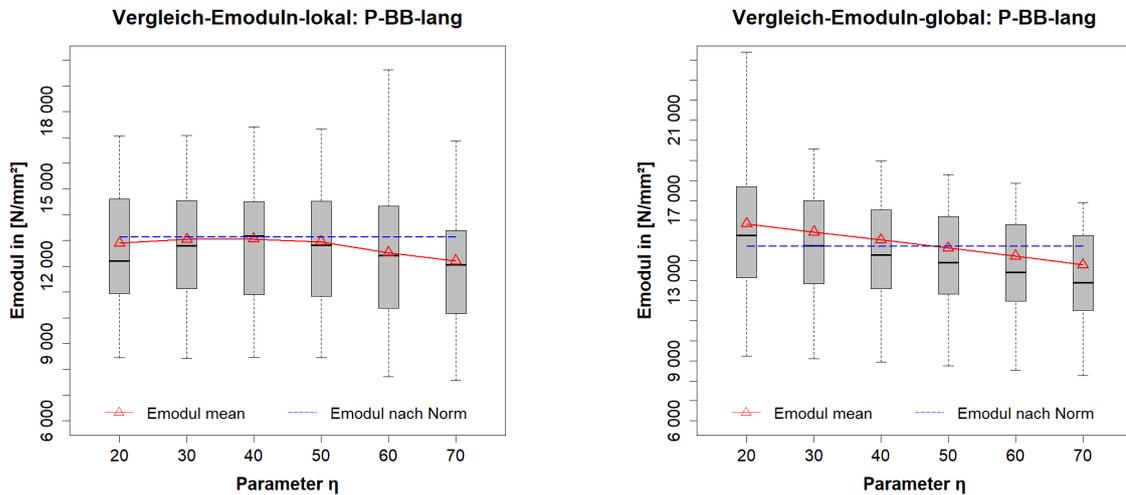


Abbildung 3-22: links: Vergleich der lokalen Druck-E-Moduln, rechts: Vergleich der globalen Druck-E-Moduln

Die ausgewählten Werte für den Parameter η und die zugehörigen Vergleichsstudien sind für alle Prüfreihe dem Kapitel 4-3.1 sowie dem Anhang C-1 zu entnehmen.

3-4.8 DEFINITION UND KALIBRIERUNG EINES MATHEMATISCHEN MODELLS

Um eine stetig beschreibbare Funktion einer Prüfkurve im Sinne einer Arbeitslinie zu erhalten ist es bei Fehlen eines entsprechenden mechanischen Modells notwendig ein mathematisches Modell zu finden, welches diese bestmöglich beschreibt. Auf Basis der Literaturrecherche kamen dafür zwei Modelle in Frage. Beide Modelle, jenes von Glos [30] (Abschnitt 2-4.1) und jenes von Brandner et al. [31] (Abschnitt 2-4.2), benötigen, neben den aus den Prüfungen direkt ermittelbaren Parametern, noch zusätzlich einen Formparameter, welcher durch Anpassung der Funktion an die Prüfdaten individuell ermittelt werden muss. Dies entspricht einer Kalibrierung des jeweiligen Modells an die Prüfdaten.

3-4.8.1 Vergleich der beiden Modelle

Bei Betrachtung der Modelle nach Glos [30] und Brandner et al. [31] ist sofort ersichtlich, dass jenes nach Glos auf einer Spannungs-Dehnungsbeziehung und das adaptierte Modell von Brandner auf einer Kraft-Weg Beziehung basiert, wobei beide Modelle, unter Kenntnis der entsprechenden geometrischen Kenngrößen, auf ein vergleichbares Niveau umgerechnet werden können.

Parameter die in beiden Modellen verwendet werden und aus den Prüfdaten direkt ermittelt werden können sind Elastizitätsmodul, Druckfestigkeit und Bruchdehnung bzw. Verschiebungsmodul, maximale Kraft und Weg bei maximaler Kraft. Weiters wird noch in beiden Modellen die Glos-Konstante, bzw. die adaptierte Glos-Konstante verwendet, welche den angesprochenen Formparameter darstellt. Unterschiede zwischen den beiden Modellen ergeben sich in den zusätzlich verwendeten bzw. nicht verwendeten Parametern. Das Modell nach Glos basiert auf der Annahme einer asymptotischen Endfestigkeit. Für das adaptierte Glos Modell sind die zusätzlichen Parameter (i) der Weg der Anfangsverschiebung und (ii) der Weg am Ende des linearen Bereichs. Beide Letztgenannten können wieder direkt aus den Prüfungen ermittelt werden. Folglich weist das adaptierte Glos Modell nach Brandner im Gegensatz zum Ursprungmodell eine Anfangsverschiebung sowie einen definitiven linearen Bereich auf.

Aufgrund dieser Unterschiede wurde das adaptierte Glos Modell für die weiteren Analysen gewählt. Vor allem ist die asymptotische Endfestigkeit beim Modell nach Glos nur sehr wagen definiert und auch versuchstechnisch nur bedingt abschätzbar bzw. zu beobachten. Einziger Nachteil beim adaptierten Glos Modell ist, dass auch dieses Modell zu einem asymptotischen Endwiderstand konvergiert welcher, per Definition des Modells, der oberen Grenze des im Zuge des Modells definierten linear-elastischen Bereichs entspricht. Der Grund dafür ist die Entfestigung gegen Null innerhalb der am Ende des linear-elastischen Bereiches ansetzenden Glos Funktion.

Um den Nachteil des adaptierten Glos Modells, also die asymptotische Konvergenz zur oberen Grenze des linearen Bereiches, zu beseitigen, wurden weitere Adaptionen vorgenommen, welche zu einem weiteren Modell führten. Dieses neu adaptierte Modell entfestigt nun gegen den Ursprung, also Null. In der Anwendung stellte sich allerdings rasch heraus, dass dieses Modell zu schnell entfestigt und daher für eine weitere Betrachtung nicht in Frage kommt. Das neu adaptierte Modell ist in Abbildung 3-23 und den Gleichungen (3.15) bis (3.21) dargelegt.

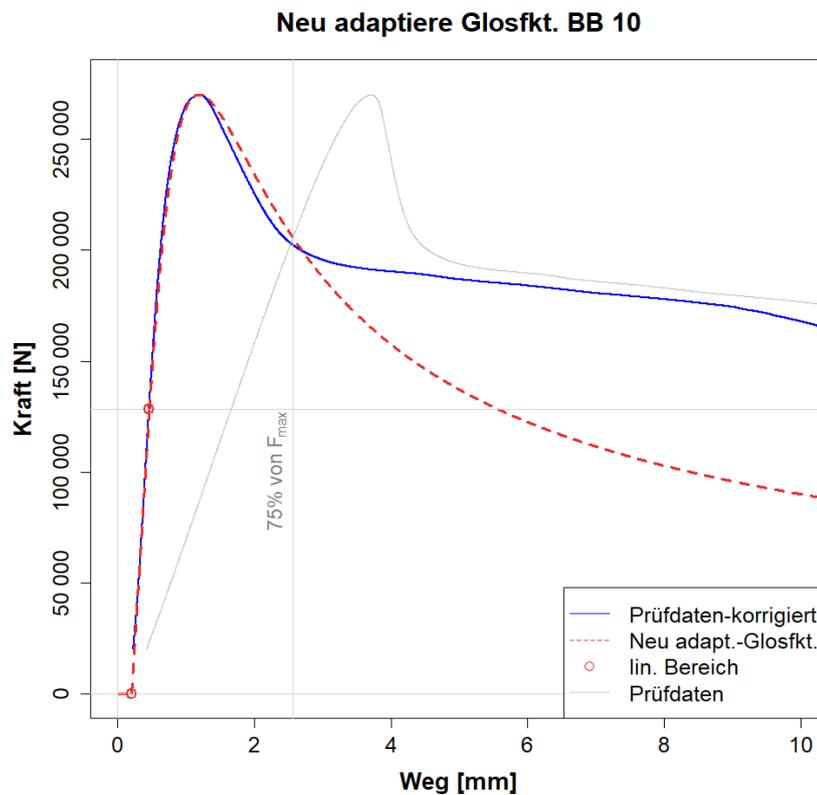


Abbildung 3-23: Neu adaptiertes Glos Modell

$$F_{ax}(w) = \begin{cases} 0 & \text{für } w \leq w_{ini} \\ k_{ser} \cdot w + \Delta F & \text{für } w_{ini} \leq w \leq w_{lin} \\ \frac{w_x + k_0 \cdot w_x^c}{k_1 + k_2 \cdot w_x + k_3 \cdot w_x^c} + (k_{ser} \cdot w_{lin} + \Delta F) & \text{für } w \geq w_{lin} \end{cases} \quad (3.15)$$

mit:

$$w_x = w - w_{lin} \text{ und } \Delta F = -k_{ser} \cdot w_{ini} \quad (3.16)$$

$$F_{asym} = -k_{ser} \cdot (w_{lin} - w_{ini}) \quad (3.17)$$

und den Koeffizienten:

$$k_0 = \frac{F_{asym}}{(c-1) \cdot k_{ser} \cdot (w_f - w_{lin})^c \cdot \left(1 - \frac{F_{asym}}{F_{max} - (k_{ser} \cdot w_{lin} + \Delta F)}\right)} \quad (3.18)$$

$$k_1 = \frac{1}{k_{ser}} \quad (3.19)$$

$$k_2 = \frac{1}{F_{max} - (k_{ser} \cdot w_{lin} + \Delta F)} - \frac{c}{(c-1) \cdot k_{ser} \cdot (w_f - w_{lin})} \quad (3.20)$$

$$k_3 = \frac{1}{(c-1) \cdot k_{ser} \cdot (w_f - w_{lin})^c \cdot \left(1 - \frac{F_{asym}}{F_{max} - (k_{ser} \cdot w_{lin} + \Delta F)}\right)} \quad (3.21)$$

Dabei sind:

- F Kraft [N]
- F_{max} maximale Kraft [N]
- F_{asym} asymptotische Kraft [N]
- k_{ser} Verschiebungsmodul [N/mm]
- w Weg [mm]
- w_x Weg ab w_{lin} [mm]
- w_f Weg bei maximaler Kraft [mm]
- w_{lin} Weg am Ende des lin.-elast. Bereichs [mm]
- w_{ini} Weg durch Anfangsverschiebung [mm]
- c adaptierte Glos-Konstante [-]

3-4.8.2 Kalibrierung des gewählten Modells

Zu Beginn wurden die Eingangskenngrößen für das adaptierte Glos Modell nach Abschnitt 2-4.2 bestimmt. Dabei wurden F_{max} sowie der zugehörige Weg w_f bereits ermittelt. Für w_{lin} wurde das Ende des linear-elastischen Bereichs, welches im Zuge der Bestimmung des E-Moduls mittels Regressionsgerade gemäß Abschnitt 3-4.4.3 ermittelt wurde, übernommen. Zudem wurde eine Schranke eingeführt, damit die Kraft am Ende des linearen Bereichs kleiner ist als 95 % der Kraft am Ende der Prüfkurve, des letzten Messpunktes. Dadurch wird eine Kalibrierung des adaptierten Glos Modells mit einer entsprechenden asymptotischen Annäherung an das Ende der Prüfkurve sichergestellt. Der Parameter w_{ini} ergab sich aus dem Weg gemäß linearem Bereich bei $F = 0$. Die Steifigkeit bzw. der Verschiebemodul k_{ser} entspricht der Steigung im linearen Bereich, welcher dem Parameter β des Regressionsmodells in diesem Bereich entspricht; siehe Gl. (3.13). Die Steigung lässt sich auch aus dem Druck-E-Modul rückrechnen, indem man diesen mit der Querschnittsfläche multipliziert und durch die Messbasis bzw. Bezugslänge dividiert.

Die Kalibrierung des Modells selbst erfolgte bei den weggesteuerten Prüfungen durch eine Anpassung der, über das adaptierte Glos Modell errechneten Kraft, an die empirisch ermittelte Kraft der jeweiligen Prüfkurve. Hier wurde wieder die „optim“-Funktion aus R, kombiniert mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate, verwendet. Das Ergebnis dieses Vorgangs wird in Abbildung 3-24 beispielhaft dargestellt.

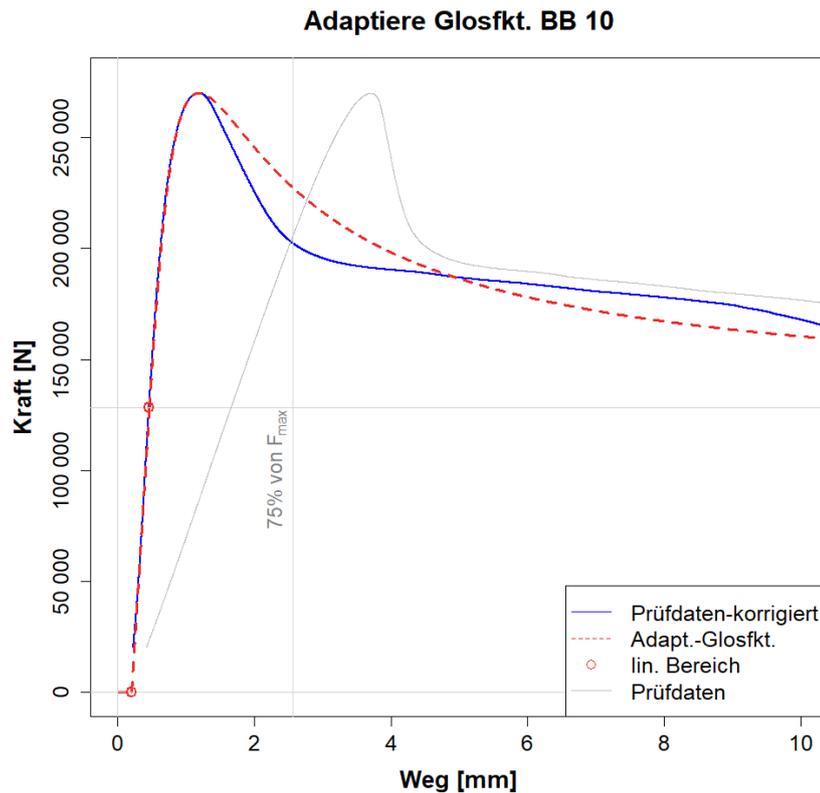


Abbildung 3-24: Anpassung der adaptierten Glos-Funktion an die korrigierte Prüfkurve, am Bsp. BB 10

Für die Kalibrierung der kraftgesteuerten Prüfungen war eine Gewichtung zwischen den Messpunkten vor und nach der Maximallast notwendig. Der Grund dafür ist, dass es bei kraftgesteuerten Prüfungen nach der Maximallast nur noch zu einer sehr geringen Anzahl an Messpunkten kommt und durch dieses Ungleichgewicht die Kalibrierung verfälscht werden würde. Die Gewichtung erfolgte gleichzeitig mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate nach Gl. (3.22).

$$\sum_{i=0}^{i,F_{max}} (F_{emp,i} - F_{Modell,i})^2 + \sum_{i=0}^{i,F_{max}} \varphi \cdot (F_{emp,i} - F_{Modell,i})^2 \stackrel{!}{=} 0 \quad (3.22)$$

Dabei sind:

$F_{emp,i}$gemessene Kraft bei Index i [N]

$F_{Modell,i}$...Kraft gemäß mathematischem Modell bei Index i [N]

i, F_{max}Index bei maximaler Kraft [-]

φVerhältnis der Messpunkte vor und nach Erreichen der maximalen Kraft [-]

3-4.9 AUSWERTUNG DER DATEN

3-4.9.1 Allgemeines

Die bisher gesammelten Daten sollen nun statistisch aufbereitet und ausgewertet werden. Dabei sind alle zugrunde liegenden und als wesentlich erachteten Daten im Anhang C-2 zu finden. Weiters sind die ausgewerteten Datensätze pro Prüfreihe im Kapitel 4-3 zu finden.

3-4.9.2 Feuchtekorrektur

Die Feuchtekorrektur wurde bereits in Abschnitt 2-1.4 behandelt und erfolgt nach den dort angeführten Gleichungen für die Rohdichte, Gl. (2.7), die Druck-Festigkeit in Faserrichtung, Gl. (2.5), und den Druck E-Modul in Faserrichtung, Gl. (2.6).

3-4.9.3 Zu ermittelnde Kenngrößen und Beseitigung von Extremwerten

Die zu ermittelnden Kenngrößen sind in zwei Gruppen aufzuteilen: Zum einen in Grundkenngrößen, welche das Material charakterisieren, wie die Holzfeuchte, die Rohdichte, die Druckfestigkeit in Faserrichtung und der lokale Druck-E-Modul in Faserrichtung (alle bezogen auf eine Holzfeuchte von 12 %), zum Anderen in Kenngrößen, welche als Eingangsparameter für das mathematische Modell dienen, wie die maximale Kraft $F_{max,u}$, der zugehörige Weg bei maximaler Kraft w_f , das Ende des linearen Bereichs w_{lin} , die Anfangsverschiebung w_{ini} und der Formparameter c .

Diese Kenngrößen wurden grafisch dargestellt um qualitativ, visuell einen raschen Überblick über die Daten zu erhalten und potentielle Extremwerte zu identifizieren; siehe Abbildung 3-25. Im Falle eines Extremwertes in den Eingangsparametern für das mathematische Modell wurden i.d.R. alle Kenngrößen des Modells der jeweiligen Prüfung verworfen. Dies ist in den entsprechenden Tabellen im Anhang C-2 vermerkt bzw. an der abweichenden Anzahl an Prüfungen als Basis für die einzelnen Statistiken im Verhältnis zur gesamten Prüfkörperanzahl zu erkennen.

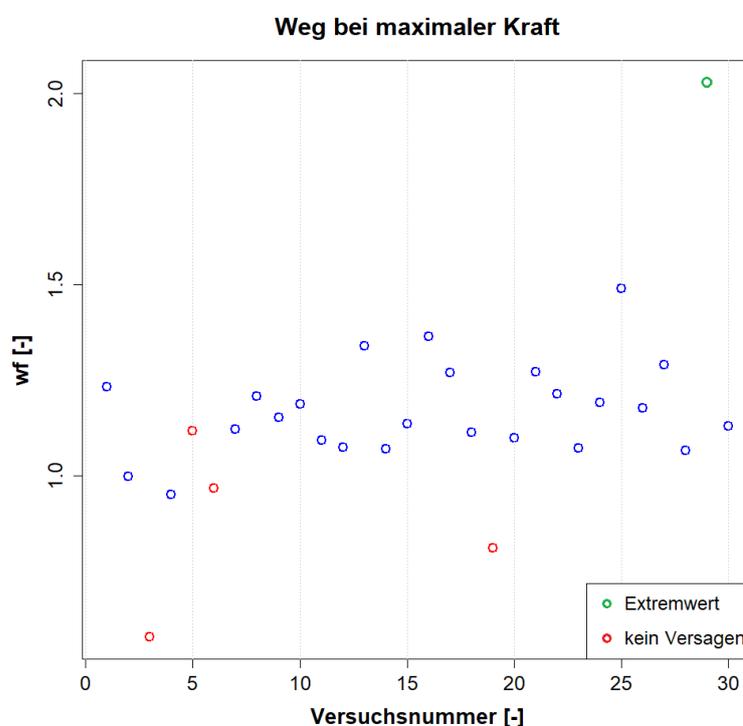


Abbildung 3-25: Visualisierung der Daten für einen qualitativen Überblick und Identifizierung möglicher Extremwerte, am Bsp. der Prüfreihe BB-lang und Kenngröße w_f

Prüfungen, bei welchen es zu keinem Versagen der Probekörper aufgrund des vorzeitigen Erreichens der maximalen Kapazität des Prüfgerüsts kam, wurden für die Ermittlung der Parameter des mathematischen Modells ausgeschlossen. Obwohl gerade auch jene Prüfkörper im oberen Verteilungsbereich der Druckfestigkeit parallel zur Faser interessant wären, ist deren Ausscheiden aus der Analyse damit begründet, dass kein vollständiger Parametersatz von diesen Prüfungen aufgrund einer unvollständigen Arbeitslinie ermittelbar ist. Weiters müssen diese Daten für die Grundkenngröße Festigkeit als rechtszensiert betrachtet werden, mehr dazu in Abschnitt 3-4.9.5.

3-4.9.4 Bestimmung des theoretischen Verteilungsmodells

Für die weitere Bearbeitung der Parameter und ihrer zugehörigen statistischen Kenngrößen, z.B. im Rahmen einer weiterführenden stochastischen Modellbildung, ist es zielführend, die den Daten zugrunde liegende Verteilung zu kennen bzw. ein dahingehendes repräsentatives, theoretisches Verteilungsmodell

zu bestimmen. Aufgrund der vorliegenden Erfahrungen wurden die empirischen Daten auf eine Normalverteilung (kurz: NV) und eine logarithmische Normalverteilung (kurz: LNV) hin überprüft. Die Überprüfung selbst erfolgte qualitativ über visuelle Bewertung der Daten in QQ-Plots sowie quantitativ auf Basis des Shapiro-Wilk-Anpassungstests; siehe Abbildung 3-26 und Abbildung 3-27.

Der Shapiro-Wilk-Anpassungstest ist auf die Überprüfung der Normalverteilungsannahme spezialisiert und weist eine, im Vergleich zu vielen anderen Anpassungstests, besonders große Macht auf. Aufgrund der einfachen Transformationsvorschrift zwischen der Normal- und der Lognormalverteilung ist dieser Anpassungstest auch analog zur Überprüfung der Lognormalverteilungsannahme anwendbar. Beim Shapiro-Wilk-Anpassungstest besagt die Nullhypothese H_0 , dass eine Normalverteilung vorliegt, wohingegen die Alternativhypothese H_1 besagt, dass keine Normalverteilung vorliegt. Kann bei dem vorliegenden Test eine Signifikanz ($p < 0,05$) festgestellt werden, so liegt demnach keine Normalverteilung vor. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei einem p -Wert größer 0,05 H_0 nicht abgelehnt werden kann. Bei den in Abbildung 3-26 und Abbildung 3-27 angeführten Werten handelt es sich um p -Werte, welche in beiden Fällen deutlich über 0,05 liegen und somit in beiden Fällen die getätigten Verteilungsannahmen stützen, wobei im gezeigten Beispiel zur Druckfestigkeit die Annahme der Normalverteilung (links) stärker gestützt wird als jene der Lognormalverteilung (rechts).

Festigkeit

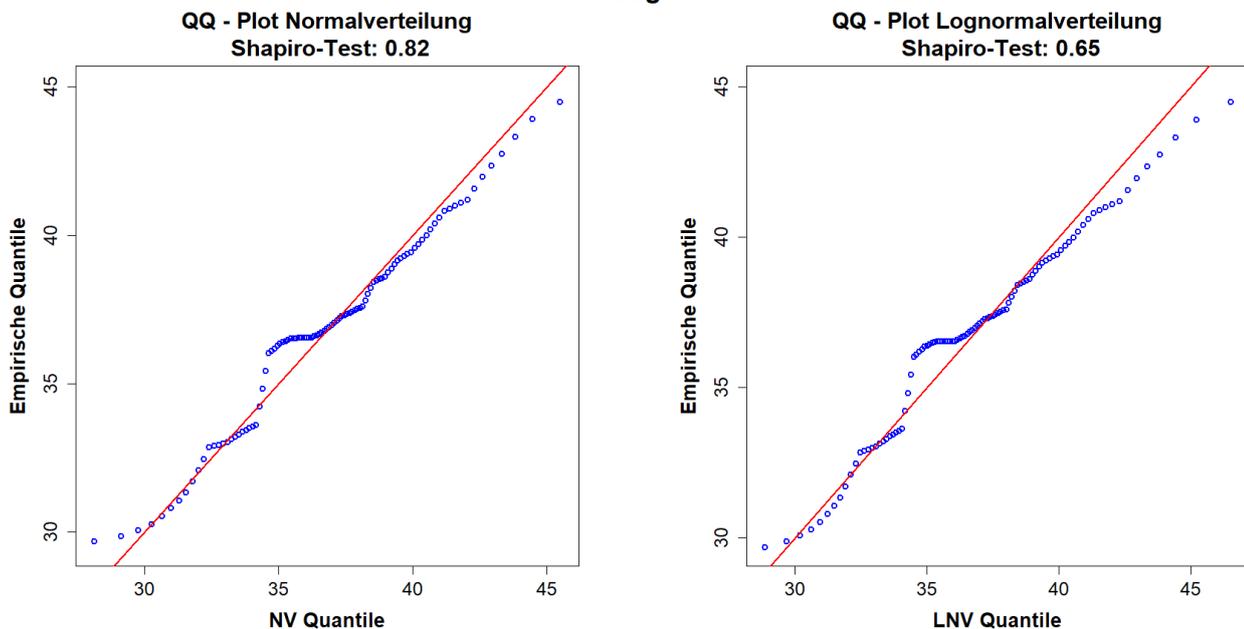


Abbildung 3-26: *QQ-Plots und Shapiro-Testergebnis für NV (links) und LNV (rechts) für die Druckfestigkeit längs zur Faser der Prüfreihe BB-lang*

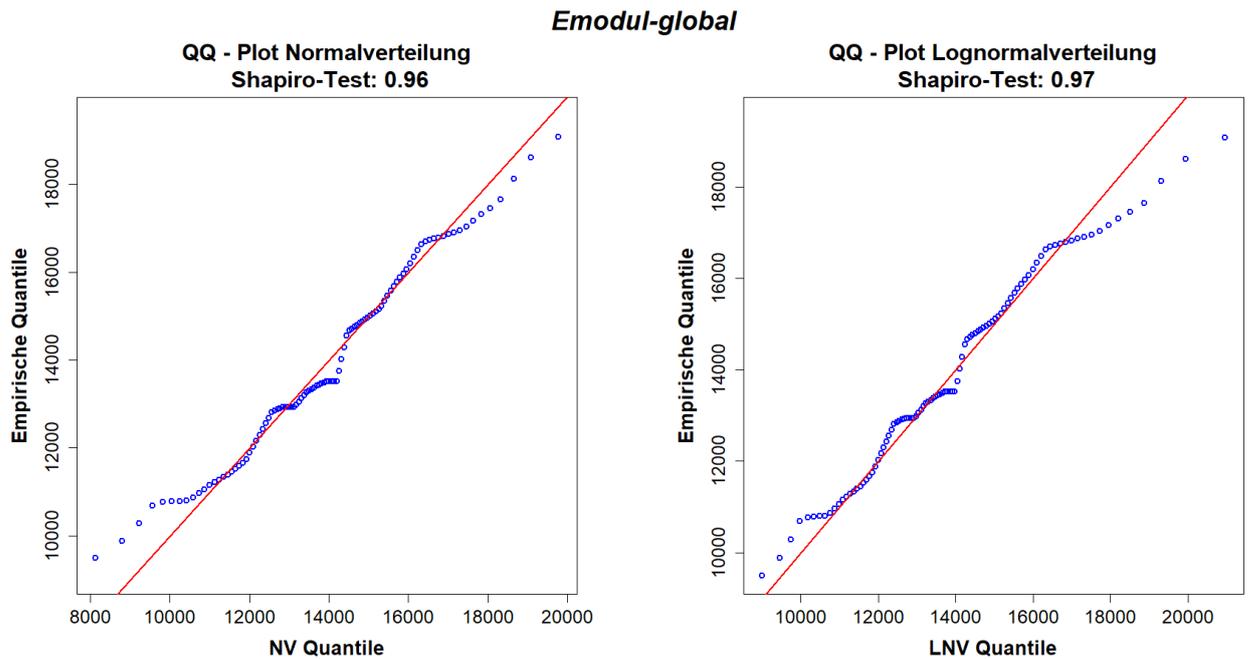


Abbildung 3-27: *QQ-Plots und Shapiro-Testergebnis für NV (links) und LNV (rechts) für den globalen Druck-E-Modul der Prüfreihe BB-lang*

3-4.9.5 Rechtszensierte Daten

Rechtszensierte Daten sind all jene, bei denen es z.B. zu keinem Zielversagen gekommen ist und in Folge die max. Traglast sowie die Festigkeit per Erwartung höher liegen als durch den maximalen Prüfwert angezeigt. Im Vergleich dazu kann der Druck-E-Modul wie gehabt bestimmt werden, sofern, was in den vorliegenden Untersuchungen gegeben ist, der linear-elastische Bereich ausreichend durch Prüfdaten abgedeckt ist.

Um die vorliegenden Beobachtungen zur Abschätzung der Festigkeit gemeinsam mit den Prüfungen mit tatsächlich vorliegender Maximallast entsprechend bewerten zu können bedient man sich der Maximum Likelihood Methode (MLE) für rechts-zensierte Daten; siehe Gl. (3.23). Dabei wird durch die Indikatorvariable d_i , mit $i = 0, 1$, angegeben, ob es zum Eintritt eines Zielversagens kommt oder nicht; siehe Gl. (3.24). Die Implementierung in R erfolgte auch hier wieder über die „optim“-Funktion.

$$L(\theta|x_i) = \prod_{i=1}^n [f_x(x_i|\theta)]^{d_i} [1 - F_x(x_i|\theta)]^{1-d_i} \rightarrow \max(\ln L(\theta|x_i)) \quad (3.23)$$

mit:

$$d_i = f(x) = \begin{cases} 1 & \dots \text{ bei Eintritt Zielversagen} \\ 0 & \dots \text{ sonst} \end{cases} \quad (3.24)$$

Dabei ist noch anzumerken, dass die Druckfestigkeit aller Brettabschnitt-Prüfreihe über die MLE ermittelt wurde. Im Falle von alleinig unzensierten Daten besaß der Vektor nur Einsen bzw. wurde nur der erste Term der Gl. (3.23) ausgewertet.

3-4.9.6 Bestimmung statistischer Kenngrößen

Für die endgültige Auswertung der Kennwerte müssen nun ihre statistischen Kenngrößen ermittelt werden. Dazu wird der arithmetische Mittelwert, als Schätzer für den Erwartungswert, der emp. Variationskoeffizient (CV[X]) sowie das empirische 5 %-Quantil ($X_{05,emp}$) gemäß Rangstatistik und das 5 %-Quantil der LNV ($X_{05,LNV}$) bestimmt. Während diese Schätzer i.d.R. unter Anwendung der Momentenmethode bestimmt werden, werden jene der Druckfestigkeit über die Maximum Likelihood Methode ermittelt. Dabei kommt es durch die Anwendung der zwei unterschiedlichen Methoden zu

einem Bias im Variationskoeffizienten der Druckfestigkeit, da bei der Maximum Likelihood Methode mit N (Stichprobenumfang) und nicht mit $N-1$ in der Ermittlung der Varianz gewichtet wird. In Folge wurde der Bias korrigiert.

3-4.9.7 Erstellung von Korrelationsmatrizen

Um die Beziehungen zwischen den einzelnen Parametern des mathematischen Modells entsprechend auch in weiterführenden stochastischen Simulationen repräsentativ in Form multivarianter Verteilungen abzubilden, wurden Korrelationsmatrizen erstellt. Die Basis dafür ist das lineare Korrelationsmaß nach Pearson.

Ein Korrelationskoeffizient kann dabei die Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Wobei ein Korrelationskoeffizient von 0 bedeuten würde, dass kein Zusammenhang zwischen den beiden Variablen besteht. Ein Korrelationskoeffizient von 1 würde einen perfekt positiven Zusammenhang und ein Korrelationskoeffizient von -1 einen perfekt negativen Zusammenhang beschreiben.

Eine lineare Beziehung gilt bei normalverteilten Randverteilungen automatisch bzw. bei lognormalverteilten nach Transformation in den logarithmierten Raum. Da in Folge gegebener physikalischer Randbedingungen (u.a. Beschränkung der Variablen auf den positiven Zahlenraum) der Lognormalverteilung grundsätzlich gegenüber der Normalverteilung der Vorzug zu geben ist, wurden die entsprechenden Korrelationsmatrizen im logarithmierten Raum in R über den Befehl „cor“ bestimmt; siehe u.a. Tabelle 3-4. Aufgrund der Symmetrie beschränken sich die Angaben auf die obere Dreiecksmatrix.

Tabelle 3-4: Korrelationsmatrix am Bsp. von Prüfreihe BB-lang

Prüfreihe BB-lang	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,83	0,04	-0,51	-0,22	-0,43
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	-	1	0,13	-0,66	-0,62	-0,55
$\ln(w_{ini})$	-	-	1	0,41	0,09	0
$\ln(w_{lin})$	-	-	-	1	0,58	0,77
$\ln(w_f)$	-	-	-	-	1	0,39
$\ln(c)$	-	-	-	-	-	1

3-5 PRÜFDATENAUSWERTUNG BSP- UND BSH-PRÜFKÖRPER

Zur Prüfdatenauswertung der BSH- und BSP-Prüfreiheiten wurde die Messdatei des QuantumX 840A, wie in Abschnitt 3-2.2 erwähnt, verwendet. Im Unterschied zur Auswertung der Brettabschnittsdaten (vgl. Abschnitt 3-4) ist bei der Auswertung der BSH- und BSP-Prüfreiheiten keine Unterscheidung zwischen lokal und global gemessenen Daten notwendig, da nur die gemittelten Daten der Wegaufnehmer ausgewertet werden. Demzufolge ist auch keine Maschinenwegkorrektur notwendig. Auch das Wegschneiden der Hystereseschleife entfällt, da keine vorhanden ist.

Zur Gewinnung eines ersten Überblickes wurden zu Beginn der Auswertung die Prüfkurven der BETA 1000, der vier Wegaufnehmer und die gemittelte Prüfkurve aller vier Wegaufnehmer graphisch dargestellt; siehe Abbildung 3-28. Für die weitere Auswertung wurde ausschließlich die gemittelte Prüfkurve der vier Wegaufnehmer herangezogen. Im nächsten Schritt wurde der Entlastungsast der Prüfkurve entfernt; siehe Abbildung 3-29. Dies erfolgte automatisiert, durch Abtrennung jenes Bereiches der Prüfdaten mit negativem Weginkrement.

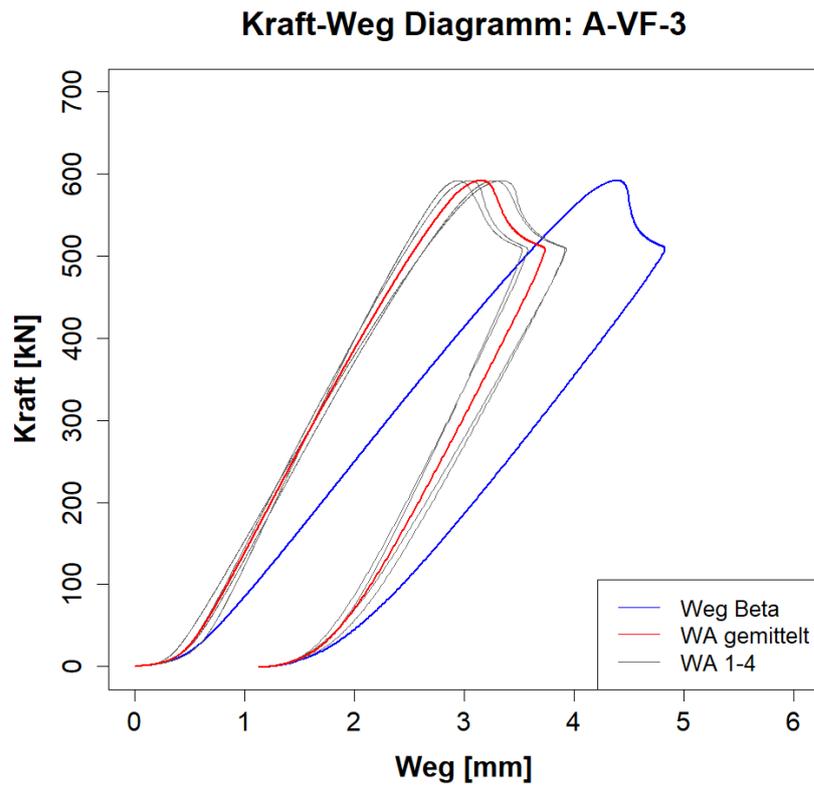


Abbildung 3-28: Übersicht über die vollständig erfassten Prüfkurven, am Bsp. der Prüfung A-VF-3

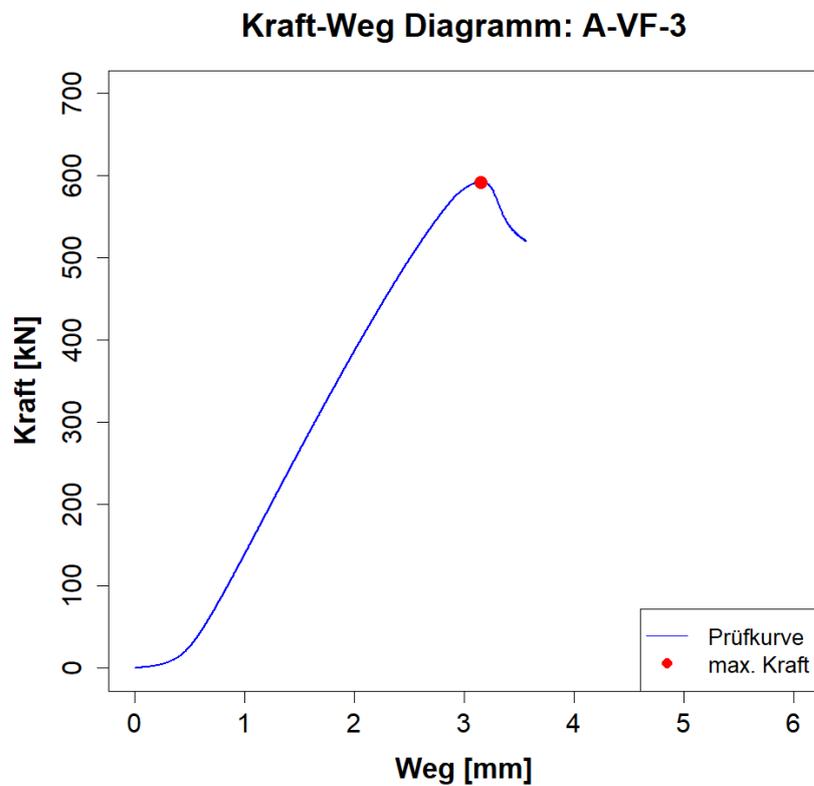


Abbildung 3-29: Prüfkurve ohne Entlastungsast, am Bsp. der Prüfung A-VF-3

Die Ermittlung von $f_{c,0}$, $E_{c,0,Norm}$ und $E_{c,0,Reg}$ erfolgte dabei analog zu der in Abschnitt 3-4.4 beschriebenen Vorgehensweise. Der zur Bestimmung von $E_{c,0,Reg}$ notwendige Parameter η wurde dabei für alle Prüfreiheiten mit dem Wert 10 festgelegt. Durch das weitgehend konstante Messsignal konnte mit nur einem Parameterwert für alle Prüfreiheiten ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden.

Die Findung und Kalibrierung eines geeigneten mathematischen Modells wurde bereits bei der Prüfdatenauswertung der Brettabschnitte in Abschnitt 3-4.8 behandelt und kann analog für die Prüfreiheiten der BSH- und BSP-Prüfkörper übernommen werden.

Bezüglich der weiteren Auswertung kann auch die Feuchtekorrektur (Abschnitt 3-4.9.2) und das theoretische Verteilungsmodell analog übernommen werden. Die Beseitigung von Extremwerten unterscheidet sich dadurch, dass bei der Auswertung der BSH- und BSP-Prüfkörper nur einzelne Kenngrößen unberücksichtigt blieben und, bedingt durch den in allen Serien gegebenen vergleichsweise geringen Prüfumfang, nicht ganze Kenngrößengruppen, wie in Abschnitt 3-4.9.3.

Die Methodik in der Bestimmung statistischer Kenngrößen gemäß Abschnitt 3-4.9.6 wurde auch weitgehend für die hier diskutierten Prüfreiheiten übernommen. Im Unterschied zu den Prüfungen an Brettabschnitten kam es jenen an BSH und BSP zwar immer zum Zielversagen, jedoch wurde auch hier die Druckfestigkeit mit der MLE-Methode bestimmt um konsistent zu sein. Zusätzlich wurde noch das Verhältnis F_{max}/F_{Ende} eingeführt um den Anteil des Nachbruchverhaltens bezüglich der Parameter besser einordnen zu können, da diese bei diesen Prüfreiheiten relativ kurz aufgezeichnet wurde. Bei diesem Verhältnis entspricht F_{Ende} der Kraft am Ende des Prüfkurve, des letzten Messpunktes. Auch die Erstellung der Korrelationsmatrix ist aus Abschnitt 3-4.9.7 zu übernehmen.

KAPITEL 4: ERGEBNISSE UND DISKUSSION

4-1 REPRÄSENTATIVES VERSAGENSBIKD DER PRÜFKÖRPER

4-1.1 PRÜFKÖRPER AUS BRETTABSCHNITTEN

Die in Abbildung 4-1 dargestellten Prüfkörper zeigen das repräsentative, für die gesamten Brettabschnitt-Prüfungen das beobachtete, Versagensbild. Darin ist das für Druck parallel zur Faser typische Versagensbild in Form von Scherbändern bzw. Stauch- / Druckfalten deutlich zu erkennen. Dieses wurde in Abschnitt 2-1.3 im Zuge der Literaturrecherche ausführlich beschrieben.

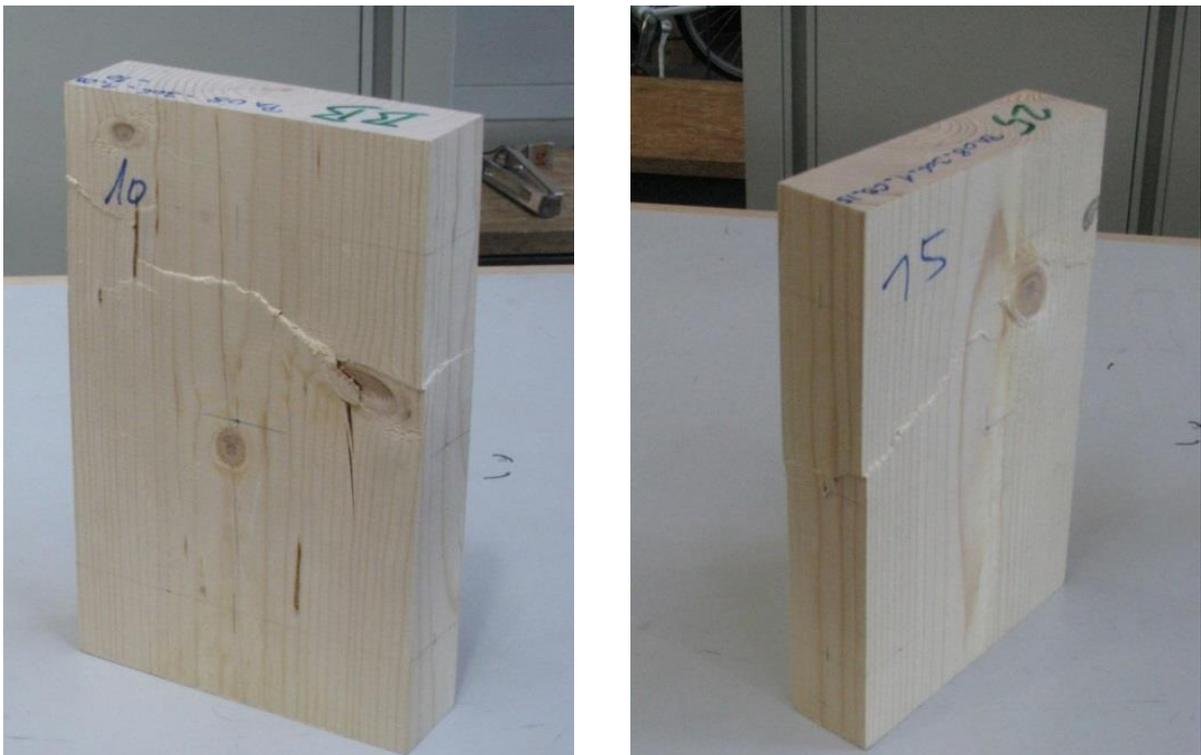


Abbildung 4-1: *repräsentatives Versagensbild bei auf Druck längs zur Faser beanspruchten Brettabschnitten, exemplarisch dargestellt anhand von zwei Prüfkörpern*

4-1.2 PRÜFKÖRPER AUS BSH UNTER TEILFLÄCHENBELASTUNG



Abbildung 4-2: *links: Einpressung des belasteten Bereiches; rechts: Ausbildung einer Stauch- bzw. Druckfalte direkt unter dem belasteten Bereich*

In Abbildung 4-2 ist das repräsentative Versagensbild der teilflächig belasteten Prüfkörper dargestellt. Dabei ist eine klare Einpressung im belasteten Bereich zu erkennen. Weiters ist die Ausbildung einer Stauch- bzw. Druckfalte analog zu vollflächig belasteten Prüfkörpern erkennbar. Allerdings bildet sich diese nur unter dem belasteten Bereich aus; vergrößert dargestellt in Abbildung 4-3. An den Rändern der Stauch- bzw. Druckfalten kommt es zu einem Schubversagen was zusammen mit den Stauch- bzw. Druckfalten zur Ausbildung eines Versagensblocks führt.



Abbildung 4-3: *Darstellung des versagten Bereichs im Detail*

4-2 ERGEBNISSE AUS DEM VERGLEICH UNTERSCHIEDLICHER VERTEILUNGSMODELLE

Die Bewertung, wie unter Abschnitt 3-4.9.4 beschrieben, ergab, dass grundsätzlich beide theoretischen Verteilungsmodelle zur Repräsentanz der Kenngrößen geeignet wären. In rd. 50 % der Fälle wird die NV und in den anderen 50 % die LNV bevorzugt. Unter Einbeziehung physikalischer Randbedingungen kann festgehalten werden, dass für alle der angeführten Kenngrößen nur positive Werte möglich sind und somit der LNV der Vorzug zu geben ist.

4-3 PRÜFREIHEN DER BRETTABSCHNITTE

4-3.1 WAHL DES PARAMETERS η UND VERGLEICHSTUDIEN

Wie in Abschnitt 3-4.7 bereits behandelt, wurden Vergleichsstudien durchgeführt, um die Wahl des Parameters η und dessen Auswirkungen auf die damit bestimmten Druck-E-Module besser beurteilen zu können. Die letztendlich entschiedenen und umgesetzten Werte für η sind in der Tabelle 4-1 zusammengefasst. Des Weiteren befinden sich die dazugehörigen Vergleichsstudien im Anhang C-1.

Tabelle 4-1: Gewählte Werte für Parameter η

Prüfreihe		CB	BB-lang	L40-lang	BB-kurz	L40-kurz
η	$E_{c,0,global}$	30	30	40	60	60
	$E_{c,0,lokal}$	40	40	50	50	50

Aus der Tabelle 4-1 ist gut erkennbar, dass die Werte für den Parameter η zwischen globalen und lokalen Druck-E-Modul sowie zwischen unterschiedlichen Festigkeitsklassen nur gering voneinander abweichen. Größere Differenzen zeigen sich im Vergleich der Parameterwerte zwischen Prüfreiheiten mit langen bzw. kurzen Prüfkörpern. Weiters sollte an dieser Stelle noch erwähnt werden, dass es zwar gelungen ist eine individuelle Anpassung an den quasi linearen Bereich der Prüfkurve zu implementieren, diese jedoch maßgeblich von einem Parameter abhängig ist welcher wiederum weitgehend nach subjektiven Gesichtspunkten zu wählen ist. Damit ist eine rein objektive Auswertungsvorschrift zur Ermittlung des Druck-E-Moduls gegenwärtig nicht gegeben.

4-3.2 PRÜFREIHE CB

Die Ergebnisse der Grundkenngrößen sowie jene der Eingangsparameter für das mathematische Modell sind für die Prüfreihe CB in Tabelle 4-2 und Tabelle 4-3 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 4-2: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreihe CB

Prüfreihe CB	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,Reg,lokal}$ [N/mm ²]
Anzahl	30	30	30	30
\bar{X}_{mean}	12,0%	439	34,9	11.504
CV[X]	4,5%	6,8%	15,2%	19,8%
$X_{05,emp}$	–	390	–	7.931
$X_{05,LNV}$	–	391	27,1	8.051

Auffällig ist, dass das 5 %-Quantil der Druckfestigkeit in Faserrichtung mit $f_{c,0,05,LNV} = 27,1$ N/mm² deutlich höher ist als gemäß EN 338 [3] der Festigkeitsklasse C24 zugeordnet wird; vgl. $f_{c,0,k} = 21$ N/mm² für C24. Auch der lokal bestimmte mittlere Druck-E-Modul längs zur Faser aus den Prüfungen zeigt sich

mit 11.504 N/mm² höher als die 11.000 N/mm², welche lt. EN 338 [3] für C24 zu erwarten sind. Im selben Verhältnis zeigt sich auch die mittlere Rohdichte der Serie CB mit 439 kg/m³ über dem Wert von 420 kg/m³ wie für C24 verankert. Der höhere E-Modul und die Rohdichte deuten darauf hin, dass das Material C24 leicht übersteigt. Die deutlich höhere Druckfestigkeit gegenüber EN 338 [3] ist auf eine konservative Festlegung in EN 338 [3] zurückzuführen. Diese konservative Festlegung wird damit begründet, dass der Feuchteinfluss auf die Druckfestigkeit deutlich höher ist als auf Zug parallel zur Faser oder Biegung. Zudem ist noch hinzuzufügen, dass im Eurocode 5 [6] nicht zwischen NK1 und NK2 unterschieden wird, und für beide der selbe k_{mod} -Faktor verwendet wird, wie in Abschnitt 2-1.4 bereits erläutert. Aus diesem Gesichtspunkt heraus ist bei $f_{c,0,05}$ eine Differenz von rd. 20 % und mehr durchaus plausibel.

Tabelle 4-3: *Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe CB*

Prüfreihe CB	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,global,Reg}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,global,EN}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [–]
Anzahl	29	29	29	29	29	29	29
\bar{X}_{mean}	215	13.295	12.758	0,21	0,64	1,20	2,46
CV[X]	14,1%	24,3%	24,9%	13,3%	14,8%	18,1%	25,5%
$X_{05,emp}$	173	8.460	8.193	–	–	–	–
$X_{05,LNV}$	169	8.563	8.103	–	–	–	–

Anmerkungen: Prüfkörper CB 23 wurde als Extremwert definiert

In Tabelle 4-3 sind die Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell zusammenfassend dargestellt. Auffällig ist die große Streuung für den E-Modul mit $CV[E_{c,0,12,global,Reg}] = 24,3 \%$. Im Vergleich: Für die E-Moduln aus Biege- oder Zugversuchen wird im Prob. Model Code (JCSS) [5] ein Wert von 13 % empfohlen. Die deutlich höheren Streuungen des Druck-E-Moduls in dieser Untersuchungsreihe lassen auf Unsicherheiten in der Bestimmung schließen. Die Streuungen der maximalen Kraft mit $CV[F_{max,u}] = 14,1 \%$ entsprechen hingegen in etwa den Erfahrungen am Lignum Test Center (LTC) für die Druckfestigkeit in Faserrichtung mit $CV[f_{c,0,LTC}] = 15 \%$, die Empfehlung des Prob. Model Code (JCSS) [5] ist etwas höher; sie beträgt $CV[f_{c,0,JCSS}] = 20 \%$. Für die 5 %-Quantile des E-Moduls als auch der Druckfestigkeit kann eine gute Übereinstimmung der empirischen und der nach LNV festgehalten werden.

Betrachtet man die Verformungsanteile bis zum Erreichen von F_{max} so ist der Weg bis zum Erreichen des Endes des linearen Anteils im Mittel bei 0,64 mm. Das würde 53 % (w_{lin} / w_f) der gesamten Verformungen bis zum Erreichen von F_{max} entsprechen. Demnach treten 47 % der Verformungen bis zum Erreichen von F_{max} im nicht-linearen Bereich auf. Das Verhältnis w_{lin} / w_f (53 %) bildet demnach eine gewisse Duktilität im Materialverhalten ab.

In Abbildung 4-4 sind alle Prüfkurven der Prüfreihe CB dargestellt. Dabei ist eine Prüfkurve im Weg deutlich versetzt. Dies ist die Prüfkurve von Prüfkörper CB 23 welcher aufgrund von w_{ini} als Extremwert definiert wurde. In rot wurde noch das mathematische Modell für diese Prüfreihe auf Basis der mittleren Parameterwerte dargestellt.

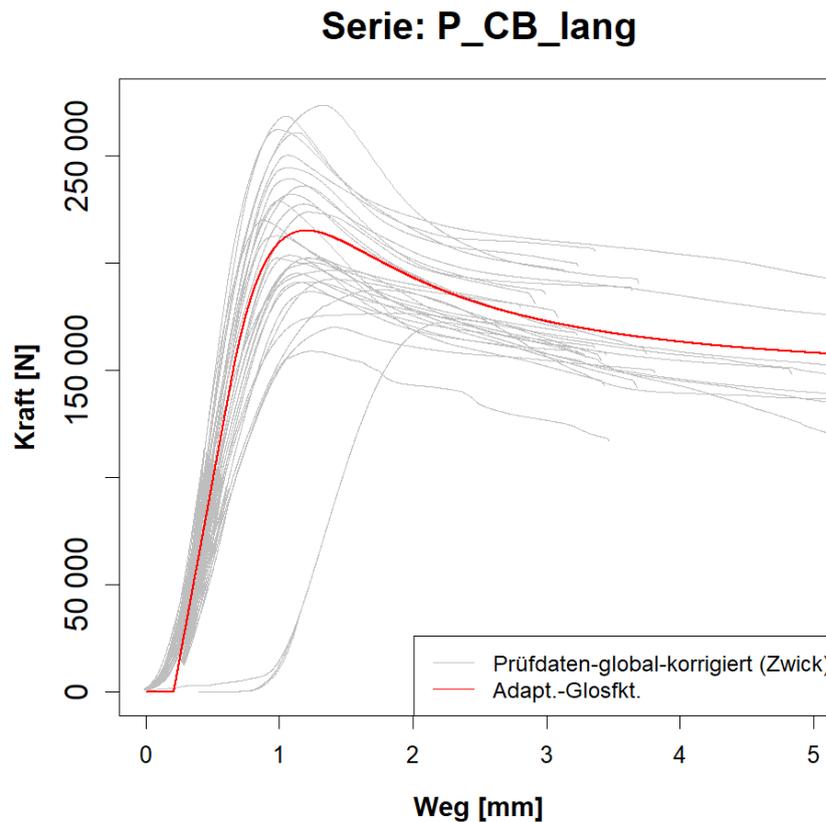


Abbildung 4-4: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie CB und Mittelwertkurve des daraus resultierenden mathematischen Modells

Bei Betrachtung der Prüfkurven zeigt sich eine zunehmend ausgeprägtere, raschere Entfestigung mit zunehmender max. Traglast. In der zugehörigen Korrelationsmatrix (siehe Tabelle 4-4) ist jedoch kein direkter Zusammenhang zwischen $F_{max,u}$ und c zu erkennen. Eine deutliche Korrelation kann zwischen $F_{max,u}$ und $E_{c,0,12,global,Reg}$ festgestellt werden. Da beide Parameter von der Rohdichte abhängig sind ist diese Korrelation erklärbar und in Übereinstimmung mit der Literaturrecherche. Weiters ist in der Korrelationsmatrix eine negative Korrelation zwischen $E_{c,0,12,global,Reg}$ und w_{lin} gegeben. Diese ist durchaus belegbar, da ein höherer E-Modul eine größere Steigung und somit einen kürzeren linearen Weg bedeuteten würde. Zudem ist noch eine Korrelation zwischen w_{lin} und c erkennbar. Eine mögliche Erklärung für die ausgeprägtere Entfestigung bei höherer Festigkeit wäre diese Verkettung von Korrelationen einzelner Parameter. Zusammengefasst wäre dies der höherer E-Modul bei höherer Festigkeit welcher negativ mit w_{lin} korreliert, das wiederum mit c korreliert.

Tabelle 4-4: Korrelationsmatrix – Prüfreihe CB-lang

Prüfreihe CB-lang	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,94	0,23	-0,45	-0,5	0,12
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	0,28	-0,55	-0,65	0,01
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	0,15	-0,26	-0,18
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	0,27	0,42
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	0,36
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

4-3.3 PRÜFREIHE BB

4-3.3.1 Prüfreihe BB-lang

Die Ergebnisse der Grundkenngrößen sowie die der Eingangsparameter des mathematischen Modells sind für die Prüfreihe BB-lang in Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 4-5: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreihe BB-lang

Prüfreihe BB-lang	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,Reg,lokal}$ [N/mm ²]
Anzahl	30	30	30	30
X_{mean}	12,0%	455	38,5	13.243
CV[X]	4,0%	10,5%	14,4%	20,4%
X_{05,emp}	–	386	–	9.945
X_{05,LNV}	–	382	30,3	9.333

Auffällig ist, dass das 5 %-Quantil der Druckfestigkeit in Faserrichtung mit $f_{c,0,05,LNV} = 30,3$ N/mm² deutlich höher ist als gemäß EN 338 [3] der Festigkeitsklasse C30 zugeordnet wird; vgl. $f_{c,0,k} = 24$ N/mm² für C30. Auch der lokale mittlere Druck-E-Modul längs zur Faser aus den Prüfungen zeigt sich mit 13.243 N/mm² höher als die 12.000 N/mm² welche lt. EN 338 [3] für C30 zu erwarten sind. Die mittlere Rohdichte der Serie BB-lang entspricht mit 455 kg/m³ in etwa dem Wert von 460 kg/m³ wie für C30 verankert. Der höhere E-Modul deutet darauf hin, dass das Material C30 leicht übersteigt. Die deutlich höhere Druckfestigkeit gegen über EN 338 [3] ist auf eine konservative Festlegung in EN 338 [3] zurückzuführen, welche durch den hohen Feuchteinfluss auf die Druckfestigkeit begründet ist. Aus diesem Gesichtspunkt heraus ist bei $f_{c,0,05}$ eine Differenz von rd. 25 % durchaus plausibel.

Tabelle 4-6: Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe BB-lang

Prüfreihe BB-lang	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,global,Reg}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,global,EN}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{in} [mm]	w_f [mm]	c [–]
Anzahl	25	25	25	25	25	25	25
X_{mean}	222	13.940	13.604	0,22	0,63	1,17	2,17
CV[X]	9,3%	18,1%	17,7%	17,5%	16,6%	10,3%	23,3%
X_{05,emp}	190	10.655	10.444	–	–	–	–
X_{05,LNV}	189	10.150	9.986	–	–	–	–

Anmerkungen: Prüfkörper _3, _5, _6, _19 konnten nicht bis zum Erreichen des Maximalwiderstands geprüft werden; in Auswertung unberücksichtigt Prüfkörper BB 29 wurde als Extremwert definiert

In Tabelle 4-6 sind die Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell dargestellt. Auffällig ist die große Streuung für den E-Modul mit $CV[E_{c,0,12,global,Reg}] = 18,1$ %. Vergleicht man diesen mit der Streuung für E-Moduln aus Biege- oder Zugversuchen wird im Prob. Model Code (JCSS) [5] dafür ein Wert von 13 % empfohlen. Die deutlich höheren Streuungen des Druck-E-Moduls lassen auf Unsicherheiten in der Bestimmung schließen. Die Streuungen der maximalen Kraft liegen mit $CV[F_{max,u}] = 9,3$ % hingegen etwas unter den Erfahrungen am Lignum Test Center (LTC) für die Druckfestigkeit in Faserrichtung mit $CV[f_{c,0,LTC}] = 15$ %, die Empfehlung des Prob. Model Code (JCSS) [5] wäre etwas höher mit $CV[f_{c,0,JCSS}] = 20$ %. Für die 5 %-Quantile des E-Moduls als auch der Druckfestigkeit kann eine gute Übereinstimmung der empirischen und der nach LNV festgehalten werden.

Betrachtet man die Verformungsanteile bis zum Erreichen von F_{max} , so ist der Weg bis zum Erreichen des Endes des linearen Anteils im Mittel bei 0,63 mm. Das würde 54 % (w_{lin} / w_f) der gesamten Verformungen bis zum Erreichen von F_{max} entsprechen. Demnach treten 46 % der Verformungen bis zum Erreichen von F_{max} im nicht-linearen Bereich auf. Das Verhältnis w_{lin} / w_f (54 %) bildet demnach eine gewisse Duktilität im Materialverhalten ab.

In Abbildung 4-5 sind alle Prüfkurven der Prüfreihe BB-lang dargestellt, außer jene bei denen es zu keinem Versagen gekommen ist. Die nach oben versetzte Prüfkurve ist die von Prüfkörper BB 29, welcher als extremer Prüfkörper definiert wurde. Das mathematische Modell dieser Prüfreihe ist als mittlere Kurve in rot dargestellt.

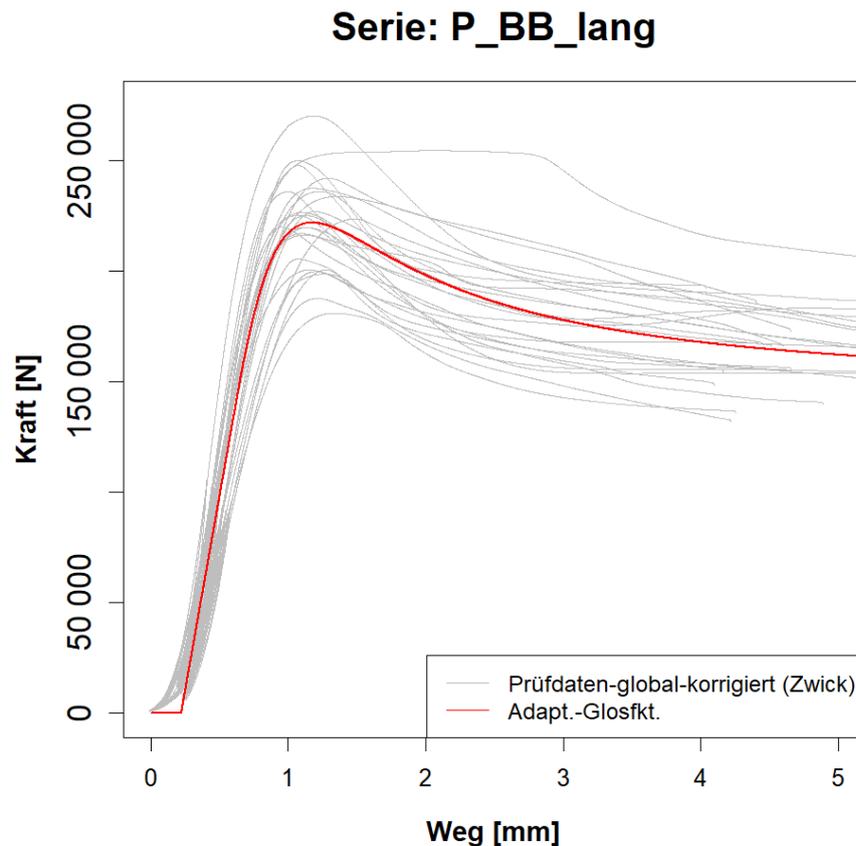


Abbildung 4-5: *Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie BB-lang und des daraus resultierenden mittleren mathematischen Modells*

Es ist auch für diese Prüfreihe zu beobachten, dass Prüfkörpern mit höherer Festigkeit im Allg. eine vergleichsweise ausgeprägtere Entfestigung aufweisen. Die geschätzten Korrelationsmaße (siehe Tabelle 4-7) zeigen einen leicht negativen Zusammenhang zwischen $F_{max,u}$ und c . Eine deutliche Korrelation kann zwischen $F_{max,u}$ und $E_{c,0,12,global,Reg}$ festgestellt werden, welche auf die gemeinsame Abhängigkeit von der Rohdichte zurückzuführen ist. Weiters ist eine negative Korrelation zwischen $E_{c,0,12,global,Reg}$ und w_{lin} erkennbar. Diese ist durchaus nachvollziehbar, da ein höherer E-Modul eine größere Steigung und somit einen kürzeren linearen Weg bedeuteten würde. Zudem ist noch eine Korrelation zwischen w_{lin} und c erkennbar. Die positive Korrelation zwischen w_{lin} und w_f lässt auf ein duktileres Materialverhalten bei weniger steifen und somit auch in der Regel weniger festen Prüfkörpern schließen. Hingegen wird die positive Korrelation zwischen w_{lin} und w_{ini} in ihrem Ausmaß als zufällig erachtet.

Tabelle 4-7: Korrelationsmatrix – Prüfreihe BB-lang

Prüfreihe BB-lang	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,83	0,04	-0,51	-0,22	-0,43
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	0,13	-0,66	-0,62	-0,55
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	0,41	0,09	0
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	0,58	0,77
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	0,39
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

4-3.3.2 Prüfreihe BB-kurz

Die Ergebnisse der Grundkenngrößen sowie jene der Eingangsparameter des mathematischen Modells sind für die Prüfreihe BB-kurz in Tabelle 4-8 und Tabelle 4-9 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 4-8: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreihe BB-kurz

Prüfreihe BB-kurz	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,Reg,lokal}$ [N/mm ²]
Anzahl	10	10	10	10
\bar{X}_{mean}	12,0%	425	36,0	10.744
CV[X]	3,1%	8,3%	9,5%	15,9%
$\bar{X}_{05,emp}$	–	383	–	8.587
$\bar{X}_{05,LNV}$	–	371	30,9	8.142

Das 5 %-Quantil der Druckfestigkeit in Faserrichtung ist mit $f_{c,0,05,LNV} = 30,9 \text{ N/mm}^2$ als gleich groß einzustufen wie das von Prüfreihe BB-lang mit $f_{c,0,05,LNV} = 30,3 \text{ N/mm}^2$ und damit deutlich höher als gemäß EN 338 [3] der Festigkeitsklasse C30 zugeordnet wird; vgl. $f_{c,0,k} = 24 \text{ N/mm}^2$ für C30. Der mittlere Druck-E-Modul längs zur Faser aus den Prüfungen zeigt sich mit 10.744 N/mm^2 niedriger als die 12.000 N/mm^2 welche lt. EN 338 [3] für C30 zu erwarten sind aber auch deutlich niedriger als für die Prüfreihe BB-lang. Im Gegensatz dazu ist der globale E-Modul mit 16.324 deutlich höher. Diese Beobachtungen können als Indiz gewertet werden, dass die Stauchung über die Prüfkörperlänge nicht regelmäßig passiert und im Bereich der Lasteinleitung sowie der Auflager mit erhöhten Stauchungen zu rechnen ist. Demzufolge kann angenommen werden, dass die Prüfkörperlänge bei der vorliegenden Prüfreihe so kurz ist, dass selbst im mittleren Abschnitt im Verhältnis zu den längeren Prüfkörpern erhöhte Stauchungen zu beobachten sind. Die ausgesprochen hohen globalen E-Moduln können dadurch aber nicht erklärt werden. Die Stabilität des Berechnungsprozederes zur Ermittlung dieser E-Moduln erscheint für zumindest diese Prüfreihe nicht zutreffend.

Die mittlere Rohdichte der Serie BB-kurz ist mit 425 kg/m^3 etwas niedriger als die 460 kg/m^3 wie für C30 verankert. Die trotz geringerer Rohdichte gegenüber EN 338 [3] deutlich höhere Druckfestigkeit ist wiederum auf die bereits genannte konservative Festlegung in EN 338 [3] zurückzuführen.

In Tabelle 4-9 sind die Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell dargestellt. Auffällig ist wiederum die große Streuung für den E-Modul mit $CV[E_{c,0,12,global,Reg}] = 28,4 \%$, welche deutlich höher ist als erwartet bzw. im Prob. Model Code (JCSS) [5] empfohlen. Die Streuungen der maximalen Kraft mit $CV[F_{max,u}] = 8,9 \%$ liegen hingegen etwas unter den Erfahrungen am Lignum Test Center (LTC) für die Druckfestigkeit in Faserrichtung mit $CV[f_{c,0,LTC}] = 15 \%$, die Empfehlung des Prob. Model Code (JCSS) [5] wäre mit $CV[f_{c,0,JCSS}] = 20 \%$ etwas höher. Für die 5 %-Quantile des E-

Moduls als auch der Druckfestigkeit kann eine gute Übereinstimmung der empirischen und der nach LNV festgehalten werden, mit Ausnahme jener von $E_{c,0,12,global,EN}$ wo deutliche Unterschiede gegeben sind.

Betrachtet man die Verformungsanteile bis zum Erreichen von F_{max} , so ist der Weg bis zum Erreichen des Endes des linearen Anteils im Mittel bei 0,46 mm. Das würde 51 % (w_{lin} / w_f) der gesamten Verformungen bis zum Erreichen von F_{max} entsprechen. Demnach treten 49 % der Verformungen bis zum Erreichen von F_{max} im nicht-linearen Bereich auf. Das Verhältnis w_{lin} / w_f (51 %) bildet demnach eine gewisse Duktilität im Materialverhalten ab.

Tabelle 4-9: Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe BB-kurz

Prüfreihe BB-kurz	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,global,Reg}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,gobal,EN}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [–]
Anzahl	10	10	10	10	10	10	10
\bar{X}	218	16.324	14.013	0,26	0,46	0,90	2,70
CV[X]	8,9%	28,4%	24,9%	13,3%	14,9%	23,5%	23,4%
$\bar{X}_{05,emp}$	188	10.004	9.598	–	–	–	–
$\bar{X}_{05,LNV}$	187	9.481	8.808	–	–	–	–

In Abbildung 4-6 sind alle Prüfkurven der Prüfreihe BB-kurz dargestellt. Das im Mittel erwartbare mathematische Modell dieser Prüfreihe ist in rot dargestellt. Es ist zu erkennen, dass rund die Hälfte der Prüfkurven im Nachbruchverhalten einen Sprung in Form eines zweiten Höckers aufweisen. Dieser entspricht einer Wiederverfestigung und wird vom mathematischen Modell nicht abgebildet. Um die Ursache dieser Sprünge weiter zu verfolgen, wurde die Tabelle 4-10 aufgrund der Bruchbilder und Betrachtung der Prüfkurven je Prüfkörper erstellt.

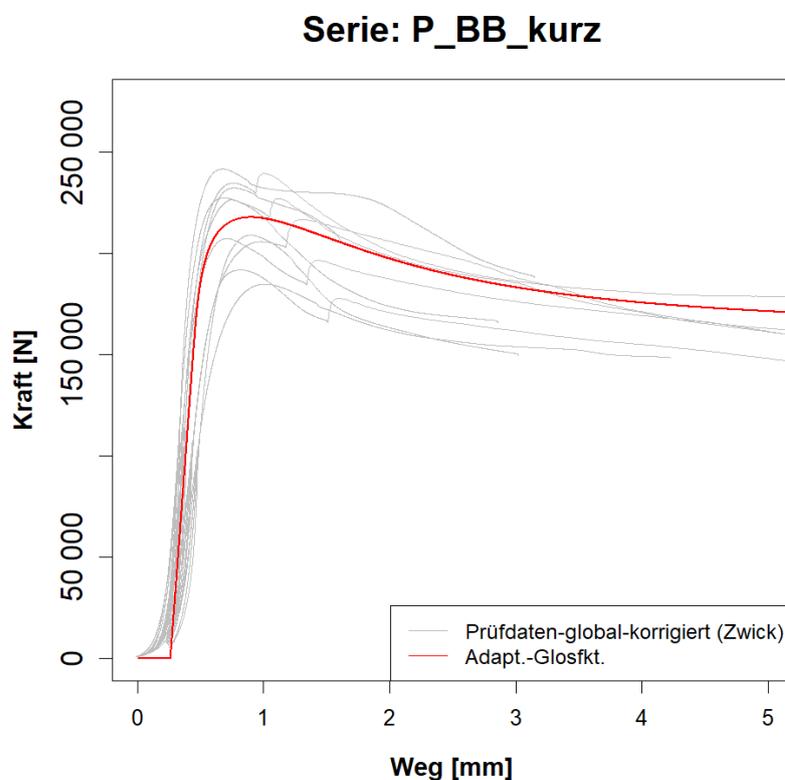


Abbildung 4-6: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie BB-kurz und des daraus resultierenden mathematischen Modells

Tabelle 4-10: Untersuchungen zum Sprung in den Prüfkurven – BB-kurz

	Höcker	Ausgeprägt	Erster Höcker größer	Großer Astbereich
BB_kurz_31	Ja	Ja	Ja	Ja
BB_kurz_32	Ja	Ja	Nein	Ja
BB_kurz_33	Ja	Ja	Nein	Ja
BB_kurz_34	Ja	Ja	Ja	Ja
BB_kurz_35	Ja	Nein	Nein	Nein
BB_kurz_36	Nein	–	–	Nein
BB_kurz_37	Nein	–	–	Nein
BB_kurz_38	Nein	–	–	Nein
BB_kurz_39	Nein	–	–	Nein
BB_kurz_40	Nein	–	–	Nein

Die zweite Spalte der Tabelle 4-10 zeigt an, ob die Prüfkurve einen Sprung in Form eines zweiten Höckers aufweist oder nicht. In den nächsten beiden Spalten ist aufgelistet ob dieser zweite Höcker ausgeprägt ist und welcher der beiden, der reguläre erste oder der zweite Höcker größer ist, bzw. welcher für den Wert der Maximallast verantwortlich zeichnet. In der letzten Spalte wurde noch eine Bewertung der Bruchbilder vorgenommen ob eine größere Störzone durch einen Ast bzw. Astansammlung erkennbar ist. Ein Prüfkörper bei dem eine ausgeprägte lokale Störzone durch einen Ast erkennbar ist, ist in Abbildung 4-7 dargestellt.

Zusammenfassend kann in Bezug auf Tabelle 4-10 davon ausgegangen werden, dass die beobachteten Sprünge in den Prüfkörpern mit geringer Höhe durch größere Störzonen aufgrund von Ästen hervorgerufen werden. Die Äste haben bei diesen Prüfkörpern mit geringerer Länge einen verhältnismäßig größeren Flächenanteil als bei längeren Prüfkörpern, wie z.B. Prüfreihe BB-lang. Es wird angenommen, dass in Folge der ausgeprägten lokalen Faserabweichungen es zu einem ersten Lastabfall kommt, in Folge der hohen Rohdichte des Astes aber eine Stabilisierung und erneute Laststeigerung gelingt.


Abbildung 4-7: Versagensbild eines Prüfkörpers mit geringer Höhe und ausgeprägter lokaler Störzone aufgrund eines Astes

In der folgenden Korrelationsmatrix (siehe Tabelle 4-11) ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen $F_{max,u}$ und $E_{c,0,12,global,Reg}$ festzustellen, welcher auf die gemeinsame Abhängigkeit von der Rohdichte zurückzuführen ist. Weiters ist eine negative Korrelation zwischen $E_{c,0,12,global,Reg}$ und w_{lin} sowie zwischen $F_{max,u}$ und w_{lin} erkennbar. Diese Beobachtungen sind damit erklärbar, dass ein höherer E-Modul eine größere Steigung und somit i.d.R. einen kürzeren linearen Weg bedeutet. Zudem ist noch eine Korrelation zwischen w_f und c erkennbar sowie zwischen w_f und w_{lin} . Daraus folgt die Abhängigkeit der Kurvenform von den Weganteilen im linearen bzw. im nicht-linearen Bereich. Die Korrelationen zwischen w_{lin} und w_{ini} wird als zufällig erachtet.

Tabelle 4-11: Korrelationsmatrix – Prüfreihe BB-kurz

Prüfreihe BB-kurz	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,89	-0,24	-0,67	-0,16	0,31
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	-0,35	-0,85	-0,46	0,06
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	0,73	0,36	0,25
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	0,45	0,16
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	0,57
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

Zum Abschluss der BB-Prüfreiheiten wird noch kurz auf die Unterschiede der globalen E-Moduln der Prüfreiheiten BB-lang, mit $E_{c,0,12,global,EN} = 13.940 \text{ N/mm}^2$, und BB-kurz, mit $E_{c,0,12,global,EN} = 16.324 \text{ N/mm}^2$, eingegangen. Diese könnten auf die verhältnismäßig größeren Astanteile von BB-kurz zurückgeführt werden. Da der Ast mit seiner hohen Rohdichte zu einer höheren Steifigkeit führt wäre es plausibel, dass dadurch die Prüfreihe BB-kurz einen höheren E-Modul aufweist als die Prüfreihe BB-lang.

4-3.4 PRÜFREIHE L40

4-3.4.1 Prüfreihe L40-lang-weggesteuert

Die Ergebnisse der Grundkenngrößen sowie jene der Eingangsparameter des mathematischen Modells für die Prüfreihe L40-lang-weggesteuert sind in Tabelle 4-12 und Tabelle 4-13 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 4-12: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreihe L40-lang-weggesteuert

Prüfreihe L40-lang	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,Reg,lokal}$ [N/mm ²]
Anzahl	17	17	17	17
\bar{X}	13,0%	486	40,5	14.235
CV[X]	3,8%	6,8%	12,0%	16,1%
$X_{05,emp}$	–	425	–	11.020
$X_{05,LNV}$	–	432	33,3	10.740

Anmerkung: Allgemein geringerer Prüfumfang; keine rechts-zensierten Daten

Auffällig ist, dass das 5 %-Quantil der Druckfestigkeit in Faserrichtung mit $f_{c,0,05,LNV} = 33,3 \text{ N/mm}^2$ deutlich höher ist als gemäß EN 14081 [33] der Festigkeitsklasse L40 zugeordnet wird; vgl. $f_{c,0,k} = 26 \text{ N/mm}^2$ für L40. Der lokale mittlere Druck-E-Modul längs zur Faser aus den Prüfungen zeigt sich mit 14.235 N/mm^2 etwas höher als die 14.000 N/mm^2 welche lt. EN 14081 [33] für L40 zu erwarten sind. Im selben Verhältnis zeigt sich auch die charakteristische Rohdichte der Serie L40-lang-weggesteuert mit 425 kg/m^3 etwas über dem Wert von 420 kg/m^3 wie für L40 verankert. Der E-Modul und Rohdichte sind größenordnungsmäßig dem Material L40 zuzuordnen. Die deutlich höhere

Druckfestigkeit gegenüber EN 14081 [33] ist auf eine konservative Festlegung in EN 14081 [33] zurückzuführen, welche durch den hohen Feuchteinfluss auf die Druckfestigkeit begründet ist. Aus diesem Gesichtspunkt heraus ist bei $f_{c,0,05}$ eine Differenz von rd. 30 % durchaus plausibel.

In Tabelle 4-13 sind die Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell dargestellt. Auffällig ist die große Streuung für den E-Modul mit $CV[E_{c,0,12,global,Reg}] = 19,9\%$. Vergleicht man diesen mit der Streuung für E-Moduln aus Biege- oder Zugversuchen, wird im Prob. Model Code (JCSS) [5] dafür ein Wert von 13 % empfohlen. Die deutlich höheren Streuungen des Druck-E-Moduls lassen auf Unsicherheiten in der Bestimmung schließen. Die Streuungen der maximalen Kraft mit $CV[F_{max,u}] = 11,3\%$ liegen hingegen etwas unter den Erfahrungen am Lignum Test Center (LTC) für die Druckfestigkeit in Faserrichtung mit $CV[f_{c,0,LTC}] = 15\%$, die Empfehlung des Prob. Model Code (JCSS) [5] wäre etwas höher mit $CV[f_{c,0,JCSS}] = 20\%$. Für die 5 %-Quantile des E-Moduls als auch der Druckfestigkeit kann eine gute Übereinstimmung der empirischen und der nach LNV festgehalten werden.

Betrachtet man die Verformungsanteile bis zum Erreichen von F_{max} , so ist der Weg bis zum Erreichen des Endes des linearen Anteils im Mittel bei 0,62 mm. Das würde 34 % (w_{lin} / w_f) der gesamten Verformungen bis zum Erreichen von F_{max} entsprechen, was deutlich weniger ist als in den bisherigen Prüfreihe festgestellt. Demnach treten 66 % der Verformungen bis zum Erreichen von F_{max} im nicht-linearen Bereich auf. Das Verhältnis w_{lin} / w_f (34 %) bildet demnach eine Duktilität im Materialverhalten ab. Diese ist im Vergleich zur CB-Prüfreihe und den BB-Prüfreihe höher.

Tabelle 4-13: Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe L40-lang-weggesteuert

Prüfreihe L40-lang	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,global,Reg}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,global,EN}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [–]
Anzahl	12	12	12	12	12	12	12
X_{mean}	246	13.684	13.038	0,29	0,62	1,80	2,66
CV[X]	11,3%	19,9%	22,2%	18,9%	16,8%	24,1%	23,4%
$X_{05,emp}$	199	9.813	8.644	–	–	–	–
$X_{05,LNV}$	201	9.398	8.577	–	–	–	–

Anmerkungen: Prüfkörper _16, _20, _24, _27 konnten nicht bis zum Erreichen des Maximalwiderstands geprüft werden; in Auswertung unberücksichtigt
 Werte des Prüfkörpers _29 wurden als Extremwerte klassifiziert

In Abbildung 4-8 sind alle Prüfkurven der Prüfreihe L40-lang-weggesteuert dargestellt, außer jene bei denen es aufgrund des Erreichens der Maximalkapazität des Prüfgerüsts zu keinem Versagen gekommen ist. Die seitlich versetzte Prüfkurve ist jene von Prüfkörper L40-29, welcher als Ausreißer definiert wurde. Das im Mittel erwartbare mathematische Modell dieser Prüfreihe ist in rot dargestellt. Vergleicht man die Abbildung 4-8 mit jenen der anderen Prüfreihe, so ist hier eine größere Streuung im Arbeitsverhalten erkennbar. Das Materialverhalten kann aufgrund der abgebildeten Prüfkurven als duktiler und weniger entfestigend angenommen werden als die vorhergehenden Prüfreihe CB und BB. In dem Zusammenhang erscheint es auch interessant, dass Prüfkörper höherer Kapazität, entgegen bisheriger Prüfreihe, eine weniger ausgeprägte Entfestigung bzw. einen höheren Gradienten im Entfestigungsbereich aufweisen als jene mit weniger Kapazität.

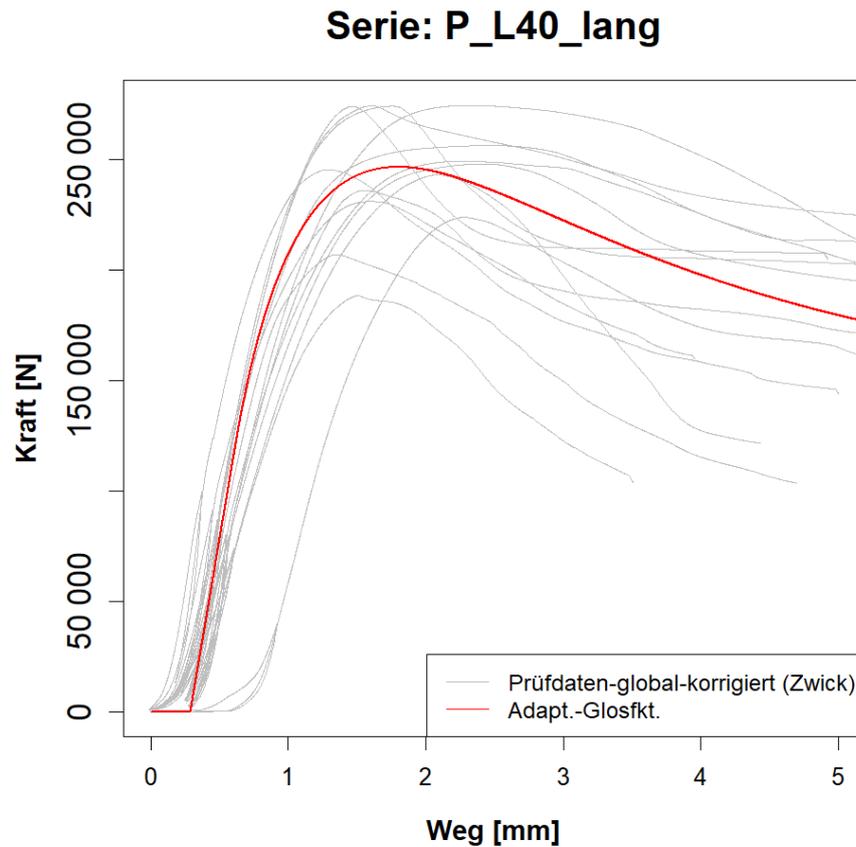


Abbildung 4-8: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie L40-lang und des daraus resultierenden mittleren mathematischen Modells

In der folgenden Korrelationsmatrix (siehe Tabelle 4-14) ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen $F_{max,u}$ und $E_{c,0,12,global,Reg}$ festzustellen, welcher auf die gemeinsame Abhängigkeit von der Rohdichte zurückzuführen ist. Weiters ist eine negative Korrelation zwischen $E_{c,0,12,global,Reg}$ und w_{lin} erkennbar. Diese ist plausibel, da ein höherer E-Modul eine größere Steigung und somit einen kürzeren linearen Weg bedeuteten würde. Im Gegenzug ist ein höherer E-Modul auch mit einer höheren Festigkeit verbunden, wie der deutliche Zusammenhang zeigt. Die höhere Festigkeit hat eine geringere Plastizität vor Erreichen von F_{max} zur Folge und führt zu einer Steigerung des linearen Verformungsanteiles. Bei diesen gegenläufigen Effekten durch E-Modul und Druckfestigkeit auf den linearen Verformungsanteil wird in dieser Korrelationsmatrix nur der Effekt des E-Moduls abgebildet. Alle Korrelationen mit w_{ini} werden als zufällig erachtet.

Tabelle 4-14: Korrelationsmatrix – Prüfreihe L40-lang-weggesteuert

Prüfreihe L40-lang	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,70	0,18	0,02	0,39	-0,29
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	-0,3	-0,67	-0,03	-0,27
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	0,67	0,59	-0,53
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	0,32	0,05
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	-0,23
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

4-3.4.2 Prüfreihe L40-kurz

Die Ergebnisse der Grundkenngrößen sowie jene der Eingangsparameter des mathematischen Modells sind für die Prüfreihe L40-kurz in Tabelle 4-15 und Tabelle 4-16 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 4-15: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreihe L40-kurz

Prüfreihe L40-kurz	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,Reg,lokal}$ [N/mm ²]
Anzahl	9	9	9	9
X_{mean}	12,0%	476	43,6	13.639
CV[X]	3,6%	7,1%	17,0%	22,7%
$X_{05,emp}$	–	431	–	8.944
$X_{05,LNV}$	–	422	33,1	8.768

Anmerkungen: Prüfkörper _33 erlangte während des Prüfungsvorganges eine ungeplante Schiefstellung; in Auswertung daher unberücksichtigt

Das 5 %-Quantil der Druckfestigkeit in Faserrichtung ist mit $f_{c,0,05,LNV} = 33,1 \text{ N/mm}^2$ als gleich groß einzustufen wie das von Prüfreihe L40-lang-kraftgesteuert mit $f_{c,0,05,LNV} = 33,3 \text{ N/mm}^2$ und damit deutlich höher als gemäß EN 14081 [33] der Festigkeitsklasse L40 zugeordnet wird; vgl. $f_{c,0,k} = 26 \text{ N/mm}^2$ für L40. Der mittlere Druck-E-Modul längs zur Faser aus den Prüfungen zeigt sich mit 13.639 N/mm^2 niedriger als die 14.000 N/mm^2 welche lt. EN 14081 [33] für L40 zu erwarten sind. Der globale E-Modul ist mit 16.956 N/mm^2 jedoch deutlich höher und unterscheidet sich stark vom lokalen E-Modul. Die charakteristische Rohdichte der Serie L40-kurz ist mit 431 kg/m^3 etwas höher als die 420 kg/m^3 wie für L40 verankert. Der höhere E-Modul und die Rohdichte deuten darauf hin, dass das Material L40 leicht übersteigt. Die deutlich höhere Druckfestigkeit gegenüber EN 14081 [33] ist auf eine konservative Festlegung in EN 14081 [33] zurückzuführen, welche durch den hohen Feuchteinfluss auf die Druckfestigkeit begründet ist. Aus diesem Gesichtspunkt heraus ist bei $f_{c,0,05}$ eine Differenz von rd. 30 % durchaus plausibel.

In Tabelle 4-16 sind die Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell dargestellt. Die Streuung für den E-Modul mit $CV[E_{c,0,12,global,Reg}] = 13,3 \%$ stimmt mit den erwarteten Streuungen für E-Moduln aus Biege- oder Zugversuchen, nach dem Prob. Model Code (JCSS) [5] mit 13 % festgelegt, überein. Die Streuung der maximalen Kraft mit $CV[F_{max,u}] = 10,4 \%$ liegt hingegen etwas unter den Erfahrungen am Lignum Test Center (LTC) für die Druckfestigkeit in Faserrichtung mit $CV[f_{c,0,LTC}] = 15 \%$, die Empfehlung des Prob. Model Code (JCSS) [5] wäre mit $CV[f_{c,0,JCSS}] = 20 \%$ etwas höher. Für die 5 %-Quantile des E-Moduls als auch der Druckfestigkeit kann eine gute Übereinstimmung zwischen den empirischen und den nach LNV bestimmten festgehalten werden, mit Ausnahme von $E_{c,0,12,global,Reg}$; diese weisen nennenswerte Unterschiede auf.

Betrachtet man die Verformungsanteile bis zum Erreichen von F_{max} , so ist der Weg bis zum Erreichen des Endes des linearen Anteils im Mittel bei $0,45 \text{ mm}$. Das würde 36 % (w_{lin} / w_f) der gesamten Verformungen bis zum Erreichen von F_{max} entsprechen und besitzt die gleiche Größenordnung wie die Prüfreihe L40-lang (34 %). Demnach treten 64 % der Verformungen bis zum Erreichen von F_{max} im nicht-linearen Bereich auf. Das Verhältnis w_{lin} / w_f (36 %) bildet demnach eine gewisse Duktilität im Materialverhalten ab.

Tabelle 4-16: Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe L40-kurz

Prüfreihe L40-kurz	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,global,Reg}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,gobal,EN}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [-]
Anzahl	5	5	5	5	5	5	5
\bar{X}_{mean}	246	16.956	14.574	0,31	0,45	1,24	2,76
CV[X]	10,4%	13,3%	14,6%	17,1%	18,2%	10,8%	13,1%
$X_{05,emp}$	218	14.308	11.904	–	–	–	–
$X_{05,LNV}$	206	13.457	11.235	–	–	–	–

Anmerkungen: Prüfkörper _32, _35, _39, _40 konnten nicht bis zum Erreichen des Maximalwiderstands geprüft werden; in Auswertung unberücksichtigt
 Prüfkörper _33 erlangte während des Prüfvorganges eine ungeplante Schiefstellung; in Auswertung daher unberücksichtigt

In Abbildung 4-9 sind alle Prüfkurven der Prüfreihe L40-kurz dargestellt, außer jene welche nicht bis zum Versagen geprüft werden konnten. Das im Mittel erwartbare mathematische Modell dieser Prüfreihe ist in rot dargestellt. Vergleicht man die Prüfkurven mit dem mathematischen Modell ist zu hinterfragen ob diese die Prüfkurven wiedergibt. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass rund die Hälfte der Prüfkurven im Nachbruchverhalten einen Sprung aufweisen, wie bereits bei BB-kurz festgestellt. Dieser Sprung in Form eines zweiten Höckers oder Knicks entspricht einer erneuten Wiederverfestigung nach Lastabfall und wird vom mathematischen Modell nicht abgebildet. Um die Ursache dieses Sprunges weiter zu ergründen, wurde die Tabelle 4-17 aufgrund der Bruchbilder und Betrachtung der Prüfkurven je Prüfkörper erstellt.

Serie: P_L40_kurz

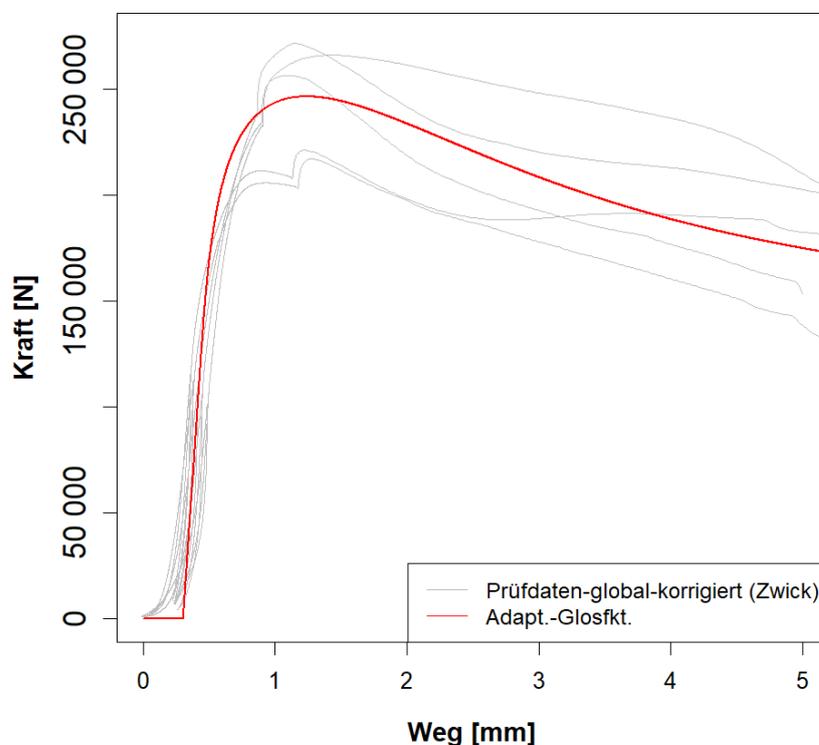


Abbildung 4-9: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie L40-kurz und des daraus resultierenden mittleren mathematischen Modells

Tabelle 4-17: Untersuchungen zum Sprung in den Prüfkurven – L40-kurz

	Höcker/Knick	Ausgeprägt	Erster Höcker größer	Großer Astbereich
L40_kurz_31	Höcker	Ja	Nein	Ja
L40_kurz_32 ²⁾	Knick	–	–	Nein
L40_kurz_33 ³⁾	Knick	–	–	Nein
L40_kurz_34	Knick	–	–	Nein ⁴⁾
L40_kurz_35 ²⁾	–	–	–	Nein
L40_kurz_36	Höcker	Ja	Nein	Nein ⁵⁾
L40_kurz_37	Knick	–	–	Nein ⁵⁾
L40_kurz_38	Knick	–	–	Ja
L40_kurz_39 ²⁾	–	–	–	Nein
L40_kurz_40 ²⁾	–	–	–	Nein

Anmerkungen: ²⁾ konnten nicht bis zum Erreichen des Maximalwiderstands geprüft werden; in Auswertung unberücksichtigt

³⁾ Prüfkörper _33 erlangte während des Prüfvorganges eine ungeplante Schiefstellung; in Auswertung daher unberücksichtigt

⁴⁾ ausgeprägtes Druckholz

⁵⁾ ausgeprägte Stauch- bzw. Druckfalte im unteren Bereich des Prüfkörpers

Die zweite Spalte der Tabelle 4-17 weist Prüfkörper mit einem Sprung in Form eines zweiten Höckers oder Knicks in der Prüfkurve aus. In den nächsten beiden Spalten ist aufgelistet, ob die Höcker ausgeprägt sind und welcher der beiden größer ist bzw. für den Maximalwert der Kraft verantwortlich zeichnet. In der letzten Spalte wurde noch eine Bewertung der Bruchbilder vorgenommen; z.B. ob eine größere lokale Störzone in Form eines Astes oder Astgruppe erkennbar ist oder nicht.

Zusammenfassend kann in Bezug auf Tabelle 4-17 davon ausgegangen werden, dass die Sprünge in den Prüfkörpern mit geringer Länge durch größere Störzonen aufgrund von Ästen, Druckholz oder ausgeprägte Verformungen, angezeigt durch ausgeprägte Stauch- bzw. Druckfalten, hervorgerufen werden. Die Störzonen haben bei diesen Prüfkörpern geringer Länge einen größeren Einfluss als bei längeren Prüfkörpern der Prüfreihe L40-lang-weggesteuert.

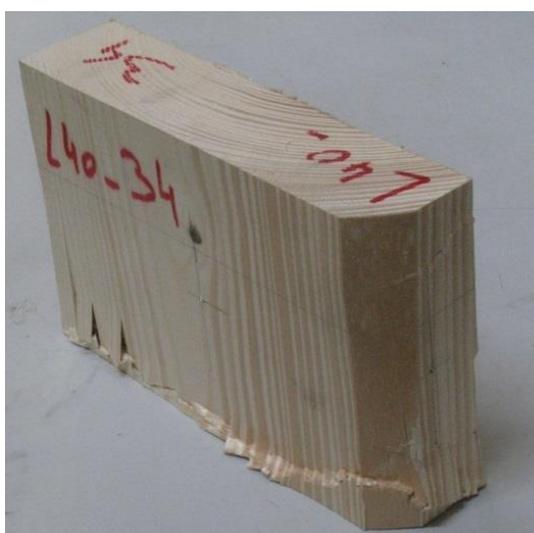


Abbildung 4-10: links: Störzone durch große Astbereiche; rechts: Störzone durch Druckholz

Die Aussagekraft der folgenden Korrelationsmatrix (siehe Tabelle 4-18) ist aufgrund der sehr eingeschränkten Prüfkörperzahl und den zuvor diskutierten Beobachtungen im Arbeitsverhalten als gering einzuschätzen. Der negative Zusammenhang zwischen $F_{max,u}$ und c sowie der positive Zusammenhang zwischen $F_{max,u}$ und w_{lin} sind plausibel. Auch die negativen Zusammenhänge zwischen $E_{c,0,12,global,Reg}$ und w_{lin} sowie zwischen w_{lin} und c sind nachvollziehbar. Warum bei dieser Prüfreiheit jedoch kein Zusammenhang zwischen der maximalen Kraft und dem E-Modul besteht ist fraglich und möglicherweise durch die Auswirkungen der Störstellen erklärbar.

Tabelle 4-18: Korrelationsmatrix – Prüfreiheit L40-kurz

Prüfreiheit L40-kurz	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,03	0,96	0,84	-0,06	-0,83
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	-0,17	-0,42	-0,76	-0,45
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	0,93	0,18	-0,78
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	0,48	-0,57
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	0,22
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

4-3.4.3 Prüfreiheit L40-lang-kraftgesteuert

Die Ergebnisse der Grundkenngrößen sowie jene der Eingangsparameter des mathematischen Modells sind für die Prüfreiheit L40-lang-kraftgesteuert in Tabelle 4-19 und Tabelle 4-20 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 4-19: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreiheit L40-lang-kraftgesteuert

Prüfreiheit L40-lang-KG	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,EN,lokal}$ ¹⁾ [N/mm ²]
Anzahl	13	13	13	13
\bar{X}_{mean}	13,0%	486	41,3	15.028
CV[X]	3,8%	6,8%	13,0%	13,1%
$X_{05,emp}$	–	425	–	11.925
$X_{05,LNV}$	–	432	33,4	11.948

Anmerkungen: ¹⁾ $E_{c,0,12,Reg,lokal}$ konnte für die kraftgesteuerten Versuche nicht ermittelt werden, hier kann $E_{c,0,12,EN,lokal}$ herangezogen werden

Das 5 %-Quantil der Druckfestigkeit in Faserrichtung ist mit $f_{c,0,05,LNV} = 33,4 \text{ N/mm}^2$ als gleich groß einzustufen wie das von Prüfreiheit L40-lang-weggesteuert mit $f_{c,0,05,LNV} = 33,3 \text{ N/mm}^2$ und damit deutlich höher als gemäß EN 14081 [33] der Festigkeitsklasse L40 zugeordnet; vgl. $f_{c,0,k} = 26 \text{ N/mm}^2$ für L40. Der mittlere Druck-E-Modul längs zur Faser aus den Prüfungen zeigt sich mit 15.028 N/mm^2 deutlich höher als die 14.000 N/mm^2 welche lt. EN 14081 [33] für L40 zu erwarten sind. Die charakteristische Rohdichte der Serie L40-lang-kraftgesteuert ist mit 425 kg/m^3 geringfügig höher als die 420 kg/m^3 wie für L40 verankert. Der höhere E-Modul und die Rohdichte deuten darauf hin, dass das Material L40 leicht übersteigt. Die deutlich höhere Druckfestigkeit gegenüber EN 14081 [33] ist auf eine konservative Festlegung in EN 14081 [33] zurückzuführen. Diese konservative Festlegung wird durch den hohen Feuchteinfluss auf die Druckfestigkeit begründet. Aus diesem Gesichtspunkt heraus ist bei $f_{c,0,05}$ eine Differenz von rd. 30 % durchaus plausibel.

Betreffend der Prüfreihe L40-lang (sowohl weg- als auch kraftgesteuert) ist noch anzumerken, dass diese trotz gleicher Klimatisierungsbedingungen mit 13 % eine etwas höhere Holzfeuchte aufweist im Vergleich zu den anderen Prüfreihe.

In Tabelle 4-20 sind die Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell dargestellt. Auffällig ist die große Streuung für den E-Modul mit $CV[E_{c,0,12,global,Reg}] = 18,8 \%$. Als Vergleich: Für E-Moduln aus Biege- oder Zugversuchen wird im Prob. Model Code (JCSS) [5] ein Wert von 13 % empfohlen. Die deutlich höheren Streuungen des Druck-E-Moduls lassen auf Unsicherheiten in der Bestimmung schließen. Die Streuungen der maximalen Kraft mit $CV[F_{max,u}] = 10,0 \%$ liegen hingegen etwas unter den Erfahrungen am Lignum Test Center (LTC) für die Druckfestigkeit in Faserrichtung mit $CV[f_{c,0,LTC}] = 15 \%$, die Empfehlung des Prob. Model Code (JCSS) [5] wäre mit $CV[f_{c,0,JCSS}] = 20 \%$ etwas höher. Für die 5 %-Quantile des E-Moduls als auch der Druckfestigkeit kann eine gute Übereinstimmung zwischen den empirischen und jenen nach LNV festgehalten werden, mit Ausnahme jener von $E_{c,0,12,global,Reg}$ wo sich relevante Differenzen zeigen.

Betrachtet man die Verformungsanteile bis zum Erreichen von F_{max} , so ist der Weg bis zum Erreichen des Endes des linearen Anteils im Mittel bei 0,69 mm. Das würde 34 % (w_{lin} / w_f) der gesamten Verformungen bis zum Erreichen von F_{max} entsprechen. Demnach treten 66 % der Verformungen bis zum Erreichen von F_{max} im nicht-linearen Bereich auf. Das Verhältnis w_{lin} / w_f (34 %) bildet demnach eine Duktilität im Materialverhalten ab. Diese ist gleich wie die der Prüfreihe L40-lang-weggesteuert und höher als in den Prüfreihe CB und BB.

Tabelle 4-20: Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe L40-lang-kraftgesteuert

Prüfreihe L40-lang-KG	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,global,Reg}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,global,EN}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [–]
Anzahl	8	8	8	8	8	8	8
X_{mean}	247	9.975	13.731	0,24	0,69	2,03	2,75
CV[X]	10,0%	18,8%	12,0%	29,3%	9,4%	12,3%	22,9%
$X_{05,emp}$	209	8.138	11.504	–	–	–	–
$X_{05,LNV}$	207	7.278	11.149	–	–	–	–

Anmerkungen: Prüfkörper _3, _8, _9, _12, _13 konnten nicht bis zum Erreichen des Maximalwiderstands geprüft werden; in Auswertung unberücksichtigt

In Abbildung 4-11 sind alle Prüfkurven der Prüfreihe L40-lang-weggesteuert dargestellt, außer jene bei denen es zu keinem Versagen gekommen ist. Das im Mittel erwartbare Arbeitsverhalten gemäß dem mathematischen Modell dieser Prüfreihe ist in rot dargestellt. Vergleicht man diese Abbildung mit jener der weggesteuerten Prüfreihe L40-lang ist kein Unterschied in der Entfestigung ersichtlich. Das Materialverhalten kann im Vergleich zu den Prüfreihe CB und BB aber wie bei der Prüfreihe L40-lang-weggesteuert als duktiler und weniger entfestigend, im Sinne eines höheren Gradienten, beobachtet werden.

Serie: P_L40_lang-KG

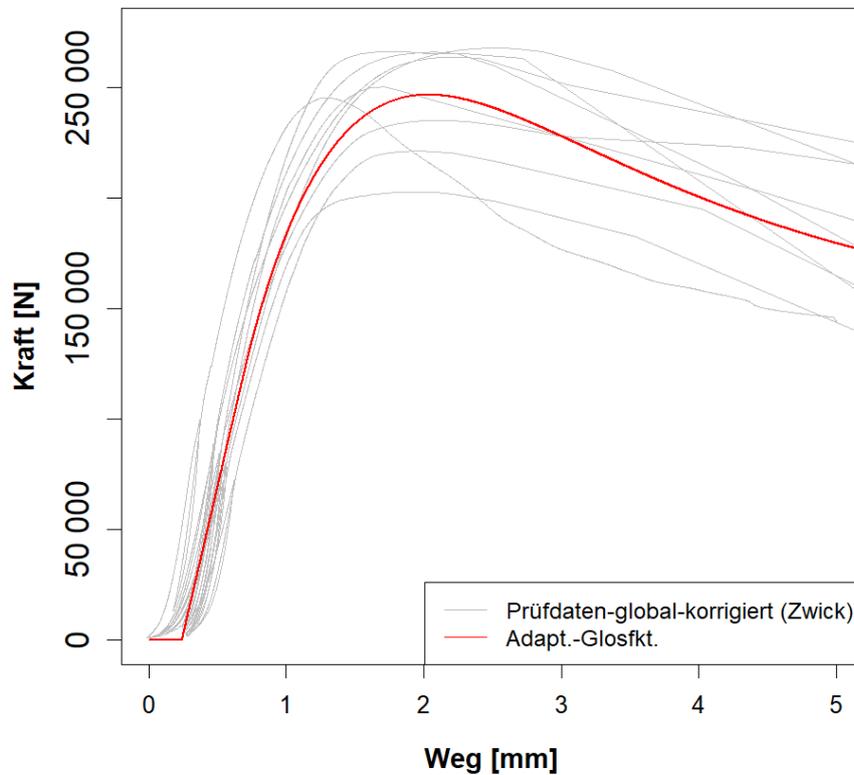


Abbildung 4-11: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie L40-lang-kraftgesteuert und des daraus resultierenden mittleren mathematischen Modells

In der folgenden Korrelationsmatrix (siehe Tabelle 4-21) ist nur ein unausgeprägter Zusammenhang zwischen $F_{max,u}$ und $E_{c,0,12,global,Reg}$ festzustellen, welcher aufgrund der gemeinsamen Abhängigkeit von der Rohdichte stärker ausgeprägt sein sollte. Weiters ist eine negative Korrelation zwischen $E_{c,0,12,global,Reg}$ und w_{lin} erkennbar. Diese ist durchaus nachvollziehbar, da ein höherer E-Modul eine größere Steigung und somit einen kürzeren linearen Weg bedeuteten würde. Alle Korrelationen mit w_{ini} werden als zufällig erachtet.

Tabelle 4-21: Korrelationsmatrix – Prüfreihe L40-lang-kraftgesteuert

Prüfreihe L40-lang-KG	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,46	-0,29	-0,21	0,27	0,16
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	0,41	-0,62	-0,5	0,55
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	0,27	-0,44	0,5
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	0,37	-0,19
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	0,12
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

4-3.5 DISKUSSION DER EINGANGSPARAMETER DES MATHEMATISCHEN MODELLS

In Tabelle 4-22 sind alle Mittelwerte aller Eingangsparameter aller Prüfreiheiten übersichtlich zusammengefasst.

Tabelle 4-22: *Übersicht über die Mittelwerte aller Eingangsparameter aller Prüfreiheiten*

Mittelwerte	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,global,Reg}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,gobal,EN}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [-]
CB	215	13.295	12.758	0,21	0,64	1,20	2,46
BB-lang	222	13.940	13.604	0,22	0,63	1,17	2,17
BB-kurz	218	16.324	14.013	0,26	0,46	0,90	2,70
L40-lang-weggesteuert	246	13.684	13.038	0,29	0,62	1,80	2,66
L40-kurz	246	16.956	14.574	0,31	0,45	1,24	2,76
L40-lang-kraftgesteuert	247	9.975	13.731	0,24	0,69	2,03	2,75

Beginnend bei der maximalen Kraft zeigt sich, dass diese mit zunehmender Festigkeitsklasse ansteigt, wobei dieser Anstieg zwischen der Prüfreihe CB und jener mit BB gering ausfällt. Zwischen BB und L40 zeigt sich eine deutliche Steigerung, die Ergebnisse zwischen den Prüfreiheiten innerhalb der gleichen Holzqualität bzw. Festigkeitsklasse weitgehend stabil und somit unbeeinflusst der durchgeführten Varianten betreffend Prüfkörperlänge und Prüfsteuerung (weg- vs. kraftgesteuert). Beim globalen Druck-E-Modul längs zur Faser zeigen sich zwischen $E_{c,0,12,global,Reg}$ und $E_{c,0,12,global,EN}$ Abweichungen im Bereich von 5 % und mehr. Allgemein und im Besonderen bei der Prüfreihe L40-lang-kraftgesteuert gelten die Ergebnisse nach der Auswertemethodik gemäß EN 408 [32] als stabiler als nach jener hier zusätzlich angewandten Methodik auf Basis der flexiblen Definition des linear-elastischen Bereiches. Weiters ist zu erkennen, dass vor allem die Prüfreiheiten mit sehr gedungenen Prüfkörpern einen deutlich höheren E-Modul aufweisen; darauf wurde bereits bei den entsprechenden Prüfreiheiten eingegangen. Der Trend, dass der E-Modul mit der Festigkeitsklasse ansteigt, ist nicht eindeutig zu erkennen.

Die Anfangsverschiebung w_{ini} ist relativ konstant bei 0,2 - 0,3 mm. Für das Maß von w_f ist auffällig, dass dieses bei beiden Prüfreiheiten L40-lang deutlich größer ist. Generell zeichnet sich der Trend ab, dass das Verhältnis w_{lin} / w_f bei den Prüfreiheiten CB und BB bei rund 50 % liegt. Im Vergleich dazu liegt das Verhältnis w_{lin} / w_f bei den Prüfreiheiten L40 bei rund 33 %. Daraus würde eine höhere Duktilität bei den Prüfreiheiten der höchsten Festigkeitsklasse von C40 gegenüber den Prüfreiheiten mit niedrigeren Festigkeitsklassen von C24 und C30 resultieren. Diese höhere Duktilität bei höherer Festigkeitsklasse zeichnete sich auch schon in den zugehörigen Arbeitslinien ab. Zudem ist sie in der Gegenüberstellung der, für die jeweilige Prüfreihe repräsentativen, mittleren, mathematischen Modelle zu erkennen; siehe Abbildung 4-12.

Um die ermittelten Verhältnisse zu vergleichen wurde der Forschungsbericht von Brandner et al. [40] herangezogen. Dabei wurden die Verhältnisse der Dehnungen von BSP-Prüfkörpern drei unterschiedlicher Steifigkeitsklassen an bestimmten Punkten der Arbeitslinie ausgewertet, unter anderem am Übergangspunkt vom linearen in den plastischen Bereich (entspricht w_{lin}) und bei maximaler Spannung (entspricht w_f). Die ermittelten Verhältnisse von w_{lin} / w_f sind je nach Steifigkeitsklasse zwischen 68 - 77 % einzuordnen und somit deutlich höher. Eine Abhängigkeit der Duktilität von der Steifigkeitsklasse konnte nicht erkannt werden, da die mittlere Steifigkeitsklasse das größte Verhältnis aufwies. Der Unterschied in den Verhältnissen kann an der unterschiedlichen Definition vom Ende des linearen Bereichs liegen. Nach Brandner wurde dabei jener Punkt als Übergangspunkt zwischen linearen und plastischen Bereich gewählt, bei dem die zugelassene Abweichung der Verformung von der ermittelten idealen Hook'schen Gerade geringer als 0,00005 mm war.

Der Formparameter c kann in eine Größenordnung zwischen 2,2 und 2,8 eingeordnet werden. Eine Abhängigkeit von der Druckfestigkeit oder des E-Moduls ist nicht erkennbar. Auch bei der kraftgesteuerten Prüfreihe hebt sich der Wert für c nicht merkbar von den anderen ab. Es ist hier allerdings anzumerken, dass auch bei Kraftsteuerung die Steigerung der Kraft je Zeiteinheit so gewählt wurde, dass, wie bei den weggesteuerten Prüfungen, die Maximallast innerhalb von rd. 300 ± 120 s erreicht werden konnte. Der wesentliche Unterschied ist daher vordergründig im Entfestigungsbereich zu erwarten, aber auch hier ist, gemäß Abbildung 4-12, keine weitere Stützung dieser Annahme gegeben. Betrachtet man die Prüfreihe mit langen und kurzen Prüfkörpern getrennt voneinander, so ist ein Trend zu erkennen, dass ein hoher Wert von w_f / w_{ini} mit einem hohen Wert für c korrespondiert.

Im Vergleich zu den oben angeführten Werten für c verwendete Glos [30] nur ganzzahlige Werte für den Formparameter. In seinen Beobachtungen konnten bei einem Wert von 7 die geringsten Abweichungen beobachten werden, jedoch bezieht sich dieser Wert auf Prüfkörper aus BSH. Die Differenz der Werte für den Formparameter kann einerseits auf das unterschiedliche Material und andererseits auf die adaptierte Form des Glos Modells zurückgeführt werden.

Abbildung 4-12 enthält eine Zusammenstellung der im Mittel und gemäß der kalibrierten mathematischen Modelle erwartbaren Arbeitslinien. Für einen besseren Vergleich wurde dabei auf die Anfangsverschiebung w_{ini} verzichtet. Auffällig ist dabei, dass sich jene Prüfreihe mit kurzen Prüfkörpern durch ihre höhere Steigung von den Prüfreihe mit langen Prüfkörpern abheben. Auch die langsamere Entfestigung, im Sinne einer größeren Gradienten, und somit höhere Duktilität der Prüfkurven höherer Festigkeit ist, wie schon erwähnt, deutlich zu erkennen. Der kraftgesteuerte Versuch ist nur durch eine geringfügig geringere Steigung von den anderen Prüfreihe unterscheidbar.

Für die Erstellung stochastisch-mechanischer Modelle auf Basis zukünftiger mathematischer Modelle wird noch darauf hingewiesen, dass die Streuung für die maximale Kraft mit rd. 10 % deutlich tiefer ist als für die Streuung für die Druckfestigkeit mit rd. 15 %, wie sich in den Ergebnissen der Prüfreihe zeigt. Grund dafür ist, dass es sich bei F_{max} um rechtszensierte Daten handelt wohingegen die Rechtszensur bei der Druckfestigkeit durch die MLE-Schätzung berücksichtigt wurde. Daher ist es empfehlenswert auch für das mathematische Modelle eine höhere Streuung beim Eingangsparameter F_{max} anzusetzen.

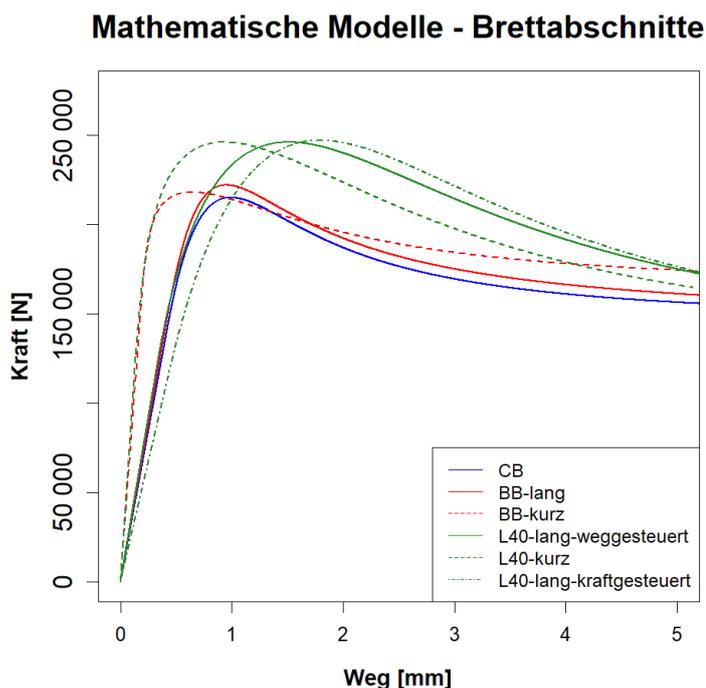


Abbildung 4-12: Darstellung aller im Mittel erwartbaren mathematischen Modelle der Brettabschnitte; zum besseren Vergleich ohne Anfangsverschiebung w_{ini}

4-3.6 FAZIT AUS BRETTABSCHNITTSPRÜFUNGEN

Zusammenfassend können aufgrund der Ergebnisse der Brettabschnittsprüfungen folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Die Druckfestigkeit wird von den jeweiligen zugrundeliegenden Normen EN 338 [3] und EN 14081 [33] deutlich unterschätzt. Dabei ist von einer konservativen Annahme auszugehen, da der Feuchtegehalt einen starken Einfluss auf die Druckfestigkeit längs zur Faser hat. Der ausgeprägte Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit wurde auch in Studien von Gerhards [19], Bäder und Németh [16] und Aicher und Stapf [15] belegt und im Zuge der Literaturrecherche in Abschnitt 2-1.4 ausführlich behandelt.

Die Auswertungen von $E_{c,0,12,global,EN}$ unter- oder überschreiten ohne ein erkennbares Muster den für die jeweilige Festigkeitsklasse in den entsprechenden Normen EN 338 [3] und EN 14081 [33] verankerten Wert, sind aber größenordnungsmäßig gleich einzuordnen. Daraus zeigt sich, wie auch schon im Abschnitt 2-1.4 ausführlich behandelt, dass die Holzfeuchte einen geringeren Einfluss auf den E-Modul als auf die Druckfestigkeit hat. Bewertet man die Ergebnisse von $E_{c,0,12,global,Reg}$ zeigt sich dieser vor allem im Vergleich der kurzen zu den langen Prüfreiheiten als instabiler gegenüber $E_{c,0,12,global,EN}$. Die Instabilität zeigt sich auch im großen Einfluss der Parameterwahl η , insbesondere bei den kurzen Prüfreiheiten; vgl. Anhang C-1. Demnach ist der Auswertungsmethode nach EN 408 [32] der Vorrang zu gegeben auch wenn diese den individuellen linearen Bereich aufgrund der abgeleiteten Prüfkurve nicht berücksichtigt.

Die Streuungen von $E_{c,0,12,global,Reg}$ sind durchgängig deutlich höher als vom Prob. Model Code (JCSS) [5] empfohlen, was auf Unsicherheiten in der Bestimmung schließen lässt, bzw. zeigt sich auch hier das instabile Verhalten der Auswertungsmethode mittels Regression im linearen Bereich.

Das Materialverhalten der höheren Festigkeitsklasse kann im Vergleich zu den niedrigeren Festigkeitsklassen als duktiler eingestuft werden, was im Verhältnis von w_{lim}/w_f sowie in den mathematischen Modellen sehr deutlich erkennbar ist; siehe Abbildung 4-12. Die Zusammenhänge der Eingangsparameter für die mathematischen Modelle sind sehr unterschiedlich, einige generelle Zusammenhänge zeichnen sich jedoch ab: Zum einen der ausgeprägte positive Zusammenhang zwischen $F_{max,u}$ und $E_{c,0,12,global,Reg}$ und zum anderen ein direkter Zusammenhang von c mit der Festigkeitsklasse bzw. mit $F_{max,u}$ sowie $E_{c,0,12,global,Reg}$ sowie ein dahingehend indirekter durch die Verkettung von Zusammenhängen zwischen c und w_{lim} sowie w_f .

4-4 PRÜFREIHEITEN MIT BRETTSCHICHTHOLZ

4-4.1 PRÜFREIHE A

Grundkenngrößen:

Betrachtet man die Ergebnisse der Prüfreihe A-VF0 in Tabelle 4-23, also jene mit vollflächiger Lasteinleitung, so ist auffällig, dass das 5 %-Quantil der Druckfestigkeit in Faserrichtung mit $f_{c,0,05,LNV} = 42,0 \text{ N/mm}^2$ deutlich höher ist als gemäß EN 1194 [28] der Festigkeitsklasse GL36h zugeordnet wird; vgl. $f_{c,0,k} = 31 \text{ N/mm}^2$ für GL36h. Hingegen zeigt sich der mittlere Druck-E-Modul längs zur Faser aus den Prüfungen mit 13.768 N/mm^2 niedriger als die 14.700 N/mm^2 welche lt. EN 1194 [28] für GL36h zu erwarten sind. Die charakteristische Rohdichte der Serie A-vollflächig übersteigt mit 493 kg/m^3 die 450 kg/m^3 , welche für GL36h verankert sind, deutlich. Die deutlich höhere Druckfestigkeit gegenüber EN 1194 [28] ist u.a. auf eine konservative Festlegung in EN 1194 [28] zurückzuführen, welche durch den hohen Feuchteinfluss auf die Druckfestigkeit begründet ist. Aus diesem Gesichtspunkt heraus und in Miteinbeziehung der höheren Rohdichte ist bei $f_{c,0,05}$ eine Differenz von rd. 20 % durchaus plausibel; die hier gegebene Differenz beträgt jedoch 35 %.

Vergleicht man die mittleren Druckfestigkeiten der Prüfreihe A untereinander sind diese bei der Prüfreihe A-TF1 (siehe Tabelle 4-24) um 15 % und bei A-TF4 (siehe Tabelle 4-25) um 17 % höher als jene Prüfungen mit vollflächiger Lasteinleitung, Prüfreihe A-VF0. Unter dem Ansatz, dass sich diese Erhöhung aus einer Lastausbreitung im Sinne der Aktivierung benachbarter Zonen, zurückführen lässt, kann durch den Bezug auf die jeweilige Prüfkörperhöhe ein zugehöriger Lastausbreitungswinkel bestimmt werden. Für die Prüfreihe A-TF1 würde sich bei einem Mittelwert der gemessenen Höhen von 75,0 mm ein Lastausbreitungswinkel von $2,7^\circ$ und für A-TF2 bei einem Mittelwert der gemessenen Höhen von 334,9 mm ein Lastausbreitungswinkel von $0,7^\circ$ einstellen. Beide Ergebnisse deuten auf einen sehr geringen und im Ausmaß vernachlässigbaren Effekt einer Lastausbreitung, im Sinne einer Erhöhung des Widerstandes betreffend Querschnittsnachweise, hin.

Tabelle 4-23: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreihe A-VF0

Prüfreihe A-VF0	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,EN}$ [N/mm ²]
Anzahl	9	9	9	9
\bar{X}_{mean}	11,0%	504	47,0	13.768
CV[X]	1,1%	1,3%	7,0%	6,7%
$X_{05,emp}$	–	494	–	12.394
$X_{05,LNV}$	–	493	42,0	12.278

Tabelle 4-24: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreihe A-TF1

Prüfreihe A-TF1	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,EN}$ [N/mm ²]
Anzahl	6	6	6	6
\bar{X}_{mean}	11,0%	506	54,0	6.605
CV[X]	1,1%	4,5%	6,2%	12,5%
$X_{05,emp}$	–	472	–	5.443
$X_{05,LNV}$	–	468	49,0	5.277

Anmerkungen: Zu hohe Vorbelastung bei Prüfung von A-TF1-05; wird in Auswertung folglich nicht berücksichtigt

Tabelle 4-25: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreihe A-TF4

Prüfreihe A-TF4	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,EN}$ [N/mm ²]
Anzahl	7	7	7	7
\bar{X}_{mean}	11,0%	490	54,8	21.036
CV[X]	1,0%	7,2%	10,2%	12,6%
$X_{05,emp}$	–	439	–	16.923
$X_{05,LNV}$	–	433	46,0	16.727

Augenscheinlich sind hingegen die deutlichen Unterschiede zwischen den E-Moduln innerhalb der Prüfreihe A. Da diese Werte von im Mittel 6.605 bis 21.036 N/mm² variieren, wurden zusätzliche Auswertungen anhand der Mercury Daten vorgenommen. Dazu wurde jeder Prüfkörper an dem Mercury-Messungen durchgeführt wurden, also all jene mit einseitiger Lasteinleitung nur über einen zentralen Bereich des Querschnittes im Sinne teilflächig-beanspruchter Prüfkörper, in drei gleich große Bereiche unterteilt, einen unteren einen oberen und einen mittleren Bereich (jeweils ein Drittel der Prüfkörperlänge), und in jedem dieser Bereiche die Dehnungen ausgewertet; siehe Abbildung 4-13 links. Betrachtet man das zugehörige Diagramm mit den Graphen der Dehnungen über der Zeit, so ist ab einer gewissen Prüfzeit ein starker Anstieg der Dehnungen im oberen Bereich, der lokalen Lasteinleitung, erkennbar; siehe Abbildung 4-13 rechts. Dieser Anstieg ist jedoch erst nach Erreichen der maximalen Kraft im Bereich der Entfestigung, gegeben; dies ist deutlich zu erkennen, wenn man die Darstellung ändert und die Dehnungen über der zugehörigen Kraft darstellt; siehe Abbildung 4-14 (rechts). In dieser Abbildung ist darüber hinaus gut erkennbar, dass es bereits im linear-elastischen Abschnitt der Arbeitslinie im unteren Bereich des Prüfkörpers, also jener Seite des vollflächigen Auflagers, zu erhöhten Stauchungen kommt. Diese erhöhten Stauchungen in einem oder beiden Randbereichen gegenüber dem mittleren Bereich zeichnen sich mit großer Mehrheit bei allen gemessenen Prüfkörpern ab. Aus den im Abschnitt 0 dargestellten Abbildung 4-17 und Abbildung 4-18 lässt sich jedoch schließen, dass die erhöhten Stauchungen in den Randbereichen vom Verhältnis der teilflächigen Lasteinleitungsfläche zur gesamten Querschnittsfläche abhängig sind und insbesondere bei kleinen Lasteinleitungsflächen auftreten. Selbiges zeichnet sich auch in der Auswertung der quantitativen Messdaten ab. Dazu wurden die Stauchungen in den Bereichen ausgewertet, pro Prüfreihe gemittelt und relativ auf die Stauchungen des mittleren Bereiches bezogen; siehe Tabelle 4-26. Folglich wird aus diesen Beobachtungen der Schluss gezogen, dass sich Randbereiche bei verhältnismäßig kleinen Lasteinleitungsflächen stärker verformen und somit zu geringeren globalen E-Modulen führen als durch lokale, anhand zentraler Dehnungsmessungen bestimmter E-Module angezeigt. Weiters wirken sich diese Randbereiche auf Prüfkörper mit geringer Länge bzw. Höhe stärker aus. Das würde den niedrigen E-Modul von A-TF1 erklären. Warum die Prüfreihe A-TF4 bei gleichem Querschnitt und gleicher Lasteinleitungsfläche sowie -situation jedoch einen derart hohen E-Modul aufweist ist weiterhin unklar. Zudem wurde noch untersucht, ob es aufgrund der Teilflächenbelastung im zentralen Querschnittsbereich eventuell einen Einfluss durch juveniles Holz gibt. Dies wäre aufgrund der ausgeprägten Differenzen zwischen den mechanischen Kenngrößen in Faserrichtung in juvenilem und adultem Holz und der gegebenen Ausrichtung der Teilflächenbelastung in radialer Richtung durchaus denkbar. Aufgrund der hohen Festigkeitsklasse der Lamellen in Prüfreihe A konnten diese jedoch überwiegend bis ausschließlich dem adulten Stammbereich zugewiesen werden.

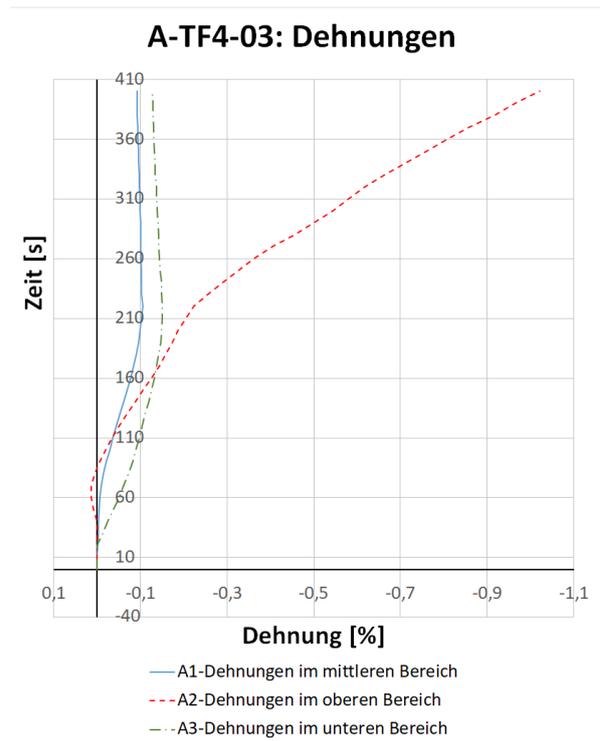
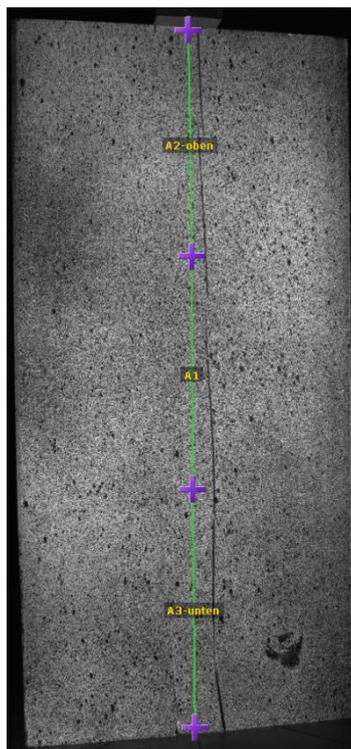


Abbildung 4-13: links: Mercury-Messung; rechts: Zugehöriges Diagramm mit den Dehnungen in drei Bereichen

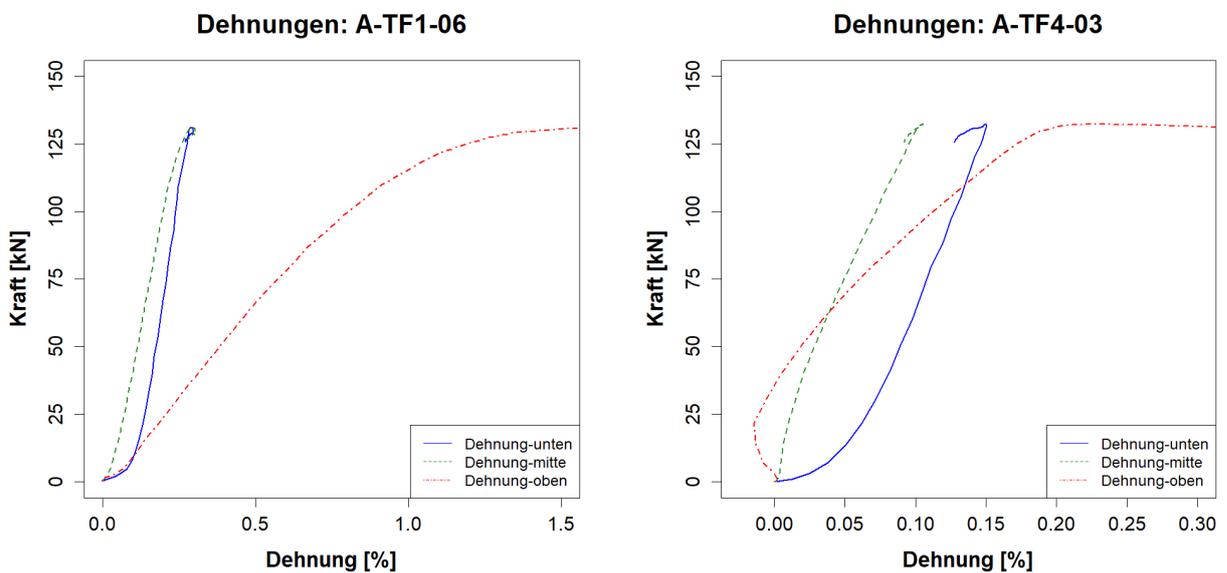


Abbildung 4-14: links: Dehnungen in den drei Bereichen repräsentativ für Prüfreihe A-TF1; rechts: Dehnungen in den drei Bereichen repräsentativ für Prüfreihe A-TF4; Achtung: Unterschiedliche Skalierung der Dehnungen

Tabelle 4-26: gemittelte relative Stauchungen bezogen auf den mittleren Bereich

relative Stauchungen	A_{LE} / A_{QS} ¹⁾ [%]	unterer Bereich [%]	mittlerer Bereich [%]	oberer Bereich [%]
A-TF1	18,8	0,81	1,00	2,27
A-TF2	18,8	1,42	1,00	1,47
B-TF1	18,8	0,96	1,00	1,48
B-TF2	37,5	0,88	1,00	1,16
B-TF3	56,3	0,98	1,00	1,16
B-TF4	50,0	0,93	1,00	0,96
E-TF1	24,0	0,82	1,00	2,10

¹⁾... Verhältnis der Lasteinleitungsfläche zur Querschnittsfläche

Eingangsparameter für das mathematische Modell:

Die Streuungen des E-Moduls (siehe Tabelle 4-27 – Tabelle 4-29) liegen zwischen 6,9 % und 9,7 % und damit unter den Streuungen für E-Moduln aus Biege- oder Zugversuchen mit 13 % nach Prob. Model Code (JCSS) [5] für Vollholz. Unter Annahme einer Mittelung der E-Module der Lamellen in diesen BSH-Prüfkörpern in Folge der parallelen Systemwirkung, im Sinne einer Homogenisierung durch zwei Lamellen, würden die genannten 13 % nach dem zentralen Grenzwertsatz rd. 9,2 % entsprechen. Somit würden die Streuungen für den E-Modul in der gleichen Größenordnung wie die umgerechnete Empfehlung des Prob. Model Code (JCSS) [5] liegen. Die Streuungen der maximalen Kraft sind demnach auch mit den für BSH umgerechneten Werten zu vergleichen; diese ergeben sich nach den Erfahrungen am Lignum Test Center (LTC) für die Druckfestigkeit in Faserrichtung bei Vollholz gemäß zuvor getätigter Betrachtungen für BSH aus zwei Lamellen zu $CV[f_{c,0,LTC,BSH}] \cong 10,6\%$ und für die Empfehlung des Prob. Model Code (JCSS) [5] zu $CV[f_{c,0,JCSS,BSH}] \cong 14,1\%$. Damit sind die Streuungen der maximalen Kraft mit 6,2 - 10 % geringfügig unter den Erfahrungen am LTC. Für die 5 %-Quantile des E-Moduls als auch der Druckfestigkeit kann eine gute Übereinstimmung zwischen den empirischen und jenen nach LNV festgehalten werden.

Tabelle 4-27: Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe A-VF0

Prüfreihe A-VF0	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,Reg}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [-]	F_{max}/F_{Ende} [-]
Anzahl	9	9	9	9	9	9	9
\bar{X}_{mean}	579	13.833	0,45	2,11	3,27	9,22	0,95
CV[X]	6,8%	6,9%	24,5%	8,9%	5,1%	31,9%	4,4%
$\bar{X}_{05,emp}$	524	12.469	–	–	–	–	–
$\bar{X}_{05,LNV}$	516	12.286	–	–	–	–	–

Tabelle 4-28: Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe A-TF1

Prüfreihe A-TF1	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,Reg}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [-]	F_{max}/F_{Ende} [-]
Anzahl	6	6	6	6	6	6	6
\bar{X}_{mean}	126	7.374	0,20	0,57	1,05	1,56	0,89
CV[X]	6,2%	9,3%	16,6%	11,5%	3,7%	53,9%	5,3%
$X_{05,emp}$	116	6.608	–	–	–	–	–
$X_{05,LNV}$	113	6.304	–	–	–	–	–

Anmerkungen: Zu hohe Vorbelastung bei Prüfdurchführung von A-TF1-05; wird in Auswertung folglich nicht berücksichtigt

Tabelle 4-29: Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe A-TF4

Prüfreihe A-TF4	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,Reg}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [-]	F_{max}/F_{Ende} [-]
Anzahl	7	7	7	7	7	6	7
\bar{X}_{mean}	128	22.112	0,29	0,84	1,39	1,10	0,90
CV[X]	10,0%	9,7%	40,8%	13,2%	7,6%	46,7%	8,8%
$X_{05,emp}$	110	18.964	–	–	–	–	–
$X_{05,LNV}$	107	18.663	–	–	–	–	–

Anmerkungen: Eingangsparameter c des Prüfkörpers A-TF4-04 als Extremwert klassifiziert

Mathematische Modelle:

Das mathematische Modell der vollflächig belasteten Prüfreihe A-VF0 in Abbildung 4-15 zeigt eine deutliche Entfestigung. Diese scheint sogar größer als die tatsächliche Entfestigung der Prüfreiheiten zu sein, ist aber aufgrund der eingeschränkten Prüfdatenaufzeichnung nicht zu validieren und dementsprechend der Gültigkeitsbereich des mathematischen Modells im Bereich der Entfestigung auf den beobachteten Bereich zu beschränken.

Betrachtet man die beiden Prüfreiheiten mit Teilflächenbelastung in Abbildung 4-16 ist im Gegensatz zur Prüfreihe A-TF1 in Prüfreihe A-TF4 eine größere Streuung erkennbar. Bei beiden Prüfreiheiten ist die Entfestigung sehr gering, somit die Gradienten, im Vergleich zur vollflächigen Lasteinleitung, relativ hoch, in manchen Prüfkörpern nahezu waagrecht. Es zeigt sich ein sehr duktilen Verhalten, das in manchen Prüfkörpern dem eines Fließplateaus ähnelt. Die unterschiedliche Entfestigung lässt sich auch in den Werten für c ablesen, für A-VF0 $c \cong 9,2$ und für A-TF1 und A-TF4 $c \cong 1,1 - 1,6$. Bei den angegebenen Werten soll noch drauf hingewiesen werden, dass die Streuung für diese im Falle von A-TF1 und A-TF4 höher ist als für A-VF0.

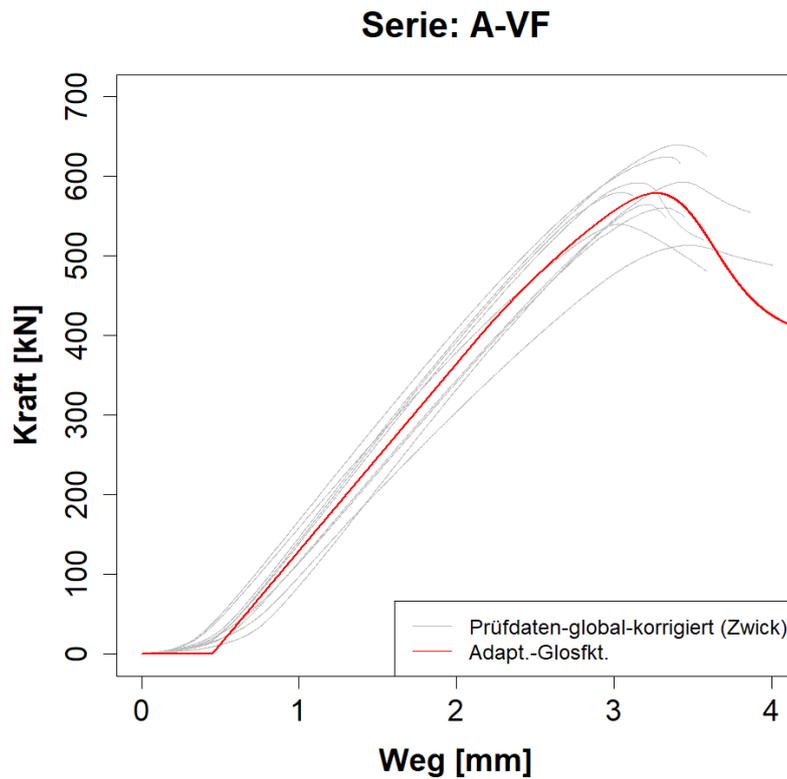


Abbildung 4-15: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie A-VF0 und des daraus im Mittel resultierenden mathematischen Modells

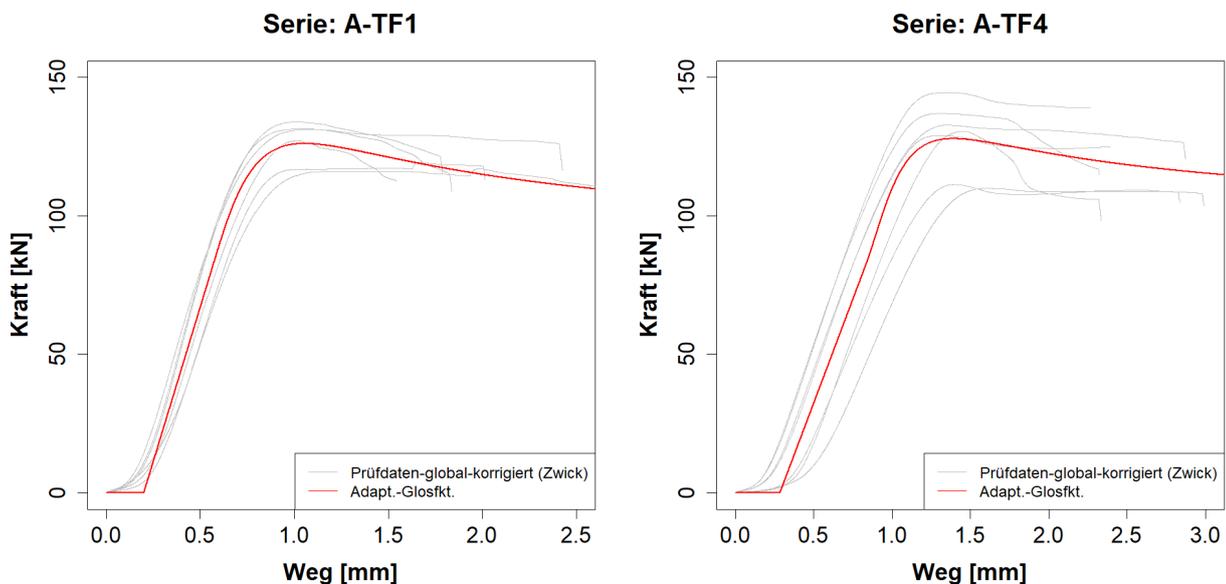


Abbildung 4-16: Darstellung der mittleren mathematischen Modelle der Prüfreiheiten A-TF1 (links) und A-TF4 (rechts) zusammen mit den korrigierten Prüfkurven

Korrelationsmatrizen:

In den folgenden Korrelationsmatrizen (Tabelle 4-30 - Tabelle 4-32) werden jene Zusammenhänge von Parametern aufgezeigt, bei denen die Analyse die Erwartungshaltung bestätigt. Das ist der Zusammenhang zwischen $F_{max,u}$ und $E_{c,0,12,Reg}$ der auf die gemeinsame Rohdichte zurückzuführen und bei allen stark ausgeprägt ist. Weiters ist der Zusammenhang von c mit $F_{max,u}$ sowie $E_{c,0,12,Reg}$ stark ausgeprägt. Darüber hinaus ist der negative Zusammenhang zwischen $E_{c,0,12,Reg}$ und w_{lin} vor allem bei A-TF1 und A-TF2 stark ausgeprägt, und jener zwischen w_f und w_{lin} , welcher bei A-VF0 und A-TF4 stark ausgeprägt vorgefunden wird, ebenfalls zu nennen.

Tabelle 4-30: Korrelationsmatrix – Prüfreihe A-VF0

Prüfreihe A-VF0	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,71	-0,29	0,15	0,13	0,6
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	-0,08	-0,33	-0,48	0,85
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	0,49	0,28	0,2
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	0,84	0,02
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	-0,22
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

Tabelle 4-31: Korrelationsmatrix – Prüfreihe A-TF1

Prüfreihe A-TF1	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,94	-0,78	-0,66	-0,56	0,78
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	-0,71	-0,62	-0,48	0,54
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	0,9	-0,03	-0,62
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	-0,2	-0,59
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	-0,51
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

Tabelle 4-32: Korrelationsmatrix – Prüfreihe A-TF4

Prüfreihe A-TF4	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,99	-0,95	-0,84	-0,77	0,77
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	-0,96	-0,9	-0,84	0,74
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	0,94	0,91	-0,82
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	0,9	-0,76
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	-0,58
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

4-4.2 PRÜFREIHE B

Grundkenngrößen:

Betrachtet man die Ergebnisse der Prüfreihe B-VF0 in Tabelle 4-33 mit vollflächiger Lasteinleitung so ist auffällig, dass das 5 %-Quantil der Druckfestigkeit in Faserrichtung mit $f_{c,0,05,LNV} = 40,0 \text{ N/mm}^2$ deutlich höher ist als gemäß EN 1194 [28] der Festigkeitsklasse GL36h zugeordnet wird; vgl. $f_{c,0,k} = 31 \text{ N/mm}^2$ für GL36h. Hingegen zeigt sich der mittlere Druck-E-Modul längs zur Faser aus den Prüfungen mit 12.898 N/mm^2 deutlich niedriger als die 14.700 N/mm^2 welche lt. EN 1194 [28] für GL36h zu erwarten sind. Die charakteristische Rohdichte der Serie B-VF0 stimmt mit 456 kg/m^3 mit den 450 kg/m^3 , welche für GL36h verankert sind, überein. Die deutlich höhere Druckfestigkeit gegenüber EN 1194 [28] ist auf eine konservative Festlegung in EN 1194 [28] zurückzuführen, welche durch den hohen Feuchteinfluss auf die Druckfestigkeit begründet ist. Aus diesem Gesichtspunkt heraus ist bei $f_{c,0,05}$ eine Differenz von rd. 20 % durchaus plausibel, hier zeigen sich aber rd. 30 %.

Vergleicht man die mittleren Druckfestigkeiten der Prüfreihe B (Tabelle 4-33 – Tabelle 4-37) untereinander, so sind diese für die teilflächigen Prüfungen TF1 zwischen 13 – 30 % höher als die der vollflächigen Prüfungen. Würde man diese Erhöhung einer Lastausbreitung und Aktivierung benachbarter Zonen zuschreiben, so lässt sich, bezogen auf die jeweilige Prüfkörperhöhe, ein Lastausbreitungswinkel bestimmen. Dabei würden sich für die Prüfreiheiten B-TF1, -TF2, -TF3 und -TF4 bei einem Mittelwert der gemessenen Prüfkörperlängen bzw. Höhen von 235,4 mm ein Lastausbreitungswinkel von $0,7^\circ$, $0,8^\circ$, $0,7^\circ$ und $1,6^\circ$ einstellen.

Tabelle 4-33: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreihe B-VF0

Prüfreihe B-VF0	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,EN}$ [N/mm ²]
Anzahl	10	10	10	10
X_{mean}	11,0%	482	44,6	12.898
CV[X]	1,1%	3,4%	7,0%	3,8%
$X_{05,emp}$	–	464	–	12.041
$X_{05,LNV}$	–	456	40,0	12.087

Tabelle 4-34: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreihe B-TF1

Prüfreihe B-TF1	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,EN}$ [N/mm ²]
Anzahl	7	7	7	7
X_{mean}	11,0%	487	50,8	14.486
CV[X]	0,7%	2,1%	3,6%	9,6%
$X_{05,emp}$	–	476	–	12.733
$X_{05,LNV}$	–	471	48,0	12.310

Tabelle 4-35: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreihe B-TF2

Prüfreihe B-TF2	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,EN}$ [N/mm ²]
Anzahl	7	7	7	7
\bar{X}_{mean}	11,0%	492	50,4	11.364
CV[X]	1,9%	2,5%	3,9%	9,1%
$\bar{X}_{05,emp}$	–	475	–	10.420
$\bar{X}_{05,LNV}$	–	472	47,0	9.803

Tabelle 4-36: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreihe B-TF3

Prüfreihe B-TF3	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,EN}$ [N/mm ²]
Anzahl	7	7	7	7
\bar{X}_{mean}	11,0%	485	51,5	11.482
CV[X]	1,1%	2,2%	4,8%	6,9%
$\bar{X}_{05,emp}$	–	475	–	10.459
$\bar{X}_{05,LNV}$	–	467	48,0	10.226

Tabelle 4-37: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreihe B-TF4

Prüfreihe B-TF4	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,EN}$ [N/mm ²]
Anzahl	7	7	7	7
\bar{X}_{mean}	11,0%	505	57,8	13.185
CV[X]	1,4%	3,0%	4,2%	5,1%
$\bar{X}_{05,emp}$	–	484	–	12.354
$\bar{X}_{05,LNV}$	–	480	54,0	12.112

In Abbildung 4-17 und Abbildung 4-18 sind die Dehnungen geteilt in unteren, mittleren und oberen Bereich der unterschiedlichen Lasteinleitungsflächen dargestellt. Dabei zeigen sich, wie bereits in Abschnitt 4-4.1 angeführt, für Lasteinleitungsflächen welche relativ zum Querschnitt kleiner sind größere Stauchungen, besonders im oberen Bereich.

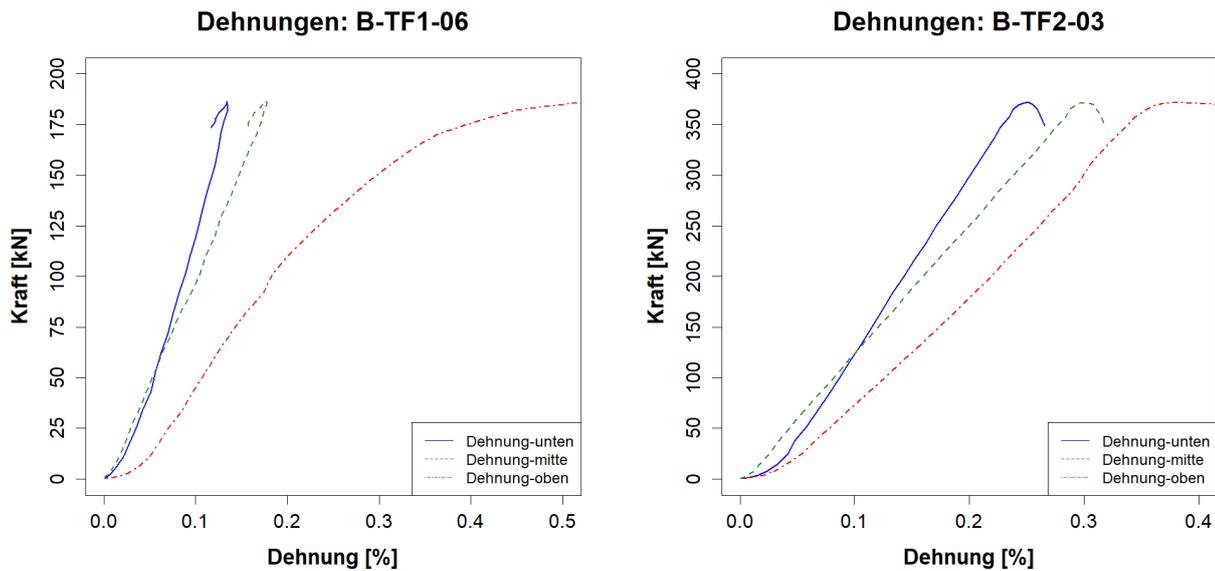


Abbildung 4-17: links: Dehnungen in den drei Bereichen repräsentativ für Prüfreihe B-TF1; rechts: Dehnungen in den drei Bereichen repräsentativ für Prüfreihe B-TF2; Achtung: Unterschiedliche Skalierung bei Kraft und Dehnung

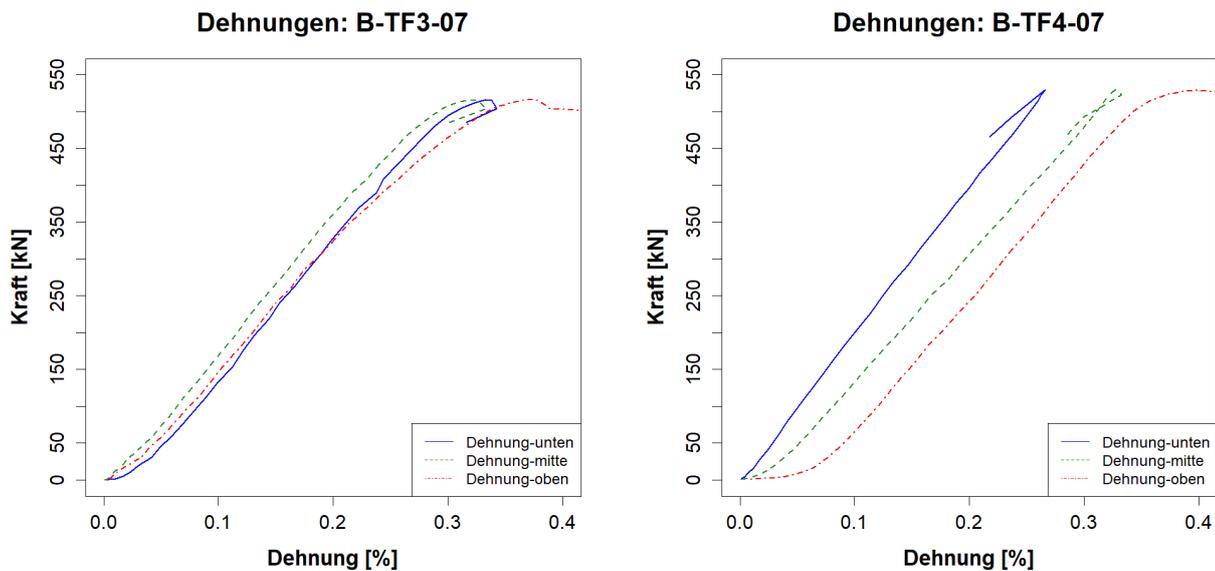


Abbildung 4-18: links: Dehnungen in den drei Bereichen repräsentativ für Prüfreihe B-TF3; rechts: Dehnungen in den drei Bereichen repräsentativ für Prüfreihe B-TF4

Eingangsparameter für das mathematische Modell:

Betrachtet man die Streuungen für den E-Modul (siehe Tabelle 4-38 – Tabelle 4-42), so sind diese zwischen 3,5 % und 8,2 % und liegen damit unter den Streuungen für E-Moduln aus Biege- oder Zugversuchen mit 13 % nach Prob. Model Code (JCSS) [5] für Vollholz. Unter Annahme einer Summenbetrachtung und in Miteinbeziehung der Homogenisierung durch drei Lamellen würden die genannten 13 % nach dem zentralen Grenzwertsatz rd. 7,5 % entsprechen. Somit würden die Streuungen für den E-Modul in der gleichen Größenordnung wie die umgerechneten Empfehlung des Prob. Model Code (JCSS) [5] liegen. Die Streuungen der maximalen Kraft sind demnach auch mit den für BSH umgerechneten Werten zu vergleichen, die ergeben sich nach den Erfahrungen am Lignum Test

Center (LTC) für die Druckfestigkeit in Faserrichtung zu $CV[f_{c,0,LTC,BSH}] \cong 8,7\%$ und für die Empfehlung des Model Code (JCSS) [5] zu $CV[f_{c,0,JCSS,BSH}] \cong 11,5\%$. Damit sind die Streuungen der maximalen Kraft mit 3,5 - 7 % geringfügig unter den Erfahrungen am LTC. Für die 5 %-Quantile des E-Moduls als auch der Druckfestigkeit kann eine gute Übereinstimmung zwischen den empirischen und jenen nach LNV festgehalten werden.

Tabelle 4-38: Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe B-VF0

Prüfreihe B-VF0	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,Reg}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [-]	F_{max}/F_{Ende} [-]
Anzahl	10	10	10	10	10	10	10
\bar{X}_{mean}	833	12.966	0,55	2,24	3,40	5,25	0,85
CV[X]	7,0%	3,5%	25,1%	8,7%	8,1%	40,9%	8,5%
$X_{05,emp}$	770	12.193	–	–	–	–	–
$X_{05,LNV}$	743	12.210	–	–	–	–	–

Tabelle 4-39: Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe B-TF1

Prüfreihe B-TF1	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,Reg}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [-]	F_{max}/F_{Ende} [-]
Anzahl	7	7	6	7	7	7	7
\bar{X}_{mean}	180	15.650	0,22	0,70	1,34	1,54	0,96
CV[X]	3,5%	8,0%	9,3%	22,8%	14,1%	23,8%	2,9%
$X_{05,emp}$	172	13.947	–	–	–	–	–
$X_{05,LNV}$	170	13.654	–	–	–	–	–

Anmerkungen: Eingangsparameter w_{ini} des Prüfkörpers B-TF1-04 als Extremwert definiert

Tabelle 4-40: Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe B-TF2

Prüfreihe B-TF2	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,Reg}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [-]	F_{max}/F_{Ende} [-]
Anzahl	7	7	7	7	7	7	7
\bar{X}_{mean}	359	12.458	0,45	1,07	1,82	2,00	0,96
CV[X]	4,0%	8,2%	23,4%	10,1%	5,6%	23,8%	2,4%
$X_{05,emp}$	338	11.263	–	–	–	–	–
$X_{05,LNV}$	336	10.871	–	–	–	–	–

Tabelle 4-41: Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe B-TF3

Prüfreihe B-TF3	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,Reg}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [-]	F_{max}/F_{Ende} [-]
Anzahl	7	7	7	7	7	6	7
\bar{X}_{mean}	550	12.238	0,39	1,03	1,71	4,03	0,95
CV[X]	4,6%	5,2%	16,4%	3,8%	7,8%	10,0%	3,7%
$X_{05,emp}$	519	11.735	–	–	–	–	–
$X_{05,LNV}$	509	11.251	–	–	–	–	–

Anmerkungen: Eingangsparameter c des Prüfkörpers B-TF3-03 als Extremwert definiert

Tabelle 4-42: Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe B-TF4

Prüfreihe B-TF4	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,Reg}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [-]	F_{max}/F_{Ende} [-]
Anzahl	7	7	7	7	7	7	7
\bar{X}_{mean}	560	13.931	0,46	1,06	1,76	4,01	0,88
CV[X]	4,8%	4,9%	27,9%	8,4%	10,1%	28,0%	5,1%
$X_{05,emp}$	526	13.130	–	–	–	–	–
$X_{05,LNV}$	517	12.828	–	–	–	–	–

Mathematische Modelle:

Das mathematische Modell der vollflächig belasteten Prüfreihe B-VF0 in Abbildung 4-19 zeigt eine deutliche Entfestigung. Diese ist größer als die tatsächliche Entfestigung der Prüfreiheiten anzeigt, d.h., dass im Bereich der Entfestigung die Repräsentanz der Prüfkurven durch das gewählte mathematische Modell eingeschränkt ist. Betrachtet man die Prüfreiheiten mit teilflächiger Belastung B-TF1 und B-TF2 in Abbildung 4-20, so ist bei beiden Prüfreiheiten die Entfestigung sehr gering ausgeprägt und somit die Gradienten relativ hoch. Es zeigt sich ein sehr duktiler Verlauf, der zum Teil dem eines Fließplateaus nahekommt. Hingegen zeigen die beiden Prüfreiheiten B-TF3 und B-TF4 in Abbildung 4-21 eine deutliche Entfestigung, wie schon bei der vollflächigen Prüfreihe B-VF0 zu erkennen war. Daraus kann geschlossen werden, dass eine vollflächige oder zumindest großflächige Lasteinleitung eine größere Entfestigung hervorruft, wohingegen eine relativ zum Querschnittsausmaß kleinflächige Lasteinleitung ein deutlich höheres plastisches Materialverhalten und folglich eine höhere Gradienten im Entfestigungsbereich aufweist.

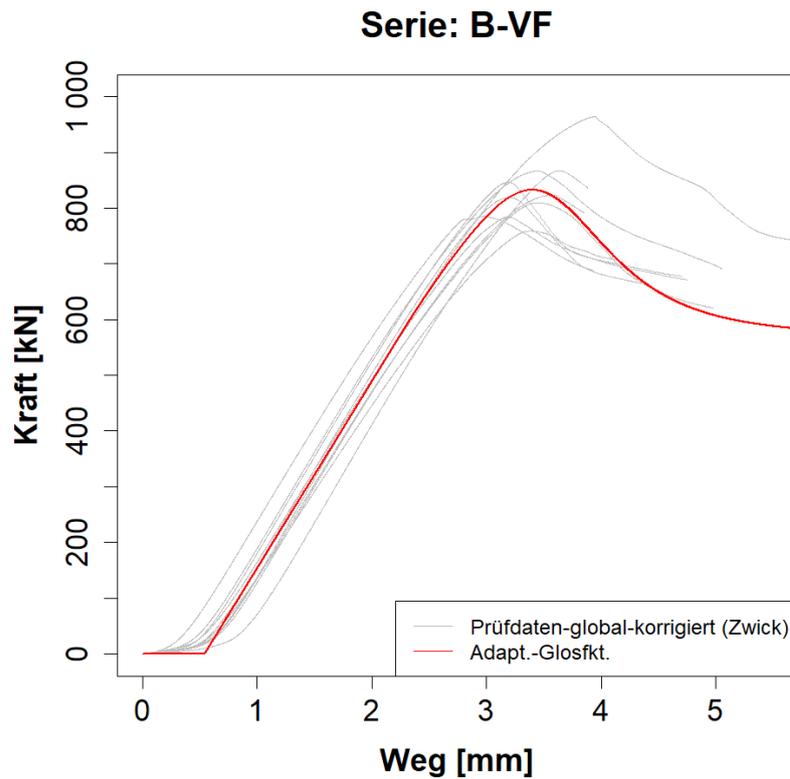


Abbildung 4-19: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie B-VF0 und des daraus resultierenden mittleren mathematischen Modells

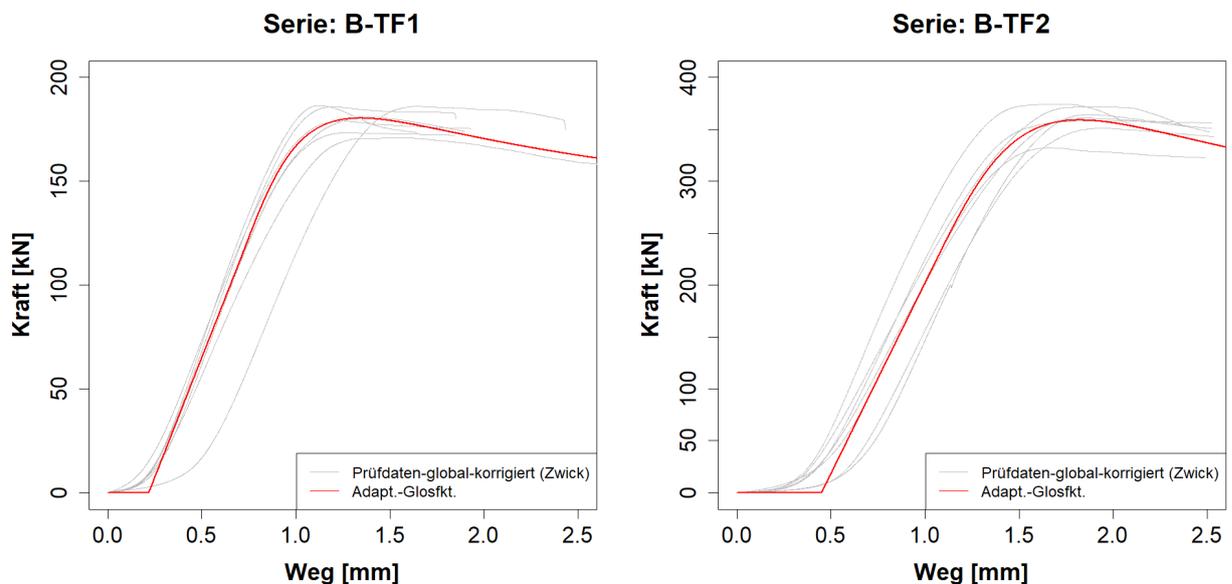


Abbildung 4-20: Darstellung der mittleren mathematischen Modelle der Prüfreihen B-TF1 (links) und B-TF2 (rechts) zusammen mit den korrigierten Prüfkurven; Achtung: Unterschiedliche Skalierung bei Kraft

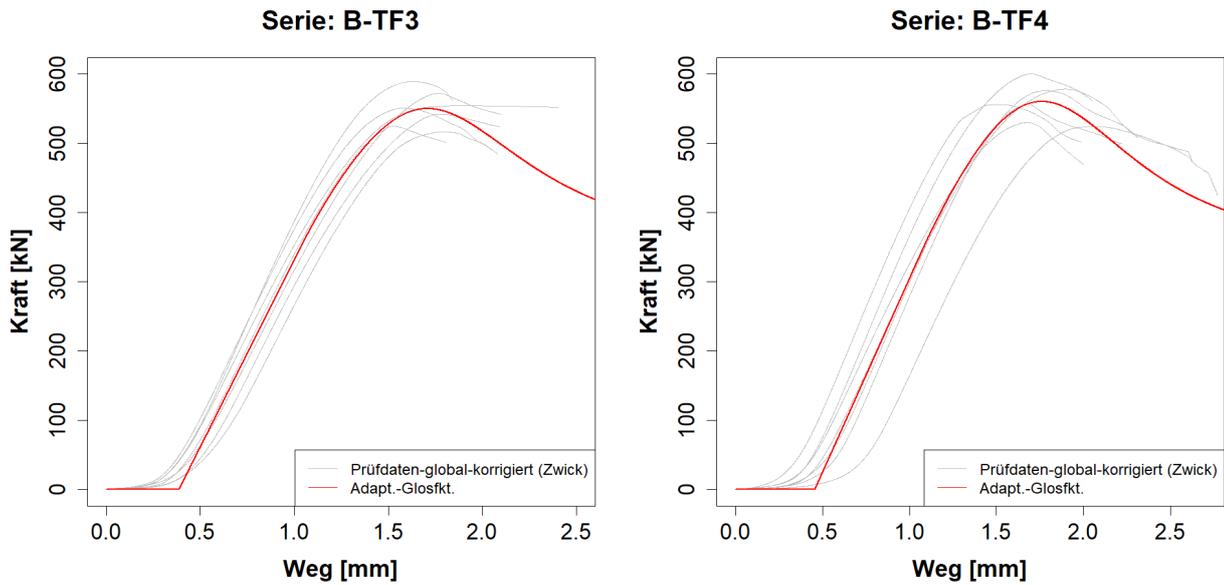


Abbildung 4-21: Darstellung der mittleren mathematischen Modelle der Prüfreiheiten B-TF3 (links) und B-TF4 (rechts) zusammen mit den korrigierten Prüfkurven

Um diesen auftretenden Effekt im Arbeitsverhalten besser einschätzen zu können, werden die Teilflächen auf ihre Querschnittsfläche bezogen und als relatives Maß angegeben. Dabei ergibt sich für B-TF1 ein relativer Flächenanteil von 19 % ($30 \cdot 120 / 160 \cdot 120$), für B-TF2 ein relativer Flächenanteil von 38 % ($60 \cdot 120 / 160 \cdot 120$), für B-TF3 ein relativer Flächenanteil von 56 % ($90 \cdot 120 / 160 \cdot 120$), und für B-TF4 ein relativer Flächenanteil von 50 % ($160 \cdot 60 / 160 \cdot 120$).

Die unterschiedliche Entfestigung lässt sich auch in den Werten für c , w_{lin} und w_f ablesen und folgt dem relativen Flächenanteil (r.A.). Es ergeben sich somit die größten Werte für c , w_{lin} und w_f bei den größten relativen Flächenanteilen; siehe Tabelle 4-43. Beispielhaft am Formparameter c angeführt ergibt sich für B-VF0 $c \cong 5,3$ (r.A. = 100 %), für B-TF1 und B-TF2 $c \cong 1,5 - 2,0$ (r.A. = 19 - 38 %) und für B-TF3 und B-TF4 $c \cong 4,0$ (r.A. = 50 - 56 %). Um die unterschiedliche Entfestigung abhängig vom relativen Flächenanteil zu verdeutlichen und einen besseren Vergleich zu ermöglichen, wurde die Prüfreihe B ohne w_{ini} und als Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Abbildung 4-22 dargestellt.

Tabelle 4-43: Mittelwerte der Parameter w_{lin} , w_f und c dem relativen Flächenanteil gegenübergestellt

Prüfreiheiten	relativer Flächenanteil [%]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [-]
B-VF0	100	2,24	3,40	5,25
B-TF1	19	0,70	1,34	1,54
B-TF2	38	1,07	1,82	2,00
B-TF3	56	1,03	1,72	4,03
B-TF4	50	1,06	1,76	4,01

Serie: B - Entfestigungen

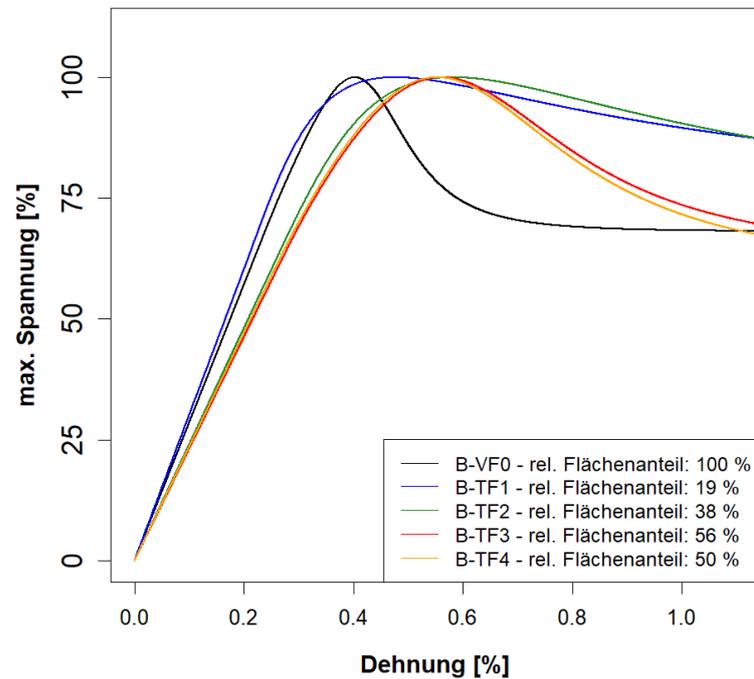


Abbildung 4-22: Gegenüberstellung der Prüfkurven in Bezug auf ihre Entfestigung, ohne w_{ini} und als Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Korrelationsmatrizen:

In den folgenden Korrelationsmatrizen (Tabelle 4-44 – Tabelle 4-48) werden jene Zusammenhänge von Parametern aufgezeigt, bei denen die Analyse die Erwartungshaltung bestätigt. Das sind der positive Zusammenhang zwischen $F_{max,u}$ und $E_{c,0,12,Reg}$, welcher auf die gemeinsame positive Beziehung zur Rohdichte zurückzuführen ist, welcher allerdings bei der Prüfreihe B-TF2 nicht abgebildet wird. Weiters der Zusammenhang von c mit $F_{max,u}$ sowie $E_{c,0,12,Reg}$; diese sind, mit Ausnahme von B-TF4, bei allen anderen Prüfreiheiten gegeben. Darüber hinaus der negative Zusammenhang zwischen $E_{c,0,12,Reg}$ und w_{lin} , welcher jedoch nur bei B-TF3 stark ausgeprägt ist, und der Zusammenhang zwischen w_f und w_{lin} , welcher sich bei der Mehrheit mäßig ausgeprägt zeigt.

Tabelle 4-44: Korrelationsmatrix – Prüfreihe B-VF0

Prüfreihe B-VF0	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,79	0,35	0,47	0,73	0,45
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	0,2	0,33	0,37	0,68
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	0,7	0,73	0,52
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	0,42	0,47
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	0,38
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

Tabelle 4-45: Korrelationsmatrix – Prüfreihe B-TF1

Prüfreihe B-TF1	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,92	0,16	0,04	-0,79	0,33
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	0,19	0,12	-0,88	0,44
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	-0,16	0,19	0,42
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	-0,07	-0,37
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	-0,15
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

Tabelle 4-46: Korrelationsmatrix – Prüfreihe B-TF2

Prüfreihe B-TF2	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,11	-0,37	-0,25	0,29	0,83
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	0,11	-0,35	-0,43	0,11
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	0,74	0,39	-0,28
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	0,48	-0,3
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	0,07
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

Tabelle 4-47: Korrelationsmatrix – Prüfreihe B-TF3

Prüfreihe B-TF3	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,56	-0,55	-0,12	-0,05	0,82
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	-0,62	-0,79	-0,6	0,38
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	0,49	0,77	-0,33
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	0,72	-0,15
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	-0,05
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

Tabelle 4-48: Korrelationsmatrix – Prüfreihe B-TF4

Prüfreihe B-TF4	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,57	-0,31	-0,19	-0,23	-0,09
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	-0,34	-0,16	-0,62	-0,62
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	0,82	0,87	-0,44
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	0,56	-0,33
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	-0,09
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

4-4.3 PRÜFREIHE C

Betrachtet man die Ergebnisse der Prüfreihe C-VF0 in Tabelle 4-49 so ist auffällig, dass das 5 %-Quantil der Druckfestigkeit in Faserrichtung mit $f_{c,0,05,LNV} = 30,0 \text{ N/mm}^2$ deutlich höher ist als gemäß EN 1194 [28] der Festigkeitsklasse GL28h zugeordnet wird; vgl. $f_{c,0,k} = 26,5 \text{ N/mm}^2$ für GL28h. Hingegen zeigt sich der mittlere Druck-E-Modul längs zur Faser aus den Prüfungen mit 9.921 N/mm^2 niedriger als die 12.600 N/mm^2 , welche lt. EN 1194 [28] für GL28h zu erwarten sind. Die charakteristische Rohdichte der Serie C ist mit 392 kg/m^3 gering unter den 410 kg/m^3 welche für GL28h verankert sind. Die höhere Druckfestigkeit gegenüber EN 1194 [28] ist auf eine konservative Festlegung in EN 1194 [28] zurückzuführen, welche durch den hohen Feuchteinfluss auf die Druckfestigkeit begründet ist. Aus diesem Gesichtspunkt heraus ist bei $f_{c,0,05}$ eine Differenz von nur rd. 13 %, vor allem im Vergleich zu den bisherigen Prüfreiheiten, etwas gering.

Tabelle 4-49: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreihe C-VF0

Prüfreihe C-VF0	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,EN}$ [N/mm ²]
Anzahl	10	10	10	10
\bar{X}_{mean}	11,0%	441	33,8	9.921
CV[X]	1,4%	7,0%	8,4%	10,8%
$\bar{X}_{05,\text{emp}}$	–	402	–	8.804
$\bar{X}_{05,LNV}$	–	392	30,0	8.315

Betrachtet man die Streuung für den E-Modul (siehe Tabelle 4-50) ist diese bei 10,6 % und liegen damit unter den Streuungen für E-Moduln aus Biege- oder Zugversuchen mit 13 % nach Prob. Model Code (JCSS) [5] für Vollholz. Unter Annahme einer Summenbetrachtung und in Miteinbeziehung der Homogenisierung durch drei Lamellen würden die genannten 13 % nach dem zentralen Grenzwertsatz rd. 7,5 % entsprechen. Somit würden die Streuungen für den E-Modul die umgerechneten Empfehlung des Prob. Model Code (JCSS) [5] überschreiten. Die Streuungen der maximalen Kraft sind demnach auch mit den für BSH umgerechneten Werten zu vergleichen, die ergeben sich nach den Erfahrungen am Lignum Test Center (LTC) für die Druckfestigkeit in Faserrichtung zu $CV[f_{c,0,LTC,BSH}] \cong 8,7 \%$ und für die Empfehlung des Model Code (JCSS) [5] zu $CV[f_{c,0,JCSS,BSH}] \cong 11,5 \%$. Damit entsprechen die Streuungen der maximalen Kraft mit 8,5 % den Erfahrungen am LTC. Für die 5 %-Quantile des E-Moduls als auch der Druckfestigkeit kann eine gute Übereinstimmung zwischen den empirischen und jenen nach LNV festgehalten werden.

Tabelle 4-50: Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe C-VF0

Prüfreihe C-VF0	$F_{\text{max},u}$ [kN]	$E_{c,0,12,Reg}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [–]	$F_{\text{max}}/F_{\text{Ende}}$ [–]
Anzahl	10	10	10	10	10	10	10
\bar{X}_{mean}	625	9.947	0,31	1,96	3,29	3,89	0,90
CV[X]	8,5%	10,6%	20,8%	7,1%	5,3%	32,5%	7,3%
$\bar{X}_{05,\text{emp}}$	568	8.829	–	–	–	–	–
$\bar{X}_{05,LNV}$	544	8.361	–	–	–	–	–

Das mathematische Modell der Prüfreihe C-VF0 in Abbildung 4-23 zeigt eine deutliche Entfestigung und weist eine hohe Streuung nach Ende des linearen Bereichs auf. Diese hohe Streuung zeigt sich auch im Variationskoeffizienten von c mit $CV[c] = 32,5 \%$.

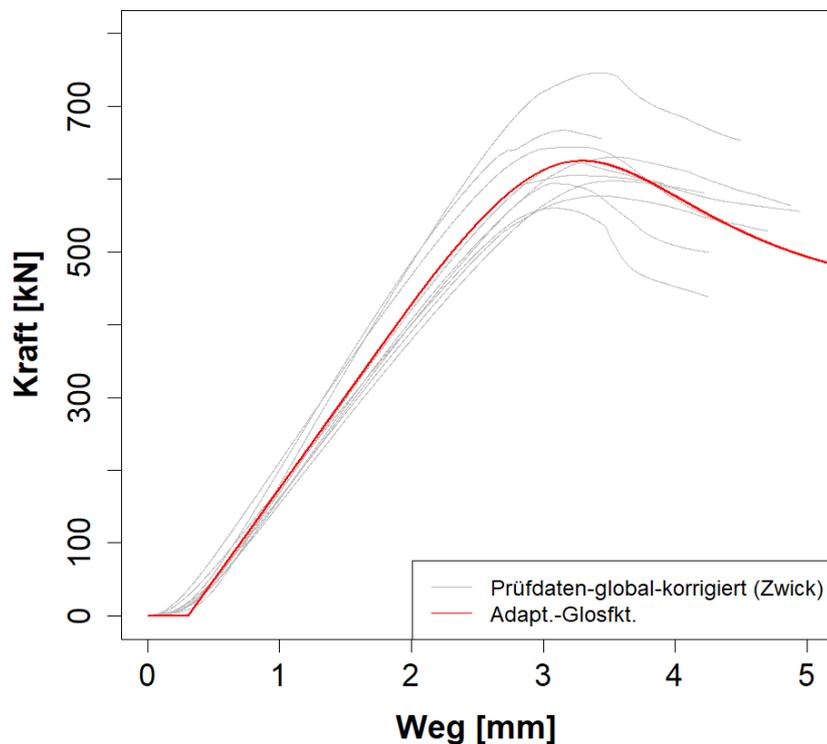
Serie: C-VF


Abbildung 4-23: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie C-VF0 und des daraus resultierenden, mittleren mathematischen Modells

In der folgenden Korrelationsmatrix in Tabelle 4-51 werden jene Zusammenhänge von Parametern aufgezeigt, bei denen die Analyse die Erwartungshaltung bestätigt. Das ist u.a. der Zusammenhang zwischen $F_{max,u}$ und $E_{c,0,12,Reg}$, welcher auf die gemeinsame Rohdichte zurückzuführen ist und sich stark ausgeprägt zeigt. Weiters der Zusammenhang von c mit $F_{max,u}$ sowie $E_{c,0,12,Reg}$; dieser ist in dieser Prüfreihe jedoch nur gering ausgeprägt. Stattdessen ist deutlich ein negativer Zusammenhang zwischen c und w_{lin} sowie w_f zu erkennen. Darüber hinaus ist ein negativer Zusammenhang zwischen $E_{c,0,12,Reg}$ und w_{lin} gegeben, allerdings nur im geringen Ausmaß. Zudem zeigt sich ein Zusammenhang zwischen w_f und w_{lin} .

Tabelle 4-51: Korrelationsmatrix – Prüfreihe C-VF0

Prüfreihe C-VF0	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,92	0,41	-0,11	0,23	0,26
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	0,37	-0,24	-0,11	0,34
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	0,18	0,32	-0,4
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	0,54	-0,49
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	-0,55
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

4-4.4 PRÜFREIHE D

Betrachtet man die Ergebnisse der Prüfreihe D-VF0 in Tabelle 4-52 so ist das 5 %-Quantil der Druckfestigkeit in Faserrichtung mit $f_{c,0,05,LNV} = 27,0 \text{ N/mm}^2$ gemäß EN 1194 [28] der Festigkeitsklasse GL28h zuzuordnen; vgl. $f_{c,0,k} = 26,5 \text{ N/mm}^2$ für GL28h. Hingegen zeigt sich der mittlere Druck-E-Modul längs zur Faser aus den Prüfungen mit 9.424 N/mm^2 niedriger als die 12.600 N/mm^2 welche lt. EN 1194 [28] für GL28h zu erwarten sind. Die charakteristische Rohdichte der Prüfreihe D ist mit 396 kg/m^3 gering unter den 410 kg/m^3 welche GL28h zugeordnet sind. Auffällig ist, dass diese Prüfreihe die einzige ist, bei der die Druckfestigkeit aus den Prüfungen mit jener charakteristischen Kenngröße nach der EN 1194 [28] gleichzusetzen ist. Dies und der zu geringe E-Modul deuten darauf hin, dass das Material GL28h unterschreitet.

Tabelle 4-52: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreihe D-VF0

Prüfreihe D-VF0	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,EN}$ [N/mm ²]
Anzahl	10	10	10	10
\bar{X}_{mean}	11,0%	447	35,4	9.424
CV[X]	2,8%	8,8%	16,4%	15,8%
$\bar{X}_{05,emp}$	–	396	–	7.317
$\bar{X}_{05,LNV}$	–	385	27,0	7.112

Betrachtet man die Streuung (siehe Tabelle 4-53) für den E-Modul übersteigt diese mit einem Wert von 16,4 % geringfügig die Streuungen für E-Moduln aus Biege- oder Zugversuchen mit 13 % nach Prob. Model Code (JCSS) [5] für Vollholz. Unter Annahme einer Summenbetrachtung und in Miteinbeziehung der Homogenisierung durch zwei Lamellen würden die genannten 13 % nach dem zentralen Grenzwertsatz rd. 9,2 % entsprechen. Somit würden die Streuungen für den E-Modul die umgerechneten Empfehlung des Prob. Model Code (JCSS) [5] deutlich überschreiten. Die Streuungen der maximalen Kraft sind demnach auch mit den für BSH umgerechneten Werten zu vergleichen, die ergeben sich nach den Erfahrungen am Lignum Test Center (LTC) für die Druckfestigkeit in Faserrichtung zu $CV[f_{c,0,LTC,BSH}] \cong 10,6 \%$ und für die Empfehlung des Model Code (JCSS) [5] zu $CV[f_{c,0,JCSS,BSH}] \cong 14,1 \%$. Damit überschreiten die Streuungen der maximalen Kraft mit 16,4 % die Empfehlungen. Für die 5 %-Quantile des E-Moduls als auch der Druckfestigkeit kann eine gute Übereinstimmung zwischen den empirischen und jenen nach LNV festgehalten werden.

Tabelle 4-53: Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe D-VF0

Prüfreihe D-VF0	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,Reg}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [–]	F_{max}/F_{Ende} [–]
Anzahl	10	10	10	10	10	10	10
\bar{X}_{mean}	421	9.481	0,27	1,49	2,53	3,43	0,90
CV[X]	16,1%	16,4%	23,3%	10,6%	9,5%	29,8%	5,0%
$\bar{X}_{05,emp}$	335	7.345	–	–	–	–	–
$\bar{X}_{05,LNV}$	318	7.093	–	–	–	–	–

Das mathematische Modell der Prüfreihe D-VF0 in Abbildung 4-24 zeigt eine deutliche Entfestigung und weist eine hohe Streuung nach Ende des linearen Bereichs auf. Diese hohe Streuung zeigt sich auch im Variationskoeffizienten von c mit $CV[c] = 29,8 \%$. Zudem ist noch zu erkennen, dass Prüfkörper geringerer Festigkeit ein duktileres Materialverhalten aufweisen als jene hoher Festigkeit.

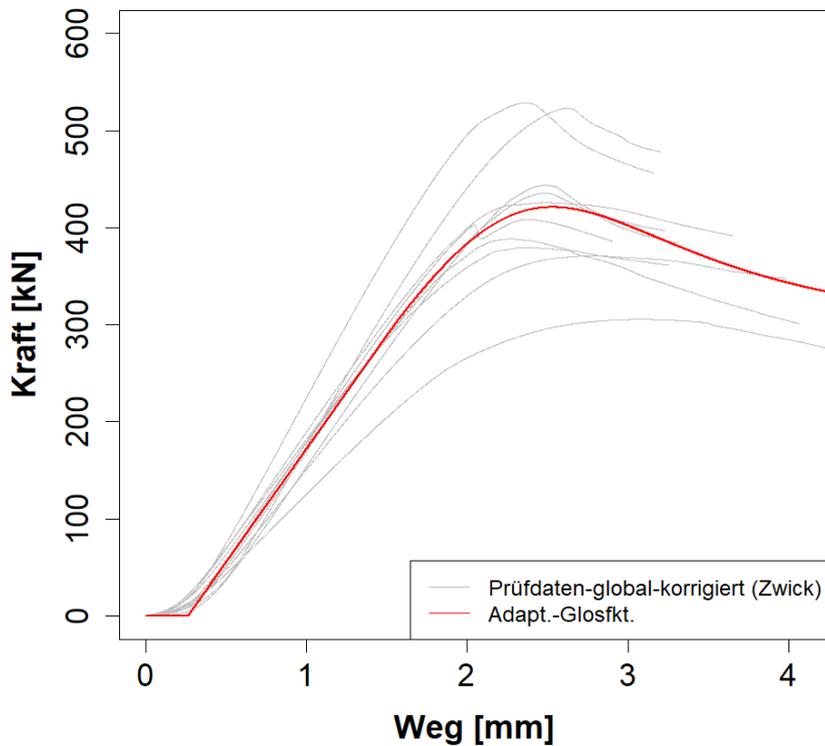
Serie: D-VF


Abbildung 4-24: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie D-VF0 und des daraus resultierenden, mittleren mathematischen Modells

In der folgenden Korrelationsmatrix in der Tabelle 4-54 werden jene Zusammenhänge von Parametern aufgezeigt, bei denen die Analyse die Erwartungshaltung bestätigt. Das ist u.a. der Zusammenhang zwischen $F_{max,u}$ und $E_{c,0,12,Reg}$, welcher auf die gemeinsame Rohdichte zurückzuführen ist und sich stark ausgeprägt zeigt. Weiters ist der Zusammenhang von c mit $F_{max,u}$, $E_{c,0,12,Reg}$, w_{ini} sowie w_{lin} gut erkennbar. Der negative Zusammenhang zwischen $E_{c,0,12,Reg}$ und w_{lin} ist nicht erkennbar, jedoch der zwischen $E_{c,0,12,Reg}$ und w_f .

Tabelle 4-54: Korrelationsmatrix – Prüfreihe D-VF0

Prüfreihe D-VF0	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,97	0,53	0,46	-0,49	0,48
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	0,40	0,24	-0,62	0,35
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	0,69	0,21	0,57
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	0,20	0,64
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	0,18
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

4-4.5 AUFTRETENDE HOMOGENISIERUNGSEFFEKTE

Durch die in Abschnitt 2-3.3 beschriebenen Systemeffekte kommt es bei BSH bei Beanspruchung auf Druck in Faserrichtung in Folge der paralleler Systemwirkungen zwischen den Lamellen bzw. der seriellen, sub-parallelen Systemwirkungen bei Bezug auf Brettabschnitte zu sogenannten Homogenisierungseffekten in den Kenngrößen. Im Zuge dessen kommt es zu einer Mittelung des E-Moduls im linear-elastischen Bereich sowie auch zu einer Mittelung der Rohdichte. Unter Betrachtung dieser Umstände ergibt sich approximativ nach dem Zentralen Grenzwertsatz und entsprechender Berücksichtigung der Verteilung von arithmetischen Mittelwerten für den Variationskoeffizienten, als relatives Streuungsmaß, folgende Beziehung in Abhängigkeit der Anzahl der parallel wirkenden Lamellen bzw. Brettabschnitte:

$$CV[X_N] = \frac{CV[X_1]}{\sqrt{N}} \quad (4.1)$$

Dabei sind:

$CV[X_N]$... Variationskoeffizient der Kenngröße X bei N Lamellen

$CV[X_1]$... Variationskoeffizient der Kenngröße X bei einer Lamelle ($N = 1$)

N Anzahl der parallel wirkenden Lamellen

Im Folgenden werden Prüfreiheiten vergleichbarer Festigkeitsklasse aber mit unterschiedlicher Lamellenanzahl verglichen; siehe Tabelle 4-55. Stellt man die Rohdichte der Prüfreiheit BB-lang mit jener aus Prüfreiheiten C-VF0 und D-VF0 gegenüber, würden sich die 10,5 % von BB-lang nach Gl. (4.1) für zwei Lamellen zu rd. 7,4 % und für drei Lamellen zu rd. 6,1 % ergeben. Diese Werte sind im Vergleich zu den Streuungen von D-VF0 mit 8,8 % und C-VF0 mit 7,0 % jedoch etwas tiefer. Für den Vergleich der Rohdichten der Prüfreiheit L40-lang-weggesteuert mit den Prüfreiheiten A-VF0 und B-VF0 wird die Streuung der Prüfreiheit L40-lang-weggesteuert von 6,8 % nach Gl. (4.1) umgerechnet. Es ergibt sich für zwei Lamellen eine Streuung von rd. 4,8 % und für drei Lamellen eine Streuung von rd. 3,9 %, welche beide in der Größenordnung der beobachteten Streuungen der Prüfreiheiten A-VF0 mit 4,3 % und B-VF0 mit 2,6 % sind. Die Homogenisierung der Druckfestigkeit und des E-Moduls verhält sich ähnlich mit Ausnahme der Streuung der Druckfestigkeit von D-VF0, diese ist etwas hoch. Generell zeigt sich, dass sich eine Homogenisierung einstellt auch wenn diese etwas von den Annahmen als Basis der theoretischen Modellbetrachtung abweicht. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die Streuung nicht nur mit der Lamellenanzahl, sondern auch mit der Festigkeitsklasse abnimmt.

Tabelle 4-55: Variationskoeffizienten der langen Brettabschnitts- und der vollflächigen BSH-Prüfungen

Variationskoeffizienten	Festigkeitsklasse	Lamellen-Anzahl N	$CV[\rho_{12}]$ [%]	$CV[f_{c,0,12}]$ [%]	$CV[E_{c,0,12,EN}]^{1)}$ [%]
BB-lang	C30 (Basis für GL28)	1	10,5	14,4	20,4
D-VF0	GL28h	2	8,8	16,4	15,8
C-VF0	GL28h	3	7,0	8,4	10,8
L40-lang-weggesteuert	L40 (Basis für GL36)	1	6,8	12,0	16,1
A-VF0	GL36h	2	4,3 ²⁾	7,8 ²⁾	10,6 ²⁾
B-VF0	GL36h	3	2,6 ²⁾	4,7 ²⁾	6,9 ²⁾

Anmerkungen: ¹⁾...für die Brettabschnittsprüfungen wurde der Variationskoeffizient von $E_{c,0,12,Reg,lokal}$ herangezogen

²⁾...Mittelwert der gesamten Prüfreiheit

Der Vergleich der Mittelwerte vollflächiger Prüfreiheiten mit gleicher Holzgüte (siehe Tabelle 4-56), also BB-lang vs. C-VF0 und D-VF0 sowie L40-lang-weggesteuert vs. A-VF0 und B-VF0, zeigt, dass mit zunehmendem N diese abfallen. Dieser Abfall ist für serielle, sub-parallele Systeme bei Materialien bzw.

Produkten mit linear-elastischem Verhalten erwartbar, für das hier gegebene Materialverhalten mit augenscheinlich plastischen Anteilen doch überraschend. Durch den Abfall der Mittelwerte wird die Erhöhung der 5 %-Quantile, welche durch die geringe Streuung im Zuge der Homogenisierung auftritt, etwas abgeschwächt. Insgesamt wirkt sich die Homogenisierung auf die 5 %-Quantile der Druckfestigkeit, welche schlussendlich zur Bemessung von Bauteilen herangezogen werden, aber positiv aus.

Tabelle 4-56: Mittelwerte der langen Brettabschnitts- und vollflächigen BSH-Prüfungen

Mittelwerte	Festigkeitsklasse	Lamellen-Anzahl N	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,EN}$ ¹⁾ [N/mm ²]
BB-lang	C30	1	455	38,5	13.243
D-VF0	GL28h	2	447	35,4	9.424
C-VF0	GL28h	3	441	33,8	9.921
L40-lang-weggesteuert	L40	1	486	40,5	14.235
A-VF0	GL36h	2	504	47,0	13.768
B-VF0	GL36h	3	482	44,6	12.898

Anmerkungen: ¹⁾...Für die Brettabschnittsprüfungen wurde der Variationskoeffizient von $E_{c,0,12,Reg,lokal}$ herangezogen

In Abbildung 4-25 sind die mathematischen Modelle der langen Brettabschnitts-Prüfreiheiten sowie die der vollflächigen BSH-Prüfreiheiten als Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Dabei wurden diese nach Lamellenanzahl farblich getrennt; dabei entspricht Blau $N = 1$, Grün $N = 2$ und Rot $N = 3$. Es zeigt sich, dass der E-Modul mit steigender Lamellenanzahl geringfügig abnimmt. Zudem zeigt sich, dass eine stärkere Entfestigung mit steigender Lamellenanzahl verbunden ist, mit Ausnahme von A-VF0.

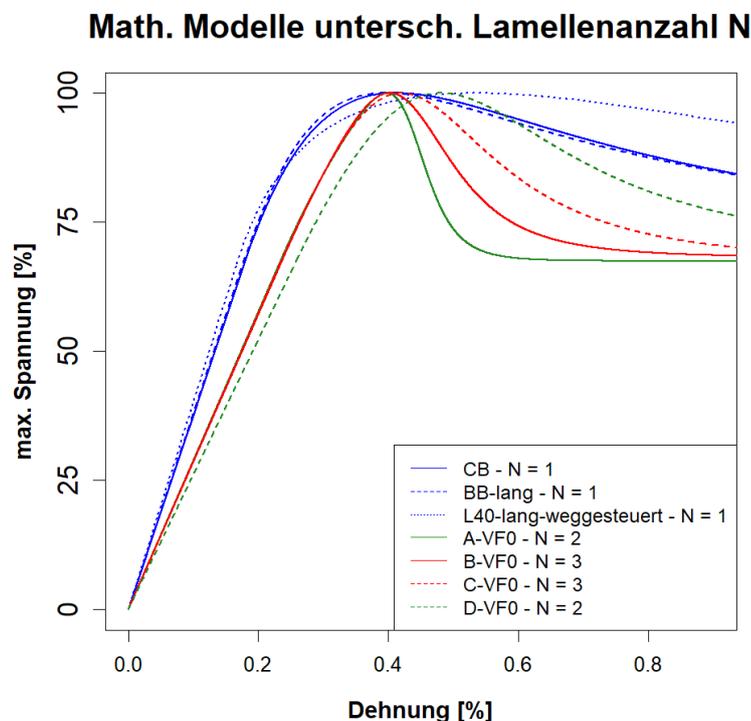


Abbildung 4-25: Gegenüberstellung der mittleren mathematischen Modelle mit unterschiedlicher Lamellenanzahl ($N = 1$ – blau, $N = 2$ – grün, $N = 3$ – rot) als Spannungs-Dehnungs-Diagramm

4-4.6 DISKUSSION DER EINGANGSPARAMETER FÜR DAS MATHEMATISCHE MODELL

Beginnend bei $E_{c,0,12,Reg}$ in Tabelle 4-57 variiert dieser Parameter im Mittel zwischen 12.000 und 14.000 N/mm² für die Festigkeitsklasse GL36h, mit Ausnahme der Prüfreiheiten A-TF1, A-TF2 und B-TF1. Damit ist der E-Modul tiefer als der lt. EN 1194 [28] dafür festgelegte Wert von 14.700 N/mm². Für die Festigkeitsklasse GL28h ist $E_{c,0,12,Reg}$ im Mittel zwischen 9.500 und 10.000 N/mm² einzuordnen. Vergleicht man die Steigungen der mathematischen Modelle in Abbildung 4-26 erkennt man, dass für höhere Festigkeitsklassen grundsätzlich größere Steigungen abgebildet werden. Ausnahmen bilden A-TF1 und A-TF4 bei denen die E-Moduln nicht der zugeordneten Festigkeitsklasse entsprechen. Weiters wird darauf hingewiesen, dass die mathematischen Modelle in Abbildung 4-26 in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt werden, im Unterschied zu den bisherigen Kraft-Weg-Diagrammen. Grund dafür ist eine bessere Lesbarkeit, da so die unterschiedlichen Querschnittsflächen ausgeglichen werden.

Tabelle 4-57: Mittelwerte der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreiheiten BSH

Mittelwerte	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,Reg}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [-]	F_{max}/F_{Ende} [-]
A-VF0	579	13.833	0,45	2,11	3,27	9,22	0,95
A-TF1	126	7.374	0,20	0,57	1,05	1,56	0,89
A-TF4	128	22.112	0,29	0,84	1,39	1,10	0,90
B-FV0	833	12.966	0,55	2,24	3,40	5,25	0,85
B-TF1	180	15.650	0,22	0,70	1,34	1,54	0,96
B-TF2	359	12.458	0,45	1,07	1,82	2,00	0,96
B-TF3	550	12.238	0,39	1,03	1,71	4,03	0,95
B-TF4	560	13.931	0,46	1,06	1,76	4,01	0,88
C-FV0	625	9.947	0,31	1,96	3,29	3,89	0,90
D-FV0	421	9.481	0,27	1,49	2,53	3,43	0,90

Anhand der Parametersätze für das mathematische Modell zeigt sich, dass hohe Festigkeiten und großflächige Lasteinleitungen zu ausgeprägten Entfestigungen im BSH führen. Hingegen kommt es bei geringen Festigkeiten und kleinflächigen Lasteinleitungen zu einem sehr duktilen Materialverhalten mit geringer Entfestigung; siehe auch Abbildung 4-26. Dieses Materialverhalten wird auch in den Werten des Formparameters c gut abgebildet. Eine hohe Entfestigung hat einen hohen Wert für c und eine geringe Entfestigung einen geringen Wert für c zur Folge.

Mathematische Modelle - BSH

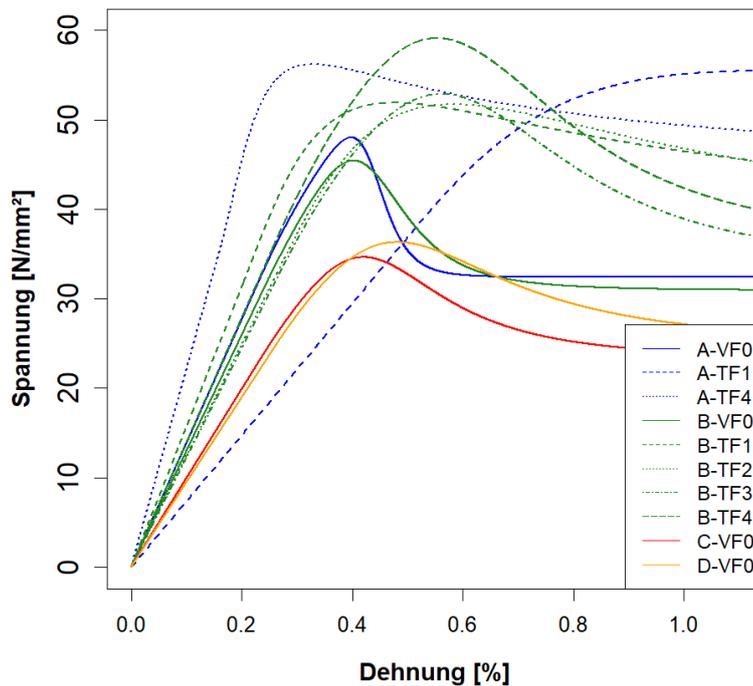


Abbildung 4-26: Darstellung aller im Mittel erwartbaren mathematischen Modelle der BSH Prüfreiheiten; zum besseren Vergleich ohne Anfangsverschiebung w_{ini} und als Spannungs-Dehnungs-Diagramm

4-4.7 FAZIT AUS BSH-PRÜFUNGEN

Zusammenfassend können aufgrund der Ergebnisse der BSH-Prüfungen folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Die Druckfestigkeit wird, wie auch schon bei den Brettabschnitten, von der zugrundeliegenden EN 1194 [28] deutlich unterschätzt. Dabei ist von einer konservativen Annahme auszugehen, da der Feuchtegehalt einen starken Einfluss auf die Druckfestigkeit längs zur Faser hat. Der starke Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit wurde auch in Studien von Gerhards [19], Bäder und Németh [16] und Aicher und Stapf [15] belegt und im Zuge der Literaturrecherche in Abschnitt 2-1.4 ausführlich behandelt.

Im Gegensatz zur Druckfestigkeit liegen die E-Moduln mehrheitlich unter den von EN 1194 [28] für die jeweilige Festigkeitsklasse verankerten Werten. Zudem zeigen sich erhöhte Stauchungen in den Randzonen; dies gilt insbesondere für kleine Teilflächen und den Bereich der Lasteinleitung.

Eine Homogenisierung durch Systemeffekte aufgrund der Bildung eines parallelen Systems der Lamellen ist in den Streuungen deutlich erkennbar. In Folge liegen die Streuungen der BSH- deutlich unter jenen der Brettabschnittsprüfkörper. Dabei ist festzuhalten, dass die Streuungen mit steigender Lamellenanzahl und Festigkeitsklasse abnehmen. Der Vergleich der Mittelwerte zeigt, dass diese mit zunehmenden N abfallen. Insgesamt wirkt sich die Homogenisierung trotz geringer Abnahme der Mittelwerte durch die geringeren Streuungen positiv auf die 5 %-Quantile der Druckfestigkeit, welche schlussendlich zur Bemessung von Bauteilen herangezogen werden.

Das Materialverhalten ist den Beobachtungen zufolge von drei Einflussgrößen abhängig: (i) der Festigkeitsklasse, (ii) dem Verhältnis der Lasteinleitungsfläche zum Querschnitt und (iii) der Anzahl der Lamellen. Betreffend der Festigkeitsklasse ist, im Gegensatz zu den Brettabschnitten, bei höheren Klassen ein duktileres Verhalten als bei tieferen Klassen zu beobachten; siehe Abbildung 4-26. Bezüglich

des Verhältnisses der Lasteinleitungsfläche zum Querschnitt zeigt sich eine ausgeprägtere Entfestigung bei größeren Verhältnissen. Dabei kann bei den kleinsten Lasteinleitungsflächen ein sehr duktileres Verhalten festgehalten werden, welches einem Fließplateau nahekommt; siehe Abbildung 4-20 und Abbildung 4-21. Hinsichtlich der Anzahl der Lamellen ist mit steigender Anzahl eine ausgeprägtere Entfestigung zu erwarten.

Der Formparameter c des adaptierten Glos Modells (siehe Abschnitt 2-4.2) nimmt für BSH Werte zwischen rd. 1,1 - 5,3 ein, wobei der hohe Wert von A-V0 mit 9,2 als Extremwert einzustufen ist. Dabei ist zu beachten, dass die tieferen Werte für kleine Teilflächenbelastungen gültig sind und diese eine hohe Duktilität widerspiegeln. Zum Vergleich mit den Werten aus den Brettabschnittsprüfungen sind daher nur die Werte der vollflächigen BSH-Prüfungen heranzuziehen; diese liegen zwischen rd. 3,4 - 5,3, abgesehen von A-V0 mit 9,2 als Extremwert. Damit nimmt c für BSH in etwa doppelt so hohe Werte an als für die Brettabschnitte; diese betragen zwischen rd. 2,2 - 2,8. Vergleicht man die beobachteten Werte der BSH-Prüfungen noch mit Werten aus der Literatur so gibt Glos [30] für sein Modell einen deutlich höheren Wert von 7 an, einzig der Extremwert von A-V0 überschreitet diesen.

Die Beobachtungen betreffend der Lastausbreitung werden in Abschnitt 4-6 diskutiert.

4-5 PRÜFREIHE MIT BRETTSPERRHOLZ

4-5.1 PRÜFREIHE E

Grundkenngrößen:

Bevor Vergleiche mit Werten welche für CL24h verankert sind angestellt werden können, müssen diese umgerechnet werden, da es sich bei den Prüfergebnissen um „verschmierte“ Werte unter Berücksichtigung des Gesamtquerschnittes einschließlich einer Querlage handelt. Da die Längs- und Querlagen parallel beansprucht werden verteilt sich die Last gemäß den Steifigkeiten der jeweiligen Lagen. Aufgrund des geringen E-Moduls quer zur Faser kann man vereinfachend davon ausgehen, dass der Anteil der Querlagen vernachlässigbar ist. Somit wirken bei einer konstanten Schichtstärke und drei Lagen vereinfacht nur zwei Drittel des Querschnitts. Die charakteristische Druckfestigkeit ist für die Hauptlagen mit $f_{c,0,CLT,net,k} = 24,0 \text{ N/mm}^2$ und für die Querlagen mit $f_{c,90,CLT,k} = 3,0 \text{ N/mm}^2$ in [41] festgelegt. Es ergibt sich somit eine verschmierte charakteristische Druckfestigkeit von $16,0 \text{ N/mm}^2$. Dabei ist auffällig, dass die Druckfestigkeit aus den vollflächigen Prüfungen in Tabelle 4-58 mit $f_{c,0,05,LNV} = 26,0 \text{ N/mm}^2$ deutlich höher ist. Dies ist auf eine konservative Festlegung in [41] zurückzuführen, welche durch den hohen Feuchteinfluss auf die Druckfestigkeit begründet ist. Doch selbst unter Berücksichtigung einer damit begründeten konservativen Festlegung ist bei $f_{c,0,05}$ eine Differenz von rd. 50 % sehr hoch und folglich wäre das Material einer höheren Festigkeitsklasse zuzuordnen.

Für den E-Modul kann in den Hauptlagen entsprechend Vollholz $E_{0,CLT,mean} = 11.000 \text{ N/mm}^2$ und in den Querlagen $E_{c,90,CLT,mean} = 350 \text{ N/mm}^2$ angesetzt werden. Verschmiert würde dies vereinfacht einen E-Modul von 7.450 N/mm^2 ergeben. Dieser ist deutlich höher als der gemessene der Prüfreihe E mit im Mittel rd. 4.500 N/mm^2 . Da die Prüfkörper dieser Prüfreihe eine geringe Höhe aufweisen ist der Unterschied der E-Moduln auf die erhöhten Stauchungen in den Randzonen zurückzuführen.

Die charakteristische Rohdichte ist mit rd. 440 kg/m^3 deutlich über der für CL24h festgelegten Rohdichte von 385 kg/m^3 . Dies würde auch dafürsprechen, dass das Material einer höheren Festigkeitsklasse zuzuordnen ist.

Vergleicht man die mittleren Druckfestigkeiten der Prüfreihe E (siehe Tabelle 4-58 und Tabelle 4-59) untereinander, so sind diese für die Prüfungen mit Teilflächenbeanspruchung (TF) um rd. 7 % höher als die der vollflächigen Prüfungen. Würde man diese Erhöhung einer Lastausbreitung und Aktivierung benachbarter Zonen zuschreiben, so lässt sich der Lastausbreitungswinkel konstant über die Höhe mit $0,4^\circ$ bestimmen.

Tabelle 4-58: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreihe E-VF0

Prüfreihe E-VF0	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,app,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,EN,app,12}$ [N/mm ²]
Anzahl	5	5	5	5
\bar{X}_{mean}	10,0%	461	28,4	4.624
CV[X]	2,1%	4,7%	5,9%	15,3%
$X_{05,emp}$	–	438	–	3.931
$X_{05,LNV}$	–	427	26,0	3.591

Tabelle 4-59: Ergebnisse der Grundkenngrößen – Prüfreihe E-TF1

Prüfreihe E-TF1	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,app,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,EN,app,12}$ [N/mm ²]
Anzahl	5	5	5	5
\bar{X}_{mean}	10,0%	456	30,5	4.475
CV[X]	2,4%	1,7%	6,4%	11,7%
$X_{05,emp}$	–	449	–	3.943
$X_{05,LNV}$	–	444	27,0	3.670

Eingangsparameter für das mathematische Modell:

Betrachtet man die Streuungen für die E-Moduln (siehe Tabelle 4-60 und Tabelle 4-61) sind diese zwischen rd. 9 und 14 % und in der Größenordnung der Streuung von BSH mit zwei Lamellen einzuordnen. Die Streuungen der maximalen Kraft mit rd. 6 % liegen etwas unter den Streuungen der maximalen Kraft für BSH mit zwei Lamellen. Für die 5 %-Quantile des E-Moduls als auch der Druckfestigkeit kann eine gute Übereinstimmung zwischen den empirischen und jenen nach LNV festgehalten werden.

Tabelle 4-60: Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe E-VF0

Prüfreihe E-VF0	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,Reg}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [–]	F_{max}/F_{Ende} [–]
Anzahl	5	5	5	5	5	4	5
\bar{X}_{mean}	691	4.879	0,31	0,93	1,73	2,47	0,90
CV[X]	5,8%	14,2%	32,2%	15,0%	11,9%	14,4%	1,6%
$X_{05,emp}$	642	4.184	–	–	–	–	–
$X_{05,LNV}$	626	3.855	–	–	–	–	–

Anmerkungen: Eingangsparameter c des Prüfkörpers E-VF0-01 als Extremwert klassifiziert

Tabelle 4-61: Ergebnisse der Eingangsparameter für das mathematische Modell – Prüfreihe E-TF1

Prüfreihe E-TF1	$F_{max,u}$ [kN]	$E_{c,0,12,Reg}$ [N/mm ²]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [–]	F_{max}/F_{Ende} [–]
Anzahl	5	5	5	5	5	5	5
\bar{X}_{mean}	179	5.589	0,43	1,06	1,68	1,94	0,91
CV[X]	6,2%	8,8%	37,4%	19,3%	10,0%	32,0%	5,4%
$X_{05,emp}$	168	5.007	–	–	–	–	–
$X_{05,LNV}$	161	4.810	–	–	–	–	–

Mathematische Modelle:

Die im Mittel sich ergebenden mathematischen Modelle der Prüfreihe E und die Prüfkurven aller Prüfkörper sind in Abbildung 4-27 dargestellt. Dabei zeigen die vollflächigen Prüfungen eine ausgeprägtere Entfestigung als jene nur über Teilflächen beanspruchten, welche sich demnach duktiler verhalten. Dies wird auch im Parameter c abgebildet, welcher für die vollflächigen Prüfungen einen höheren Wert annimmt. Ähnliches wurde bereits bei der Prüfrisserie B der BSH-Prüfungen beobachtet und im Abschnitt 0 unter „Mathematische Modelle“ ausführlich behandelt. Darüber hinaus ist bei den beiden mathematischen Modellen der Prüfreihe E auffällig, dass beide bei gleicher Bruchdehnung versagen.

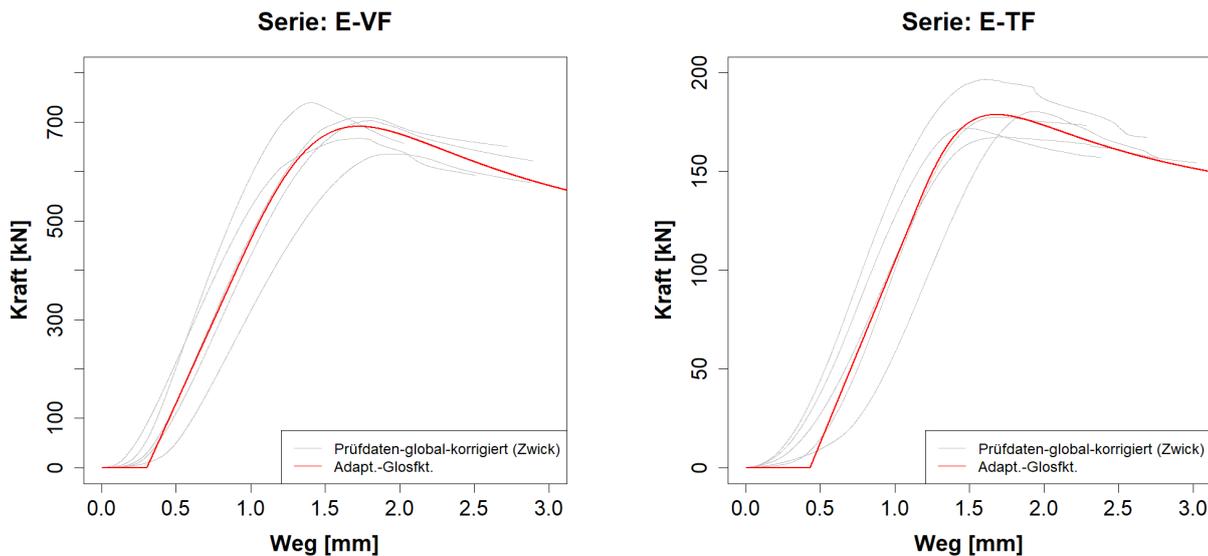


Abbildung 4-27: Darstellung der sich im Mittel ergebenden mathematischen Modelle der Prüfrisreien E-VF (links) und E-TF (rechts) zusammen mit den Prüfkurven

Korrelationsmatrizen:

In den folgenden Korrelationsmatrizen in Tabelle 4-62 und Tabelle 4-63 werden jene Zusammenhänge von Parametern aufgezeigt, bei denen die Analyse die Erwartungshaltung bestätigt. Das ist u.a. der Zusammenhang zwischen $F_{max,u}$ und $E_{c,0,12,Reg}$, welcher auf die gemeinsame Beziehung zur Rohdichte zurückzuführen ist. Weiters die Zusammenhänge von c mit $F_{max,u}$ sowie $E_{c,0,12,Reg}$, welche vor allem bei der Prüfrisreihe E-TF stark ausgebildet sind. Darüber hinaus der negative Zusammenhang zwischen $E_{c,0,12,Reg}$ und w_{lin} , welcher jedoch nur in Prüfrisreihe E-VF ausgeprägt ist, und der Zusammenhang zwischen w_f und w_{lin} , welcher sich bei beiden Prüfrisreien E-VF und E-TF stark ausgeprägt zeigt.

Tabelle 4-62: Korrelationsmatrix – Prüfrisreihe E-VF0

Prüfrisreihe E-VF0	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,93	-0,98	-0,85	-0,87	0,31
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	-0,98	-0,97	-0,99	0,49
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	0,94	0,95	-0,37
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	0,97	-0,39
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	-0,59
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

Tabelle 4-63: Korrelationsmatrix – Prüfreihe E-TF1

Prüfreihe E-TF1	$\ln(F_{max,u})$	$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	$\ln(w_{ini})$	$\ln(w_{lin})$	$\ln(w_f)$	$\ln(c)$
$\ln(F_{max,u})$	1	0,69	-0,14	0,01	0,04	0,82
$\ln(E_{c,0,12,global,Reg})$	–	1	-0,16	-0,11	-0,32	0,48
$\ln(w_{ini})$	–	–	1	0,98	0,86	0,21
$\ln(w_{lin})$	–	–	–	1	0,87	0,4
$\ln(w_f)$	–	–	–	–	1	0,25
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1

4-6 DISKUSSION DER LASTAUSBREITUNG

Für den Querschnittsnachweis und in Hinblick einer möglichen Steigerung des Widerstandes bei Teilflächenbeanspruchung – in Analogie zu Querdruck – zeigt sich die Größe des beobachteten Wertes der Lastausbreitung unabhängig von der Breite der Lasteinleitung. Zudem sind die ermittelten Lastausbreitungswinkel durchwegs sehr klein. Aus dieser Kombination kann geschlossen werden, dass es zu keiner nennenswerten Aktivierung von an die Lasteinleitung angrenzenden Zonen kommt, zumindest nicht in vergleichbarem Umfang wie von Querdruck in und quer zur Faser bekannt, wo angrenzende Zonen durchaus in der Lage sind die Tragkapazitäten gegenüber vollflächig beanspruchten Prüfkörpern deutlich zu steigern. Bezüglich der Orientierung konnte für Lasteinleitungen parallel zu den Lamellen ein doppelt so großer Lastausbreitungswinkel als für Lasteinleitungen quer zu den Lamellen festgestellt werden. Da der Lastausbreitungswinkel jedoch generell sehr kleine Werte annimmt kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Variation des Lastausbreitungswinkels durch die natürliche Streuung im Material aber auch in der Prüfdurchführung selbst und nicht durch die Variation der Prüfreihekonfiguration hervorgerufen wird. In Analogie zu $k_{c,90}$ aus dem Querdruck würde sich daher für den Druck längs zur Faser ein Wert von $k_{c,0} = 1,0$ ergeben. Folglich ist in jedem Fall baupraktisch betrachtet eine Aktivierung angrenzender Zonen bei teilflächig auf Längsdruck beanspruchten Querschnitten im Sinne der Erhöhung des Widerstandes auszuschließen.

Ein Anzeichen für ein auftretendes Spalten durch ein Versagen infolge der kombinierten Querkzug-Schubbeanspruchung an den Rändern der lokalen Lasteinleitung konnte nicht beobachtet werden. Feine Anrisse an den genannten Grenzen der Lasteinleitungsflächen ergaben sich, wenn, dann erst im Entfestigungsbereich und damit verbundenen ausgeprägten lokalen Stauchungen (siehe Abbildung 4-3). Die schmalsten Lasteinleitungen hatten dabei eine Breite von nur 30 mm, was mit Bezug auf baupraktische Anwendungen als deutlich konservative untere Grenze zu bewerten ist und bezüglich des dabei beobachteten Materialverhaltens, einer ausgeprägten Duktilität, als sehr positiv zu bewerten ist. Die getätigten Beobachtungen beschränken sich allerdings auf eine Holzfeuchte von rd. 12 % und auf Kurzzeitprüfungen. Da beide Festigkeiten, Querkzug als auch Schub, sehr sensitiv auf Feuchteänderungen sind und zudem eine Rissbildung in Folge des Quell- und Schwindverhaltens im Besonderen im Hirnholzbereich nicht ausgeschlossen werden kann, ist die Aussagekraft aus den hier durchgeführten Untersuchungen für das Langzeitverhalten eingeschränkt.

Der Lastausbreitungswinkel wurde in den vorliegenden Untersuchungen an BSH, wie auch von Bernasconi [21] und Gräfe et al. [23], als über die Höhe konstant angenommen. Betreffend der Ermittlung der effektiven Breite entschied man sich für die Variante welche von Bernasconi [21] gewählt wurde. Dabei wird die Spannung an der Lasteinleitung aus der maximal aufgebracht Kraft bezogen auf die Lasteinleitungsfläche bestimmt, was der Druckfestigkeit entspricht. Unter Kenntnis der Spannung entlang der Prüfkörperlänge kann an jeder Stelle die zugehörige mitwirkende Breite aus der Flächenäquivalenz einer als konstant angenommen Spannungsverteilung errechnet werden, vorausgesetzt die Lasteinleitung geht über die gesamte Querschnittsdicke. Die Methode welche von Gräfe et al. [23] zur Bestimmung der effektiven Breite herangezogen wurde, wurde verworfen, da dabei Randbereiche und somit auch Teile der Belastung abgetrennt werden. Konkret ist man bei den vorliegenden Untersuchungen davon ausgegangen,

dass die Spannung als Widerstand bezogen auf die Lasteinleitungsfläche bei teilflächig beanspruchten Prüfkörpern sich über die Länge des Prüfkörpers bzw. in Abhängigkeit des Abstandes von der Lasteinleitung durch eine Lastverteilung in angrenzende Querschnittsbereiche reduziert. Die an der jeweiligen Stelle gegebene wirksamen Breite ist dabei baupraktisch definiert als Breite eines konstanten Spannungsblockes mit Höhe entsprechend der an dieser Querschnittsstelle vorherrschenden maximalen Spannung, flächenäquivalent zur tatsächlichen Spannungsverteilung. Folglich ergibt sich der Lastausbreitungswinkel als Funktion der Änderung der Spannung bzw. wirksamen Breite entlang des Prüfkörpers.

Für den Lastausbreitungswinkel, mit dem Ziel eine mögliche Aktivierung angrenzender Zonen zur Steigerung des Widerstandes, wurden Werte von $0,7^\circ$ bis $2,7^\circ$ beobachtet. Da dieselbe Definition des Lastausbreitungswinkels wie von Bernasconi [21] gewählt wurde und auch anzunehmen ist, dass dessen Untersuchungen sich auf Querschnittsnachweise bezogen, können die vorliegenden Werte für den Lastausbreitungswinkel direkt mit jenen von Bernasconi [21] verglichen werden. Dabei zeigen sich deutliche Unterschiede zu dem von Bernasconi [21] angegebenen Wert von 15° ; dieser kann somit nicht validiert werden. An dieser Stelle soll noch darauf hingewiesen werden, dass das Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf dem Querschnittsnachweis liegt.

In den Hauptdehnungen der Mercury-Messung kann jedoch, wie zu erwarten, die Ausbildung einer Druckzwiebel beobachtet werden. Diese ist stark nach unten zum vollflächigen Auflager orientiert, würde aber nicht einem Lastausbreitungswinkel von 0° entsprechen. Als Folge aus der Druckzwiebel wird mit zunehmenden Abstand von der Lasteinleitung ein größerer Querschnittsbereich für die Abtragung der aufgebracht Last aktiviert ohne, wie bereits festgestellt, den Widerstand selbst zu erhöhen, aber um in Folge die Druckspannung entlang des Prüfkörpers sukzessive zu reduzieren, was vor allem für Stabilitätsnachweise, wie das Knicken, von Interesse ist. Eine qualitative, grafische Abschätzung der sich aus den Mercury Messungen ergebenden Lastausbreitungswinkel ist in Tabelle 4-64 dargelegt, die zugehörigen Mercury-Messungen befinden sich im Anhang C-5; beispielhaft auch in Abbildung 4-28 und Abbildung 4-29 dargestellt. Zu den Mercury-Messungen ist noch anzumerken, dass es sich bei den auftretenden grauen Bereichen um in der Messung nicht erfasste Bereiche handelt, was auf ein unzureichendes Tracking der Messpunkte zurückzuführen ist.

Tabelle 4-64: Lastausbreitungswinkel auf Basis einer qualitativen, grafischen Auswertung der Mercury-Messungen

Lastausbreitungswinkel	Gesamte Höhe	Obere Hälfte	Untere Hälfte
A-TF1	$26,8^\circ$	$40,6^\circ$	$8,8^\circ$
A-TF4	$10,2^\circ$	$19,6^\circ$	$0,1^\circ$
B-TF1	$10,3^\circ$	$18,7^\circ$	$1,4^\circ$
B-TF2	$9,9^\circ$	$18,2^\circ$	$1,1^\circ$
B-TF3	$7,2^\circ$	$12,5^\circ$	$1,7^\circ$
B-TF4	$6,4^\circ$	$12,0^\circ$	$0,7^\circ$
E-TF1	$14,1^\circ$	$24,1^\circ$	$3,2^\circ$

Die qualitative, grafische Auswertung wurde dabei über die gesamte Höhe, in der oberen Hälfte und in der unteren Hälfte durchgeführt; siehe Abbildung 4-28. Dabei wurde für die obere Hälfte und die gesamte Höhe die Lasteinleitungsbreite als Bezugsbreite herangezogen. Für die untere Hälfte wurde die effektive Breite bei halber Prüfkörperlänge als Bezugsbreite herangezogen. Weiters wurde eine symmetrische Lastausbreitung vorausgesetzt, die aufgrund der Inhomogenität im Material jedoch nur bedingt gegeben ist. Anhand der Werte in Tabelle 4-64 zeigt sich, dass es direkt unter der Lasteinleitung zu einer deutlichen Lastausbreitung in die angrenzenden Querschnittsbereiche kommt, diese jedoch schnell abflacht und gegen Null geht. Insbesondere bei längeren Prüfkörpern ist zu erkennen, dass sich der Lastausbreitungswinkel entlang der Prüfkörperlänge mit zunehmendem Abstand von der

Lasteinleitungsstelle asymptotisch gegen 0° verläuft. Dieser Umstand würde die übrigen Erkenntnisse bestätigen.

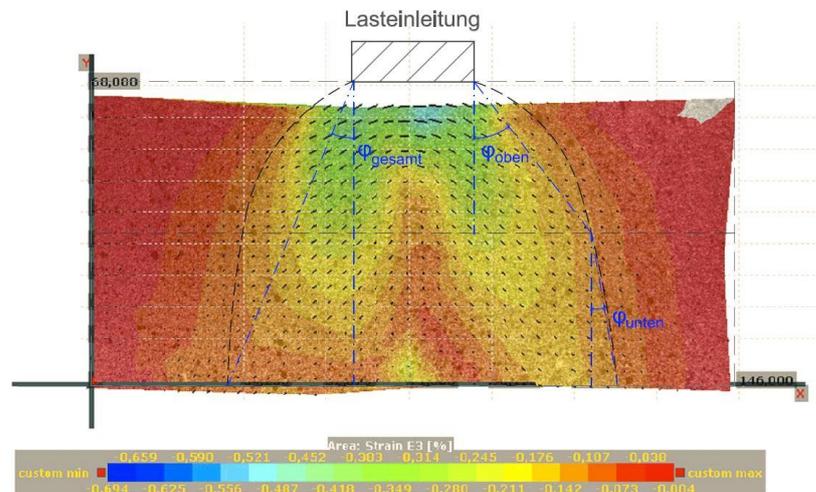


Abbildung 4-28: repräsentative Mercury Messung im lin. Bereich für die Prüfreihe A-TF1

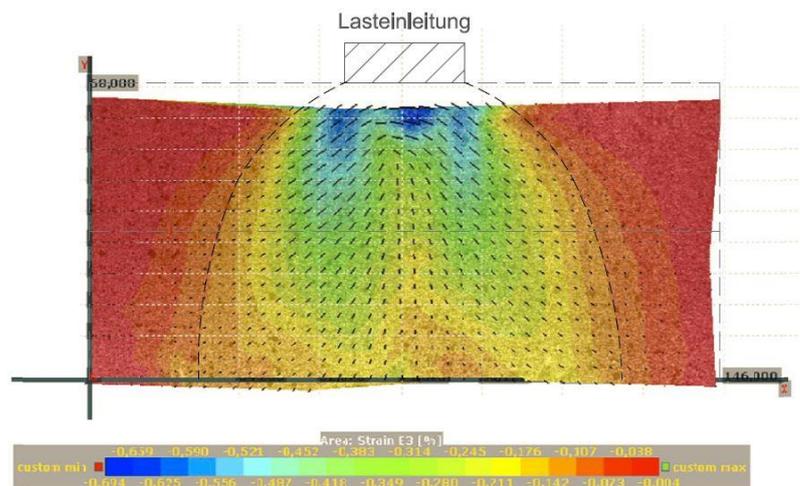


Abbildung 4-29: repräsentative Mercury Messung bei F_{max} für die Prüfreihe A-TF1

Bezieht man darüber hinaus den mikroskopischen Aufbau des natürlichen Baustoffes Holz mit ein, so ist, in Analogie zu Faserverbundwerkstoffen anzunehmen, dass die Zellmatrix zwischen den Holzzellen, repräsentiert durch die sogenannte Mittellamelle, keine nennenswerten Normalspannungen weiterleiten kann. Dies spricht auch für die Annahme eines Lastausbreitungswinkel von 0° .

Zusätzlich zu den Untersuchungen an BSH wurden spontan auch Prüfungen an BSP in Hinblick auf eine lokale Lastausbreitung durchgeführt. Dabei wurde für BSP ein Lastausbreitungswinkel von $0,4^\circ$ beobachtet. Dieses Ergebnis anerkennend kann der Lastausbreitungswinkel, wie bereits zuvor für BSH festgestellt, gemäß der in dieser Arbeit getätigten Annahmen und der gegebenen Untersuchungsbasis baupraktisch und mit Fokus auf den Querschnittsnachweis mit Null angesetzt werden; vgl. Abschnitt 4-6. Eine eventuelle Aktivierung der Querlagen als Zugband und eine daraus resultierende Lastausbreitung ist aufgrund der geringen Steifigkeit der quer zur Faser beanspruchten Lagen nicht zu erwarten.

Gräfe et al. [23] stellte in seinen Prüfungen und mit Fokus auf den Stabilitätsnachweis bei BSP-Wandscheiben bzw. Wandpfeilern einen Lastausbreitungswinkel zwischen $21,9^\circ$ und $23,2^\circ$ fest. Im Gegensatz zu den genannten Untersuchungen wurden jene im Rahmen dieser Arbeit an sehr kurzen Prüfkörpern durchgeführt. Um mögliche Unterschiede zwischen diesen Untersuchungen zu analysieren,

wird in Folge die Lastausbreitungskurve, die Bogensperger und Augustin [22] in ihren Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten von BSP darlegten, qualitativ betrachtet; siehe Abbildung 4-30. Diese zeigt direkt unter der Lasteinleitung einen Bereich, in dem es quasi zu keiner nennenswerten Lastausbreitung kommt. Erst nach entsprechendem Abstand von der Lasteinleitungsstelle beginnt sich diese aufzubauen. Aufgrund dessen wird vermutet, dass die hier verwendeten Prüfkörper der Prüfreihe E eine zu geringe Höhe hatten um eine nennenswerte Lastausbreitung auszubilden. Im Gegensatz dazu wurden von Gräfe et al. [23] Untersuchungen in Hinblick auf das Stabilitätsverhalten (Knicken) geführt und geschößhohe BSP-Wandpfeiler als Prüfkörper verwendete bei denen die Höhe ausreichte um eine entsprechende Lastausbreitung zu ermöglichen. An dieser Stell sei nochmals draufhingewiesen, dass in dieser Arbeit der Fokus auf Querschnittsnachweise liegt. Aufgrund der genannten Feststellungen lässt sich der Unterschied in den Beobachtungen des Lastausbreitungswinkel nachvollziehen.

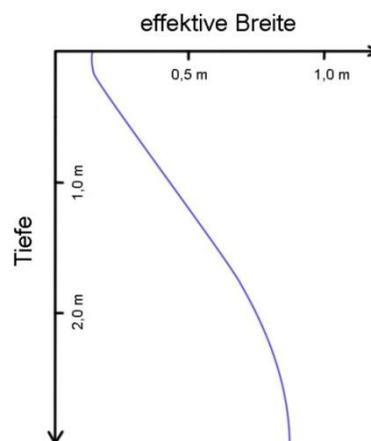


Abbildung 4-30: *Qualitative Lastausbreitungskurve bei Lasteinleitung in BSP, adaptiert aus [22]*

4-7 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Abschließend folgt eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse die im Verlauf der Arbeit erzielt werden konnten:

Mit Hilfe der in dieser Arbeit vorgenommenen Korrektur der global ermittelten Verformungen um den Anteil aus dem Prüfgerüst und dem Prüfaufbau, die Maschinenwegkorrektur, konnten durchaus hinreichend genaue Auswertungen der global gemessenen Daten erzielt werden, welche mit den lokal gemessenen vergleichbar sind. Es soll jedoch darauf hingewiesen werden, dass eine adäquate Maschinenwegkorrektur eine exakte und intensive Analyse benötigt um treffende Ergebnisse zu erzielen, und dass der E-Modul sehr sensitiv auf geringe Verformungsänderungen ist. Dabei empfiehlt es sich nicht nur von der Höhe, sondern auch von der Festigkeitsklasse abhängige Korrekturen vorzunehmen, da, auch wenn nur geringfügig, die unterschiedlichen Steifigkeiten im Material einen unterschiedlichen Maschinenweg hervorrufen.

Bezüglich der analysierten Varianten zur Bestimmung des E-Moduls ist grundsätzlich jener nach EN 408 [32] Vorrang zu gegeben. Diese nimmt zwar keinen Bezug auf den individuellen linearen Bereich der Prüfkurven, zeigt sich jedoch in Summe als deutlich stabiler. Bei der Variante mittels Regression im linearen Bereich traten vor allem bei den globalen E-Modulen sowie Prüfserien mit kurzen Prüfkörpern große Instabilitäten auf. Die Instabilitäten sind darauf zurückzuführen, dass es sich bei den Prüfkurven um diskrete und keine stetigen Funktionen handelt und es somit in ihren Ableitungen des Öfteren zu Sprungstellen kommt. Bei zu kurzen Prüfkörpern kommt noch hinzu, dass diese aufgrund der Unverhältnismäßigkeit zum Ausmaß lokaler Wuchsmerkmale wie Ästen als nicht repräsentativ für Vollholz und daraus hergestellter Produkte gelten und es von Vorteil ist den Empfehlungen nach EN 408 [32] auch hinsichtlich der Geometrie Folge zu leisten.

Hinsichtlich Druckfestigkeit ist festzuhalten, dass diese mehrheitlich und unabhängig vom Produkt von den jeweiligen zugrundeliegenden Normen EN 338 [3], EN 14081 [33] und EN 1194 [28] deutlich unterschätzt wird. Dabei ist in den Normen von einer konservativen Festlegung auszugehen, da bekannt ist, dass der Feuchtegehalt einen starken Einfluss auf die Druckfestigkeit längs zur Faser hat. Dieser starke Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit wurde u.a. in Studien von Gerhards [19], Bäder und Németh [16] und Aicher und Stapf [15] belegt.

Im Vergleich zu den Prüfreiheiten durchgeführt an Brettabschnitten waren bei jenen an BSH, wie zu erwarten, Homogenisierungseffekte als Folge der primär parallelen, in Summe seriell, sub-parallelen Systemwirkungen, feststellbar. Diese zeigen sich in der Abnahme der Streuungen mit steigender Lamellenanzahl. Zudem wurde, trotz des duktilen Materialverhaltens, auch eine Abnahme der Festigkeit mit zunehmender Lamellenanzahl beobachtet. Völlig unerwartet ist allerdings die ebenfalls beobachtete Abnahme des E-Moduls.

Die mathematischen Modelle konnten die zugrundeliegenden Prüfkurven gut abbilden, wie in den jeweils gezeigten Diagrammen zumindest im Mittel nachvollziehbar. Der Formparameter c , welcher zur Kalibrierung des adaptierten Glos Modells notwendig ist, kann für die Brettabschnitte mit Werten von rd. 2,2 - 2,8 und für BSH mit in etwa doppelt so hohen Werten von rd. 3,4 - 5,3 angenommen werden.

Das Materialverhalten zeigt sich von drei Einflussgrößen abhängig: (i) der Festigkeitsklasse, (ii) dem Verhältnis der Lasteinleitungsfläche zum Querschnitt und (iii) der Anzahl der Lamellen. Betreffend der Festigkeitsklasse führt eine höhere bei den Brettabschnitten zu einer geringeren Entfestigung und bei BSH zu einer höheren Entfestigung. Bezüglich des Verhältnisses der Lasteinleitungsfläche zum Querschnitt zeigt sich auch eine höhere Entfestigung bei einem größeren Verhältnis. Im Gegensatz dazu kann bei den kleinsten Lasteinleitungsflächen ein sehr duktilen Verhalten festgehalten werden, welches einem Fließplateau nahekommt. Darüber hinaus sind bei einem kleinen Verhältnis erhöhte Stauchungen im Bereich der Lasteinleitung aber auch in geringerem Ausmaß am vollflächigen Auflager, erkennbar. Hinsichtlich der Anzahl der Lamellen ist mit steigender Anzahl eine ausgeprägtere Entfestigung zu erwarten.

Abschließend kann zur Lastausbreitung festgehalten werden, dass es, in Analogie zum Querdruck, unabhängig von der Größe und Orientierung der Lasteinleitung zu keiner Aktivierung der Randzonen, im Sinne einer Steigerung der Tragfähigkeit, kommt und folglich der in Analogie zum Querdruck definierte Beiwert $k_{c,0}$ mit 1,0 zu beziffern ist. Positiv zu vermerken ist das gutmütige Verhalten hinsichtlich des Spaltens. Diesbezüglich konnten bei der gegebenen Holzfeuchte auch bei sehr schmalen Lasteinleitungen keine Anzeichen beobachtet werden. Der Lastausbreitungswinkel selbst kann für baupraktische Zwecke für Vollholz und BSH im Querschnittsnachweis mit de facto Null angenommen werden. Folglich können die Ergebnisse von Bernasconi [21] für den genannten Anwendungsfall nicht validiert werden. Für den Stabilitätsnachweis und der Frage einer effektiven Breite kann auf Basis der vorliegenden Ergebnisse vordergründig qualitativ eine erste Aussage getroffen werden und in Summe für BSH nur ein geringer Lastausbreitungswinkel festgestellt werden. Betreffend BSP kann aufgrund der Annahme, dass die Prüfkörper eine zu geringe Höhe hatten, gegenwärtig zum Lastausbreitungswinkel für den Stabilitätsnachweis keine belegbare Aussage getroffen werden. Für den Querschnittsnachweis gilt auf Basis einer Stichprobe Selbiges wie für BSH.

ANHANG A LITERATURVERZEICHNIS

- [1] R. Mauer, *Architekturzeitung*. [Online]. Available: <https://www.architekturzeitung.com/> (accessed: Mar. 22 2020).
- [2] U. Germerott, *Forum Holzbau*. [Online]. Available: <http://forumholzbau.com/> (accessed: Mar. 22 2020).
- [3] *ÖNORM EN 338: Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen*, 2008.
- [4] R. Wagenführ, *Holzatlas*: Fachbuchverlag Leipzig, 2006.
- [5] *JCSS probabilistic model code; Part 3 - Resistance Model*, 2006.
- [6] *ÖNORM EN 1995-1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten*, 2019.
- [7] R. L. Hankinson, "Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain," 1921.
- [8] A. André, R. Kliger, and L. E. Asp, "Compression failure mechanism in small scale timber specimens," *Construction and Building Materials*, 2014.
- [9] J. S. Poulsen, P. M. Moran, C. F. Shih, and E. Byskov, "Kink band initiation and band broadening in clear wood under compressive loading," *Elsevier*, 1997.
- [10] R. Brandner, "Stochastic System Actions and Effects in Engineered Timber Products and Structures," Dissertation, Graz, 2012.
- [11] C. Mattheck, Ed., *Warum alles kaputt geht: Form und Versagen in Natur und Technik*, 2003.
- [12] A. Ruli, "Längs und quer zur Faserrichtung auf Druck beanspruchtes Brettschichtholz," Diplomarbeit, Technische Universität Graz, 2004.
- [13] J. K. Song, S. Y. Kim, and S. W. Oh, "The Compressive Stress-strain Relationship of Timber,"
- [14] A. Reiterer and S. E. Stanzl-Tschegg, "Compressive behaviour of softwood under uniaxial loading at different orientations to the grain," *Elsevier*, 2001.
- [15] S. Aicher and G. Stapf, "Compressive strength parallel to the fiber of spruce with high moisture content," *Eur. J. Wood Prod.*, 2016.
- [16] M. Báder and R. Németh, "Moisture-dependent mechanical properties of longitudinally compressed wood," *Eur. J. Wood Prod.*, 2019.
- [17] G. Schickhofer, *Holzbau - Der Roh- und Werkstoff Holz: Historische Entwicklung des Holzbaus und der Holzforschung | Wald, Forst und Holz | Physikalische Eigenschaften des Holzes | Mechanische Eigenschaften des Holzes | Bauholz und Sortierung | Bauprodukte aus Holz*, 2006.
- [18] *ÖNORM EN 384: Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte*, 2016.
- [19] C. C. Gerhards, "Effect of Moisture Content and Temperature on the Mechanical Properties of Wood: An Analysis of Immediate Effects," U.S. Dept. of Agr., 1980.
- [20] R. Steiger, "Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten-Bauholz bei Biege-, Zug-, Druck- und kombinierter M/N-Beanspruchung," 1996.
- [21] A. Bernasconi, "Tragverhalten von Holz senkrecht zur Faserrichtung mit unterschiedlicher Anordnung der Schub- und Biegearmierung," ETH Zurich, 1996.
- [22] T. Bogensperger and M. Augustin, "Lasteinleitung in Wandscheiben aus Brettspertholz," 2014.

- [23] M. Gräfe, A. Hipper, and M. Wild, “Vorspannung von Brettsperrholzkonstruktionen,” München, 2018.
- [24] M. Westermayr, “Mechanical behavior of CLT under concentrated loads inplane: A finite element analysis,” München, 2016.
- [25] *ÖNORM EN 14080: Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen*, 2013.
- [26] *ÖNORM EN 15497: Keilgezinktes Vollholz für tragende Zwecke - Leistungspotential und Mindestanforderungen an die Herstellung*, 2014.
- [27] *ÖNORM EN 301: Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen*, 2017.
- [28] *ÖNORM EN 1194: Holzbauwerke Brettschichtholz - Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte*, 1999.
- [29] R. Brandner, *Klebertechnologie und Holzwerkstoffe*, 2019.
- [30] Peter Glos, *Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke: Zur Bestimmung des Festigkeitsverhaltens von Brettschichtholz bei Druckbeanspruchung aus Werkstoff- und Einwirkungskenngrößen*, 1978.
- [31] R. Brandner, A. Ringhofer, and M. Grabner, “Probabilistic Models for the Withdrawal Behavior of Single Self-Tapping Screws in the Narrow Face of Cross Laminated Timber (CLT),” 2015.
- [32] *ÖNORM EN 408: Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften*, 2012.
- [33] *ÖNORM EN 14081-4: Holzbauwerke - Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt - Teil 4: Maschinelle Sortierung - Einstellungen von Sortiermaschinen für maschinenkontrollierte Systeme*, 2006.
- [34] *ÖNORM EN 13183-1-Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren*, 2004.
- [35] *ÖNORM DIN 4074-1: Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz*, 2012.
- [36] *ÖNORM EN 1912: Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen - Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten*, 2013.
- [37] *ÖNORM EN 16351: Holzbauwerke - Brettsperrholz - Anforderungen*, 2015.
- [38] Fa EGGER, “Technisches Datenblatt: EGGER Kompaktplatte schwarzer Kern,” 2018.
- [39] R Core Team, *A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2020. [Online]. Available: <https://www.r-project.org/>
- [40] R. Brandner, G. Schickhofer, A. Ruli, and Y. Halili, “Leistungspotential von Brettschichtholz: Beanspruchung auf Längsdruck und Querdruck,” 2006.
- [41] Institut für Holzbau und Holztechnologie - TU Graz, Ed., “Formelsammlung-Brettsperrholz,”

ANHANG B ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1-1: Baupraktische Anwendungen von Druck längs zur Faser, beispielhaft gegeben durch einen Fachwerksträger (links, adaptiert aus [1]) und dem Fußpunkt einer Stütze (rechts, adaptiert aus [2]).....	2
Abbildung 2-1: links: Aufbau von Holz, adaptiert aus [8]; mitte: Scherebene, adaptiert aus [9]; rechts: Versagensprozess, adaptiert aus [10].....	6
Abbildung 2-2: Ausbildung einer Scherebene beginnend bei Ast, adaptiert aus [12].....	7
Abbildung 2-3: Versagensmuster, adaptiert aus [13].....	7
Abbildung 2-4: Feuchtegehalt von Holz, adaptiert aus [17].....	8
Abbildung 2-5: Druckfestigkeit in Faserrichtung in Abhängigkeit der Holzfeuchte; adaptiert aus [19] und verglichen mit ÖNORM EN 384 [18].....	9
Abbildung 2-6: Druck-Elastizitätsmodul in Faserrichtung in Abhängigkeit der Holzfeuchte, adaptiert aus [19] und verglichen mit ÖNORM EN 384 [18].....	9
Abbildung 2-7: links: mitwirkende Breite b_e ; mitte: Verhältnis b_e / t ; rechts: Tiefe bei Schnitt A-A; aus [21], adaptiert.....	11
Abbildung 2-8: Lastausbreitung in und quer zur Faserrichtung; aus [21], adaptiert.....	12
Abbildung 2-9: Ansatz zur Berechnung des Lastausbreitungswinkels in den Untersuchungen von Gräfe et al. [23]; aus [24] adaptiert.....	13
Abbildung 2-10: Aufbau Brettschichtholz, adaptiert aus [17].....	14
Abbildung 2-11: Aufbau von BSP anhand einer fünf-schichtigen Platte; adaptiert aus [17].....	14
Abbildung 2-12: links: Bretter aus Stammrandzone; rechts: Brettware als Ausgangsmaterial für BSP, jeweils adaptiert aus [17].....	15
Abbildung 2-13: Modell nach Glos, adaptiert aus [30].....	17
Abbildung 2-14: Adaptiertes Glos Modell, adaptiert aus [31].....	18
Abbildung 3-1: links: Prüfaufbau der Prüfkörper „lang“; rechts: Prüfaufbau der Prüfkörper „kurz“.....	22
Abbildung 3-2: Hystereseschleife am Bsp. einer Prüfdurchführung.....	22
Abbildung 3-3: Stahl-Stahl-Druckprüfungen: links: Höhe 50; rechts: Höhe 250.....	23
Abbildung 3-4: links: Teilflächenbelastung – Prüfreihe A, mittig u. rechts: Teilflächenbelastung – Prüfreihe B.....	24
Abbildung 3-5: Kontrastfläche eines Prüfkörpers als Vorbereitung für Messungen mit dem System Mercury.....	26
Abbildung 3-6: links: Prüfaufbau für Teilflächenpressung mit Mercury – Vorderseite; rechts: Prüfaufbau für Teilflächenpressung mit Mercury – Rückseite.....	27
Abbildung 3-7: links: Prüfaufbau für vollflächige Lasteinleitung – Vorderseite; rechts: Prüfaufbau für vollflächige Lasteinleitung – Rückseite.....	28
Abbildung 3-8: Hauptdehnungen gemäß Mercury System: links: linearer Bereich; rechts: Bereich der Maximalkraft.....	29
Abbildung 3-9: Prüfkörper zugehörig zu den dargestellten Hauptdehnungen gemäß Mercury.....	29

Abbildung 3-10: Bsp.: Stahl-Stahl-Prüfung mit Hystereseschleife.....	30
Abbildung 3-11: Bsp.: Stahl-Stahl-Prüfung ohne Hystereseschleife	30
Abbildung 3-12: links: Prüfreihe 1 (2008), rechts: Prüfreihe 2 (2019).....	31
Abbildung 3-13: Kraft-Weg-Diagramm (links) und Residuen (rechts) für alle fünf angepassten Funktionen	32
Abbildung 3-14: Parameter A(H) in Abhängigkeit der Länge bzw. Höhe der beiden Prüfreihen	33
Abbildung 3-15: Vergleich Signal Zwick und Cat.....	34
Abbildung 3-16: Optimierung der Maschinenwegkorrektur.....	35
Abbildung 3-17: Zusammenfassung der Parameterwerte für die Maschinenwegkorrektur	36
Abbildung 3-18: Entfernung des ersten Be- und Entlastungsastes, am Beispiel von Prüfung BB 10.....	37
Abbildung 3-19: Unkorrigierte und korrigierte Prüfkurve, am Bsp. von BB 10.....	38
Abbildung 3-20: Korrigierte Prüfkurve einschließlich Bereichsmarkierungen zur Ermittlung des Druck-E-Moduls (links) und die abgeleitete, korrigierte Prüfkurve, am Bsp. von BB 10	40
Abbildung 3-21: Vergleich der lokalen und globalen Prüfkurven sowie deren Druck-E-Moduln	42
Abbildung 3-22: links: Vergleich der lokalen Druck-E-Moduln, rechts: Vergleich der globalen Druck-E-Moduln	43
Abbildung 3-23: Neu adaptiertes Glos Modell	44
Abbildung 3-24: Anpassung der adaptierten Glos-Funktion an die korrigierte Prüfkurve, am Bsp. BB 10	46
Abbildung 3-25: Visualisierung der Daten für einen qualitativen Überblick und Identifizierung möglicher Extremwerte, am Bsp. der Prüfreihe BB-lang und Kenngröße w_f	47
Abbildung 3-26: QQ-Plots und Shapiro-Testergebnis für NV (links) und LNV (rechts) für die Druckfestigkeit längs zur Faser der Prüfreihe BB-lang	48
Abbildung 3-27: QQ-Plots und Shapiro-Testergebnis für NV (links) und LNV (rechts) für den globalen Druck-E-Modul der Prüfreihe BB-lang.....	49
Abbildung 3-28: Übersicht über die vollständig erfassten Prüfkurven, am Bsp. der Prüfung A-VF-3.....	51
Abbildung 3-29 Prüfkurve ohne Entlastungsast, am Bsp. der Prüfung A-VF-3	51
Abbildung 4-1: repräsentatives Versagensbild bei auf Druck längs zur Faser beanspruchten Brettabschnitten, exemplarisch dargestellt anhand von zwei Prüfkörpern	53
Abbildung 4-2: links: Einpressung des belasteten Bereiches; rechts: Ausbildung einer Stauch- bzw. Druckfalte direkt unter dem belasteten Bereich.....	54
Abbildung 4-3: Darstellung des versagten Bereichs im Detail	54
Abbildung 4-4: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie CB und Mittelwertkurve des daraus resultierenden mathematischen Modells	57
Abbildung 4-5: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie BB-lang und des daraus resultierenden mittleren mathematischen Modells	59
Abbildung 4-6: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie BB-kurz und des daraus resultierenden mathematischen Modells.....	61
Abbildung 4-7: Versagensbild eines Prüfkörpers mit geringer Höhe und ausgeprägter lokaler Störzone aufgrund eines Astes.....	62

Abbildung 4-8: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie L40-lang und des daraus resultierenden mittleren mathematischen Modells	65
Abbildung 4-9: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie L40-kurz und des daraus resultierenden mittleren mathematischen Modells	67
Abbildung 4-10: links: Störzone durch große Astbereiche; rechts: Störzone durch Druckholz	68
Abbildung 4-11: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie L40-lang-kraftgesteuert und des daraus resultierenden mittleren mathematischen Modells.....	71
Abbildung 4-12: Darstellung aller im Mittel erwartbaren mathematischen Modelle der Brettabschnitte; zum besseren Vergleich ohne Anfangsverschiebung w_{ini}	73
Abbildung 4-13: links: Mercury-Messung; rechts: Zugehöriges Diagramm mit den Dehnungen in drei Bereichen.....	77
Abbildung 4-14: links: Dehnungen in den drei Bereichen repräsentativ für Prüfreihe A-TF1; rechts: Dehnungen in den drei Bereichen repräsentativ für Prüfreihe A-TF4; Achtung: Unterschiedliche Skalierung der Dehnungen	77
Abbildung 4-15: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie A-VF0 und des daraus im Mittel resultierenden mathematischen Modells	80
Abbildung 4-16: Darstellung der mittleren mathematischen Modelle der Prüfreihe A-TF1 (links) und A-TF4 (rechts) zusammen mit den korrigierten Prüfkurven	80
Abbildung 4-17: links: Dehnungen in den drei Bereichen repräsentativ für Prüfreihe B-TF1; rechts: Dehnungen in den drei Bereichen repräsentativ für Prüfreihe B-TF2; Achtung: Unterschiedliche Skalierung bei Kraft und Dehnung	84
Abbildung 4-18: links: Dehnungen in den drei Bereichen repräsentativ für Prüfreihe B-TF3; rechts: Dehnungen in den drei Bereichen repräsentativ für Prüfreihe B-TF4.....	84
Abbildung 4-19: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie B-VF0 und des daraus resultierenden mittleren mathematischen Modells	87
Abbildung 4-20: Darstellung der mittleren mathematischen Modelle der Prüfreihe B-TF1 (links) und B-TF2 (rechts) zusammen mit den korrigierten Prüfkurven; Achtung: Unterschiedliche Skalierung bei Kraft	87
Abbildung 4-21: Darstellung der mittleren mathematischen Modelle der Prüfreihe B-TF3 (links) und B-TF4 (rechts) zusammen mit den korrigierten Prüfkurven	88
Abbildung 4-22: Gegenüberstellung der Prüfkurven in Bezug auf ihre Entfestigung, ohne w_{ini} und als Spannungs-Dehnungs-Diagramm.....	89
Abbildung 4-23: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie C-VF0 und des daraus resultierenden, mittleren mathematischen Modells	92
Abbildung 4-24: Darstellung aller korrigierten Prüfkurven der Serie D-VF0 und des daraus resultierenden, mittleren mathematischen Modells	94
Abbildung 4-25: Gegenüberstellung der mittleren mathematischen Modelle mit unterschiedlicher Lamellenanzahl ($N = 1$ – blau, $N = 2$ – grün, $N = 3$ – rot) als Spannungs-Dehnungs-Diagramm.....	96
Abbildung 4-26: Darstellung aller im Mittel erwartbaren mathematischen Modelle der BSH Prüfreihe; zum besseren Vergleich ohne Anfangsverschiebung w_{ini} und als Spannungs-Dehnungs-Diagramm.....	98
Abbildung 4-27: Darstellung der sich im Mittel ergebenden mathematischen Modelle der Prüfreihe E-VF (links) und E-TF (rechts) zusammen mit den Prüfkurven	102

Abbildung 4-28: repräsentative Mercury Messung im lin. Bereich für die Prüfreihe A-TF1	105
Abbildung 4-29: repräsentative Mercury Messung bei F_{\max} für die Prüfreihe A-TF1	105
Abbildung 4-30: Qualitative Lastausbreitungskurve bei Lasteinleitung in BSP, adaptiert aus [22]	106
Abbildung 4-31: repräsentative Mercury Messung im lin. Bereich für die Prüfreihe A-TF1	XXIII
Abbildung 4-32: repräsentative Mercury Messung bei F_{\max} für die Prüfreihe A-TF1	XXIII
Abbildung 4-33: links: repräsentative Mercury Messung im lin. Bereich für die Prüfreihe A-TF4; rechts: repräsentative Mercury Messung bei F_{\max} für die Prüfreihe A-TF4.....	XXIV
Abbildung 4-34: links: repräsentative Mercury Messung im lin. Bereich für die Prüfreihe B-TF1; rechts: repräsentative Mercury Messung bei F_{\max} für die Prüfreihe B-TF1	XXV
Abbildung 4-35: links: repräsentative Mercury Messung im lin. Bereich für die Prüfreihe B-TF2; rechts: repräsentative Mercury Messung bei F_{\max} für die Prüfreihe B-TF2.....	XXV
Abbildung 4-36: links: repräsentative Mercury Messung im lin. Bereich für die Prüfreihe B-TF3; rechts: repräsentative Mercury Messung bei F_{\max} für die Prüfreihe B-TF3	XXVI
Abbildung 4-37: links: repräsentative Mercury Messung im lin. Bereich für die Prüfreihe B-TF4; rechts: repräsentative Mercury Messung bei F_{\max} für die Prüfreihe B-TF4.....	XXVI
Abbildung 4-38: repräsentative Mercury Messung im lin. Bereich für die Prüfreihe E-TF1	XXVII
Abbildung 4-39: repräsentative Mercury Messung bei F_{\max} für die Prüfreihe E-TF1	XXVII

ANHANG C DIVERSE ANDERE ANHÄNGE

C-1 Vergleiche zwischen den Druck-E-Moduln längs zur Faser in Abhängigkeit des Parameters η

C-1.1 Prüfreihe CB

Für die Prüfreihe CB wurde für den lokalen E-Modul $\eta = 40$ und den globalen E-Modul $\eta = 30$ gewählt.

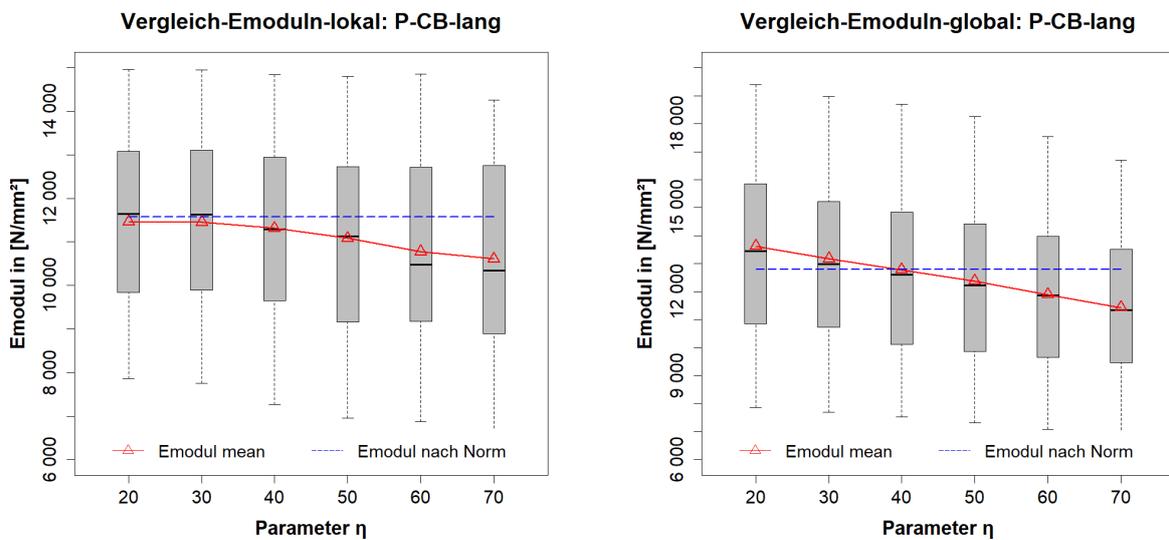


Abb. Anhang 4-1: links: Prüfreihe CB – Vergleich der lokalen Druck-E-Moduln; rechts: Prüfreihe CB – Vergleich der globalen Druck-E-Moduln

C-1.2 Prüfreihe BB-lang

Für die Prüfreihe BB-lang wurde für den lokalen E-Modul ein η von 40 und den globalen E-Modul ein η von 30 gewählt.

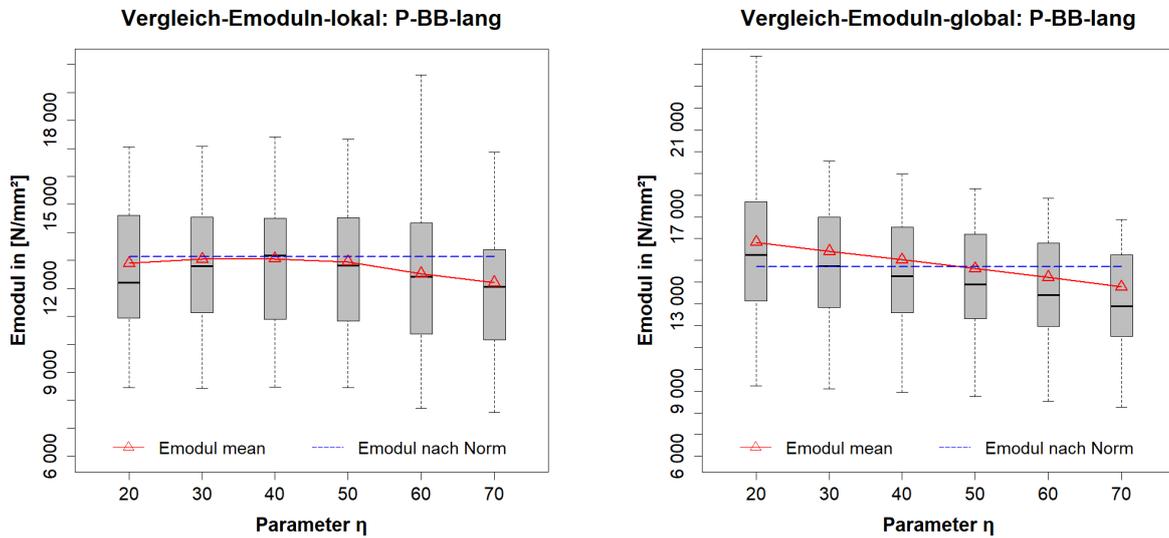


Abb. Anhang 4-2: links: Prüfreihe BB-lang – Vergleich der lokalen Druck-E-Moduln; rechts: Prüfreihe BB-lang – Vergleich der globalen Druck-E-Moduln

C-1.3 Prüfreihe BB-kurz

Für die Prüfreihe BB-kurz wurde für den lokalen E-Modul ein η von 50 und den globalen E-Modul ein η von 60 gewählt.

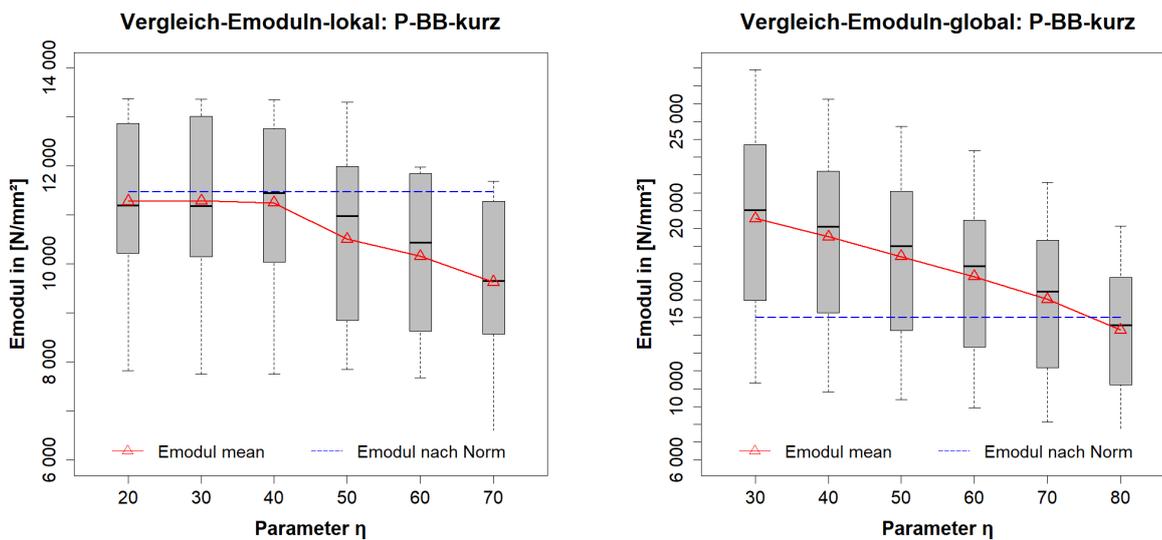


Abb. Anhang 4-3: links: Prüfreihe BB-kurz – Vergleich der lokalen Druck-E-Moduln; rechts: Prüfreihe BB-kurz – Vergleich der globalen Druck-E-Moduln

C-1.4 Prüfreihe L40-lang-weggesteuert

Für die Prüfreihe L40-lang wurde für den lokalen E-Modul ein η von 50 und den globalen E-Modul ein η von 40 gewählt.

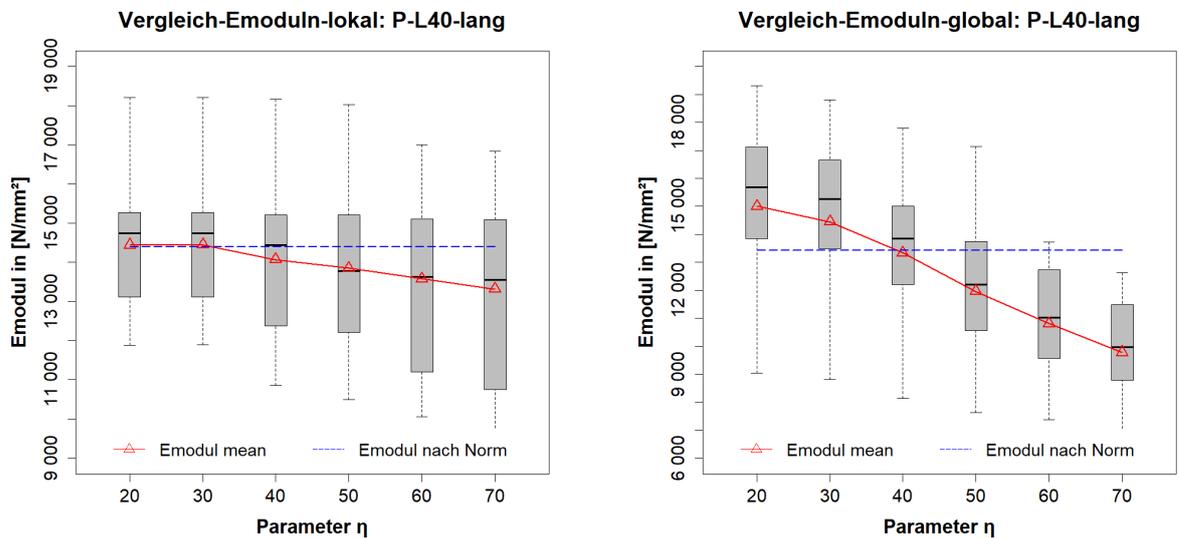


Abb. Anhang 4-4: links: Prüfreihe L40-lang-weggesteuert – Vergleich der lokalen Druck-E-Moduln; rechts: Prüfreihe L40-lang-weggesteuert – Vergleich der globalen Druck-E-Moduln

C-1.5 Prüfreihe L40-kurz

Für die Prüfreihe L40-kurz wurde für den lokalen E-Modul ein η von 50 und den globalen E-Modul ein η von 60 gewählt.

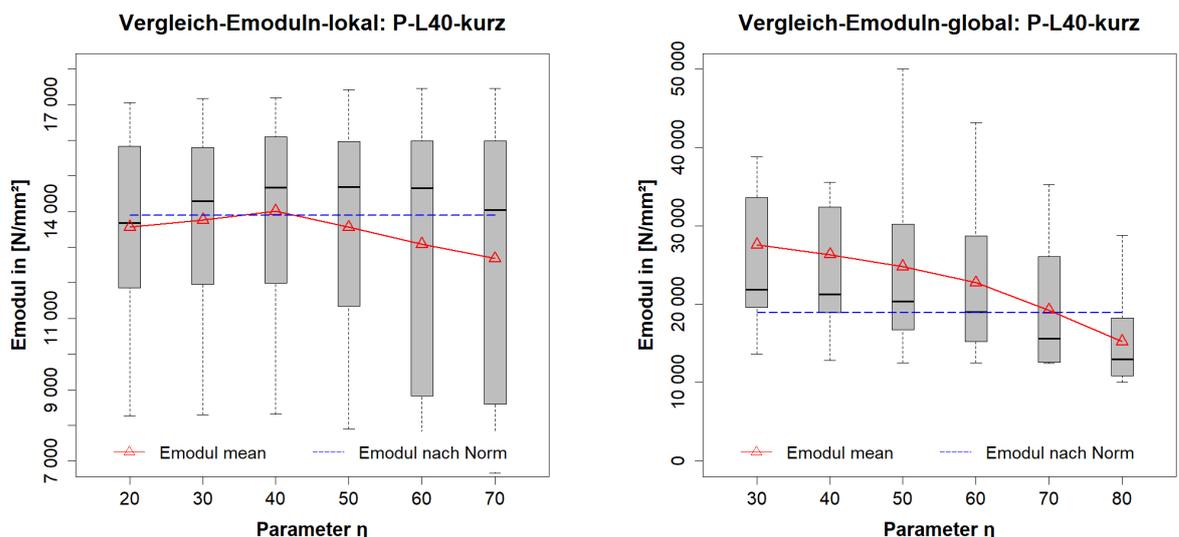


Abb. Anhang 4-5: links: Prüfreihe L40-kurz – Vergleich der lokalen Druck-E-Moduln; rechts: Prüfreihe L40-kurz – Vergleich der globalen Druck-E-Moduln

C-2 Ausgangsdaten der Prüfreihe – Brettabschnitte

Tab. Anhang C-1: Ausgangsdaten der Prüfreihe CB: CB_01 – CB_20

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	m_u [g]	m_0 [g]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0,12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,global,Reg}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,local,Reg}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,global,EN}$ [N/mm ²]	$E_{c,0,12,local,EN}$ [N/mm ²]	$F_{max,u}$ [kN]	w_{ini} [mm]	w_{in} [mm]	w_f [mm]	c [-]
CB_01	240,10	150,27	40,30	35,74	40,06	383	32,58	12.409	10.858	11.908	10.977	197	1,40	0,549	1,404	2,79
CB_02	240,10	151,09	40,11	46,39	51,82	426	31,26	10.032	9.036	9.840	9.338	191	1,22	0,704	1,223	2,29
CB_03	240,05	150,72	40,19	45,61	51,19	478	36,53	17.736	14.214	16.727	14.060	220	0,88	0,558	0,879	2,13
CB_04	240,18	150,97	40,26	48,51	54,41	452	38,40	15.001	13.034	14.762	13.008	232	1,09	0,588	1,093	2,67
CB_05	240,31	150,86	40,17	34,25	38,40	438	33,50	13.197	11.204	12.556	11.561	202	1,22	0,651	1,224	3,35
CB_06	240,31	151,21	40,33	33,65	37,50	453	36,03	14.383	12.887	14.054	13.129	224	1,21	0,663	1,211	2,23
CB_07	240,16	150,43	40,41	40,33	45,15	450	40,19	15.150	13.071	14.825	12.765	244	1,07	0,663	1,071	2,84
CB_08	240,22	151,29	40,37	43,30	48,49	455	38,63	14.605	12.932	14.403	12.756	236	1,18	0,619	1,182	2,88
CB_09	240,14	150,85	40,35	35,06	38,40	391	29,05	10.640	10.552	10.472	10.282	191	1,14	0,779	1,140	2,30
CB_10	240,17	151,54	40,34	31,17	34,93	435	32,01	11.207	10.151	11.079	10.061	195	1,13	0,726	1,126	2,14
CB_11	240,30	151,00	40,16	34,68	38,68	405	31,26	10.544	10.030	10.200	10.086	193	1,41	0,660	1,406	2,09
CB_12	240,15	150,40	40,18	38,22	42,93	431	35,50	13.900	12.203	13.312	11.956	213	0,98	0,683	0,983	2,27
CB_13	240,15	150,68	40,36	38,40	43,00	456	44,15	18.157	14.793	17.931	14.829	268	1,05	0,632	1,051	3,12
CB_14	240,02	150,40	40,21	31,99	35,79	390	30,78	10.289	9.835	10.216	9.738	187	1,23	0,825	1,233	2,72
CB_15	240,24	150,52	40,22	34,23	38,33	457	37,58	14.108	12.283	13.898	12.367	227	1,18	0,614	1,180	2,91
CB_16	240,22	150,75	40,24	42,26	47,34	496	45,10	18.105	13.994	17.764	14.494	274	1,33	0,600	1,330	3,95
CB_17	240,04	150,56	40,40	32,99	36,81	399	25,79	8.462	7.928	8.246	8.156	159	1,23	0,736	1,233	2,36
CB_18	240,12	150,99	40,28	35,43	39,81	460	43,39	17.394	14.563	17.238	14.561	261	1,13	0,620	1,132	3,24
CB_19	240,20	150,73	40,15	44,23	49,54	458	41,34	18.211	15.305	11.908	14.933	250	1,06	0,664	1,062	2,08
CB_20	240,09	150,63	39,93	33,99	37,84	414	27,69	8.459	7.533	9.840	8.062	170	1,42	0,820	1,418	2,06

Tab. Anhang C-2: Ausgangsdaten der Prüfreihe CB: CB_21 – CB_30

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	m _u [g]	m ₀ [g]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	f _{c,0,12} [N/mm ²]	E _{c,0,12,global,Reg} [N/mm ²]	E _{c,0,12,local,Reg} [N/mm ²]	E _{c,0,12,global,EN} [N/mm ²]	E _{c,0,12,local,EN} [N/mm ²]	F _{max,u} [kN]	w _{ini} [mm]	w _{lin} [mm]	w _f [mm]	c [-]
CB_21	240,05	150,62	40,11	38,69	43,08	401	32,79	12.587	11.646	12.375	11.567	202	0,216	0,518	0,983	1,20
CB_22	240,22	150,61	40,35	39,56	44,24	453	39,14	15.545	13.186	14.052	13.137	239	0,246	0,535	1,077	1,37
CB_23	240,28	150,65	40,30	33,70	37,45	449	27,62	7.616	8.423	7.273	8.347	172 ¹⁾	0,962 ¹⁾	1,385 ¹⁾	2,223 ¹⁾	1,95 ¹⁾
CB_24	240,17	151,05	40,06	39,54	43,97	479	42,30	18.812	15.054	18.087	14.857	262	0,208	0,468	0,986	1,41
CB_25	240,27	151,30	40,54	38,34	42,68	468	28,20	9.679	9.790	9.588	10.237	177	0,180	0,518	1,872	2,38
CB_26	240,16	150,62	40,15	32,15	35,93	446	33,48	12.352	10.819	12.025	10.743	204	0,208	0,518	1,077	1,64
CB_27	240,26	150,84	40,29	42,46	47,36	418	37,13	14.374	12.400	14.072	12.240	229	0,200	0,542	0,994	2,06
CB_28	240,34	151,04	40,37	39,26	43,77	436	32,66	10.997	8.933	10.859	9.627	202	0,174	0,734	1,218	2,98
CB_29	240,22	150,56	39,85	34,08	38,02	413	32,96	11.175	10.538	11.181	10.537	201	0,200	0,732	1,252	3,02
CB_30	240,18	151,02	40,22	49,78	55,51	488	30,41	8.045	7.934	8.150	7.817	187	0,174	0,737	1,763	2,77

Anmerkungen:

¹⁾....als Extremwert klassifiziert

Tab. Anhang C-3: Ausgangsdaten der Prüfreihe BB-lang: BB_01 – BB_20

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	m _u [g]	m ₀ [g]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	f _{c,0.12} [N/mm ²]	E _{c,0.12,global,Reg} [N/mm ²]	E _{c,0.12,local,Reg} [N/mm ²]	E _{c,0.12,global,EN} [N/mm ²]	E _{c,0.12,local,EN} [N/mm ²]	F _{max,u} [kN]	w _{ini} [mm]	w _{lin} [mm]	w _r [mm]	c [-]
BB_01	240,17	150,89	40,16	38,14	42,59	412	38,95	13.206	11.825	13.097	11.861	236	0,182	0,517	1,232	1,71
BB_02	240,13	150,71	40,38	40,04	44,74	429	38,76	16.030	13.661	15.204	13.402	236	0,200	0,476	0,998	1,48
BB_03 ²⁾	240,22	151,19	40,04	52,83	59,41	591	45,42 ³⁾	33.328	20.703	27.980	20.546	275 ⁴⁾	0,186	0,448	-	-
BB_04	240,13	151,33	39,69	44,03	49,34	458	36,60	15.697	13.464	14.649	13.432	220	0,194	0,567	0,951	2,10
BB_05 ²⁾	240,18	150,76	40,28	54,17	60,95	535	45,28 ³⁾	19.145	15.272	18.942	15.870	275 ⁴⁾	0,164	0,501	-	-
BB_06 ²⁾	240,24	150,94	39,45	50,08	56,37	523	46,18 ³⁾	19.286	15.425	18.520	15.395	275 ⁴⁾	0,194	0,597	-	-
BB_07	240,18	151,26	40,22	39,38	44,05	436	36,12	13.500	12.125	13.144	11.833	220	0,178	0,638	1,121	2,73
BB_08	240,13	150,93	40,35	44,74	49,46	405	32,80	10.647	9.539	10.519	10.328	200	0,196	0,696	1,208	2,10
BB_09	240,07	151,12	40,26	38,53	43,11	445	32,94	12.289	10.795	11.946	10.604	200	0,172	0,641	1,152	2,51
BB_10	240,12	150,30	40,24	54,19	60,83	487	44,67	19.609	15.750	18.881	15.536	270	0,200	0,460	1,187	1,86
BB_11	240,18	150,56	40,24	41,68	46,89	436	35,81	13.002	11.532	12.588	11.373	217	0,166	0,571	1,092	2,50
BB_12	240,08	150,78	40,26	43,41	48,42	486	37,10	16.596	14.562	14.893	14.440	225	0,248	0,622	1,073	2,48
BB_13	240,16	151,13	40,01	29,42	32,80	394	29,92	9.045	8.088	8.769	8.449	181	0,176	0,738	1,340	3,18
BB_14	239,92	150,63	40,19	44,66	49,96	436	40,92	17.552	14.896	16.911	14.583	248	0,218	0,483	1,070	1,52
BB_15	240,12	150,62	40,19	40,89	45,88	435	36,29	12.960	10.942	12.574	11.228	220	0,180	0,498	1,136	1,52
BB_16	240,15	150,68	40,08	42,14	47,37	461	38,69	12.882	11.619	12.513	11.394	234	0,190	0,698	1,364	2,42
BB_17	240,09	150,58	40,16	32,54	36,52	383	32,83	11.745	10.974	11.110	10.933	199	0,272	0,773	1,269	2,79
BB_18	240,19	150,34	39,83	43,35	48,72	439	36,11	15.045	14.745	14.417	14.425	216	0,208	0,609	1,112	1,73
BB_19 ²⁾	240,08	149,95	40,09	46,53	52,59	532	45,74 ³⁾	24.151	17.921	22.459	17.640	275 ⁴⁾	0,196	0,540	-	-
BB_20	240,03	151,03	40,32	37,38	41,93	470	37,19	17.009	17.403	16.289	16.915	226	0,230	0,479	1,098	1,29

Anmerkungen:

²⁾ ...kein Versagen des Prüfkörpers da max. Kapazität der Prüfmaschine lignum_z_275 erreicht; Maximalkraft und Festigkeit in Folge als rechts-zensiert in Datenanalyse berücksichtigt

³⁾ ...max. Spannung zum Zeitpunkt des vorzeitigen Prüfabbruchs; Spannung entsprechend der max. Kapazität der Prüfmaschine

⁴⁾ ...Last entspricht der max. Kapazität der Prüfmaschine

Tab. Anhang C-4: Ausgangsdaten der Prüfreihe BB-lang: BB_21 – BB_30

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	m _n [g]	m ₀ [g]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	f _{c,0.12} [N/mm ²]	E _{c,0.12,global,Reg} [N/mm ²]	E _{c,0.12,local,Reg} [N/mm ²]	E _{c,0.12,global,EN} [N/mm ²]	E _{c,0.12,lokal,EN} [N/mm ²]	F _{max,u} [kN]	w _{ini} [mm]	w _{fin} [mm]	w _f [mm]	c [-]
BB_21	240,07	150,51	39,79	35,59	39,83	390	33,47	11.187	11.124	11.218	10.829	200	0,272	0,784	1,272	2,64
BB_22	240,12	151,43	40,20	40,91	45,56	376	30,81	10.689	10.441	10.419	10.285	188	0,262	0,721	1,213	2,30
BB_23	240,13	150,99	39,98	37,07	41,36	471	34,02	13.468	11.522	12.864	11.420	205	0,260	0,675	1,072	2,29
BB_24	240,05	151,22	39,91	43,39	48,61	467	37,60	14.643	13.007	14.570	13.572	227	0,278	0,707	1,192	1,87
BB_25	240,12	150,91	40,23	40,73	45,79	444	36,82	11.470	11.036	11.653	10.810	224	0,242	0,761	1,489	2,53
BB_26	240,12	151,06	40,23	32,61	36,63	470	39,07	14.857	13.302	14.456	13.069	237	0,232	0,668	1,177	2,10
BB_27	240,09	151,15	40,16	38,90	43,61	477	39,86	13.416	12.221	13.135	11.901	242	0,250	0,770	1,289	2,20
BB_28	240,17	151,37	39,97	41,76	46,73	462	41,30	16.780	13.645	15.899	13.482	250	0,272	0,705	1,066	2,82
BB_29	240,23	150,51	40,05	36,11	40,58	464	42,22	18.588 ¹⁾	16.038	18.024 ¹⁾	15.698	255 ¹⁾	0,274 ¹⁾	0,660 ¹⁾	2,029 ¹⁾	4,59 ¹⁾
BB_30	240,15	151,01	40,06	34,18	38,22	427	37,19	15.174	13.703	13.960	13.330	225	0,287	0,566	1,130	1,45

Anmerkungen:

¹⁾als Extremwert klassifiziert

Tab. Anhang C-5: Ausgangsdaten der Prüfreihe BB-kurz: BB_31 – BB_40

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	m _u [g]	m ₀ [g]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	f _{c,0.12} [N/mm ²]	E _{c,0.12,global.Reg} [N/mm ²]	E _{c,0.12,local.Reg} [N/mm ²]	E _{c,0.12,global.EN} [N/mm ²]	E _{c,0.12,lokal.EN} [N/mm ²]	F _{max,u} [kN]	w _{ini} [mm]	w _{in} [mm]	w _f [mm]	c [-]
BB_kurz_31	119,84	151,26	40,25	273,50	306,36	420	34,04	15.850	10.151	13.565	11.025	207	0,224	0,402	0,708	1,78
BB_kurz_32	120,00	151,40	40,27	299,07	334,24	458	35,54	11.316	9.503	10.796	10.183	217	0,264	0,503	1,309	3,01
BB_kurz_33	119,91	151,07	40,20	321,17	362,40	496	37,38	19.446	9.269	16.683	11.704	227	0,251	0,402	1,126	3,67
BB_kurz_34	119,96	150,75	39,78	241,70	271,10	377	31,98	12.350	9.453	10.929	10.277	192	0,279	0,483	0,819	1,69
BB_kurz_35	119,99	150,91	40,24	286,05	321,90	441	39,43	20.701	12.174	17.235	13.434	239	0,272	0,422	1,003	2,93
BB_kurz_36	119,96	151,01	40,24	271,96	303,74	418	38,22	17.819	11.543	16.023	13.062	232	0,272	0,478	0,765	2,85
BB_kurz_37	119,96	150,97	40,26	254,54	284,70	391	30,39	8.931	8.029	8.618	7.980	185	0,264	0,575	1,008	2,86
BB_kurz_38	119,93	150,85	40,30	254,78	284,67	391	34,36	13.898	11.437	10.895	11.351	209	0,346	0,547	0,898	3,09
BB_kurz_39	119,98	150,81	40,11	276,45	310,62	428	37,58	19.550	12.633	16.616	12.576	227	0,224	0,385	0,683	2,97
BB_kurz_40	119,84	151,26	40,25	279,42	313,17	429	39,69	23.381	13.249	18.772	13.225	242	0,240	0,391	0,675	2,11

Tab. Anhang C-6: Ausgangsdaten der Prüfreihe L40-lang: L40_01 – L40_20

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	m _u [g]	m ₀ [g]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	f _{c,0.12} [N/mm ²]	E _{c,0.12, global.Reg} [N/mm ²]	E _{c,0.12, local.Reg} [N/mm ²]	E _{c,0.12, global.EN} [N/mm ²]	E _{c,0.12, lokal.EN} [N/mm ²]	F _{max,u} [kN]	W _{ini} [mm]	W _{fin} [mm]	w _f [mm]	c [-]
L40_01	239,94	160,44	40,07	37,61	42,63	489	38,17	18.025	14.356	17.434	15.335	245	0,172	0,411	1,291	2,99
L40_02 ⁵⁾	240,22	160,51	40,17	37,29	42,12	511	31,43	9.020	–	11.940	11.554 ⁶⁾	203	0,276	0,669	1,915	2,99
L40_03 ^{2) 5)}	239,43	160,66	40,06	45,93	51,96	512	42,72 ³⁾	11.051	–	15.159	14.988 ⁶⁾	275 ⁴⁾	0,260	1,098	–	–
L40_04 ⁵⁾	240,23	160,85	40,10	62,37	70,42	488	40,90	8.737	–	15.251	16.892 ⁶⁾	264	0,134	0,668	2,205	2,38
L40_05 ⁵⁾	240,13	160,71	40,17	82,25	91,79	405	34,26	8.909	–	11.270	12.172 ⁶⁾	221	0,344	0,778	1,976	2,82
L40_06 ⁵⁾	240,08	160,69	40,10	39,90	44,88	449	41,56	8.907	–	12.543	14.224 ⁶⁾	268	0,252	0,785	2,496	3,06
L40_07 ⁵⁾	240,21	160,42	39,91	39,00	44,03	541	41,60	11.895	–	15.538	14.775 ⁶⁾	266	0,266	0,658	1,782	2,96
L40_08 ^{2) 5)}	240,09	160,44	39,94	54,01	61,23	535	42,91 ³⁾	13.757	–	16.161	17.915 ⁶⁾	275 ⁴⁾	0,336	0,920	–	–
L40_09 ⁵⁾	240,09	160,77	40,01	48,91	55,34	517	42,75 ³⁾	15.457	–	20.068	18.026 ⁶⁾	275 ⁴⁾	0,246	0,883	–	–
L40_10 ⁵⁾	239,74	160,74	39,90	39,19	44,10	473	41,47	13.037	–	15.216	14.362 ⁶⁾	266	0,236	0,589	2,072	3,84
L40_11 ⁵⁾	240,16	160,38	40,11	45,56	51,67	487	36,52	7.815	–	13.710	13.362 ⁶⁾	235	0,146	0,685	2,116	1,79
L40_12 ^{2) 5)}	239,97	160,43	40,10	51,46	58,03	504	42,74 ³⁾	10.313	–	17.437	16.076 ⁶⁾	275 ⁴⁾	0,132	1,084	–	–
L40_13 ^{2) 5)}	240,18	160,45	40,12	48,85	55,08	488	42,71 ³⁾	12.201	–	14.370	15.842 ⁶⁾	275 ⁴⁾	0,336	0,975	–	–
L40_14 ⁵⁾	238,43	160,37	40,08	40,67	45,93	509	38,92	11.482	–	14.380	15.176 ⁶⁾	250	0,290	0,672	1,705	2,17
L40_15	240,06	160,56	40,11	45,89	51,73	486	35,87	15.110	11.174	14.841	12.612	231	0,232	0,492	1,596	3,37
L40_16 ²⁾	239,20	160,55	40,01	56,80	64,03	545	42,81 ³⁾	15.107	12.307	15.886	14.757	275 ⁴⁾	0,242	0,661	–	–
L40_17	240,05	160,51	40,08	34,57	38,98	429	38,53	13.097	13.879	11.749	14.021	248	0,355	0,613	2,400	1,88
L40_18	240,20	160,54	40,16	46,66	52,62	471	36,60	12.565	14.358	12.747	13.902	236	0,346	0,681	1,561	2,02
L40_19	240,09	160,47	40,04	70,14	79,34	526	42,70	17.859	18.798	16.466	18.346	274	0,318	0,547	1,613	1,63
L40_20 ²⁾	239,90	160,77	40,07	49,52	55,79	465	42,69 ³⁾	16.196	16.620	13.890	16.368	275 ⁴⁾	0,361	0,580	–	–

Anmerkungen:

- ²⁾kein Versagen des Prüfkörpers da max. Kapazität der Prüfmaschine lignum_z_275 erreicht; Maximalkraft und Festigkeit in Folge als rechts-zensiert in Datenanalyse berücksichtigt
³⁾max. Spannung zum Zeitpunkt des vorzeitigen Prüfabbruchs; Spannung entsprechend der max. Kapazität der Prüfmaschine
⁴⁾Last entspricht der max. Kapazität der Prüfmaschine
⁵⁾Lastaufbringung kraftgesteuert
⁶⁾Bestimmung des E-Moduls erfolgte zwischen 10 – 30 % aufgrund vom vorzeitigen Ausfallen der Wegaufnehmer

Tab. Anhang C-7: Ausgangsdaten der Prüfreihe L40-lang: L40_21 – L40_30

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	m_u [g]	m_0 [g]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0.12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0.12}$ global.Reg [N/mm ²]	$E_{c,0.12}$ local.Reg [N/mm ²]	$E_{c,0.12}$ global.EN [N/mm ²]	$E_{c,0.12}$ lokal.EN [N/mm ²]	$F_{max,u}$ [kN]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [–]
L40_21	240,07	160,64	40,05	41,81	47,01	489	42,59	13.907	15.618	15.141	15.238	274	0,268	0,695	1,468	2,47
L40_22	240,27	160,42	40,18	69,88	77,99	481	32,11	11.366	12.236	12.078	11.913	207	0,268	0,590	1,353	2,81
L40_23	240,04	160,58	39,99	42,39	47,91	494	42,69	14.605	15.641	15.924	15.475	274	0,276	0,707	1,761	3,65
L40_24 ²⁾	240,08	160,48	40,08	50,18	56,73	495	42,75 ³⁾	16.196	17.168	17.620	16.838	275 ⁴⁾	0,256	0,635	–	–
L40_25	240,08	160,50	40,13	44,21	49,51	465	42,60	12.204	15.160	12.734	15.179	274	0,344	0,763	2,306	2,93
L40_26	239,97	160,11	40,00	40,53	45,98	475	38,92	14.115	14.962	13.038	14.515	249	0,342	0,594	2,258	2,45
L40_27 ¹⁾	240,09	160,88	40,00	35,73	39,96	421	34,78	8.457	11.699	8.962	12.579	224	0,741	1,208	2,278	1,94
L40_28	240,10	160,69	39,99	43,31	48,83	459	39,88	13.446	15.439	14.370	15.125	256	0,266	0,606	2,468	2,45
L40_29 ¹⁾	239,81	160,43	40,15	40,71	46,15	478	37,74	8.256	10.407	8.921	12.339	243	0,284	0,813	2,083	5,34
L40_30	240,08	160,75	40,17	53,64	60,58	482	29,17	7.914	12.180	8.129	12.054	188	0,276	0,743	1,501	3,28

Anmerkungen:

¹⁾als Extremwert klassifiziert

²⁾kein Versagen des Prüfkörpers da max. Kapazität der Prüfmaschine lignum_z_275 erreicht; Maximalkraft und Festigkeit in Folge als rechts-zensiert in Datenanalyse berücksichtigt

³⁾max. Spannung zum Zeitpunkt des vorzeitigen Prüfabbruchs; Spannung entsprechend der max. Kapazität der Prüfmaschine

⁴⁾Last entspricht der max. Kapazität der Prüfmaschine

Tab. Anhang C-8: Ausgangsdaten der Prüfreihe L40-kurz: L40_31 – L40_40

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	m _u [g]	m ₀ [g]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	f _{c,0.12} [N/mm ²]	E _{c,0.12, global.Reg} [N/mm ²]	E _{c,0.12, local.Reg} [N/mm ²]	E _{c,0.12, global.EN} [N/mm ²]	E _{c,0.12, lokal.EN} [N/mm ²]	F _{max,u} [kN]	w _{ini} [mm]	w _{in} [mm]	w _f [mm]	c [-]
L40_kurz_31	120,00	160,94	40,19	368,79	412,35	532	33,55	15.216	7.880	14.038	8.267	217	0,256	0,382	1,269	3,21
L40_kurz_32 ²⁾	119,95	160,49	39,96	317,46	358,00	464	42,87 ³⁾	31.626	16.427	27.260	16.086	275 ⁴⁾	0,303	0,377	–	–
L40_kurz_33 ⁶⁾	119,98	160,80	40,02	307,14	346,85	448	40,36	28.981	14.595	24.367	14.540	260	0,249	0,333	–	–
L40_kurz_34	119,94	160,42	39,97	327,19	370,02	485	41,50	14.081	11.465	11.371	12.970	266	0,363	0,581	1,443	2,67
L40_kurz_35 ²⁾	119,97	160,59	39,97	348,01	392,62	508	42,83 ³⁾	43.487	17.566	30.507	17.155	275 ⁴⁾	0,287	0,346	–	–
L40_kurz_36	119,93	160,57	39,94	280,91	314,40	410	34,48	18.824	11.974	15.508	12.224	221	0,251	0,384	1,232	2,89
L40_kurz_37	119,88	160,89	40,05	319,15	359,01	464	42,15	19.285	15.174	17.155	15.115	272	0,352	0,476	1,153	2,22
L40_kurz_38	119,87	160,37	40,09	331,59	373,22	484	39,88	17.376	10.245	14.798	11.672	256	0,304	0,438	1,092	2,79
L40_kurz_39 ²⁾	119,91	160,50	40,14	329,31	369,88	479	42,68 ³⁾	27.247	14.975	21.531	15.928	275 ⁴⁾	0,354	0,443	–	–
L40_kurz_40 ²⁾	119,91	160,33	40,01	316,55	356,61	462	42,86 ³⁾	12.622	16.083	13.666	15.861	275 ⁴⁾	0,189	0,445	–	–

Anmerkungen:

²⁾kein Versagen des Prüfkörpers da max. Kapazität der Prüfmaschine lignum_z_275 erreicht; Maximalkraft und Festigkeit in Folge als rechts-zensiert in Datenanalyse berücksichtigt

³⁾max. Spannung zum Zeitpunkt des vorzeitigen Prüfabbruchs; Spannung entsprechend der max. Kapazität der Prüfmaschine

⁴⁾Last entspricht der max. Kapazität der Prüfmaschine

⁶⁾wurde nicht zur Auswertung herangezogen, da es während des Prüfvorganges zu einer ungeplanten Schiefstellung des Prüfkörpers kam

C-3 Ausgangsdaten der Prüfreihe – BSH

Tab. Anhang C-9: Ausgangsdaten der Prüfreihe A-VF0

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	l _{LE} [mm]	b _{LE} [mm]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	f _{c,0,12} [N/mm ²]	E _{c,0,12,Reg} [N/mm ²]	E _{c,0,12,Reg} [N/mm ²]	F _{max,u} [kN]	w _{ini} [mm]	w _{lin} [mm]	w _r [mm]	c [-]	F _{max} / F _{Ende}
A-VF0-01	158,3	75,9	709,3	158,3	75,9	11,4	507	51,05	14.186	14.254	625	0,304	2,081	3,330	10,18	0,99
A-VF0-02	158,7	76,0	709,0	158,7	76,0	11,6	494	44,27	13.334	13.407	540	0,303	1,786	3,026	5,99	0,89
A-VF0-03	158,8	75,9	708,9	158,8	75,9	11,4	508	48,24	14.564	14.457	592	0,442	2,011	3,153	9,20	0,88
A-VF0-04	158,9	75,9	709,0	158,9	75,9	11,6	501	52,40	14.621	14.747	640	0,410	2,199	3,404	11,77	0,98
A-VF0-05	159,3	76,1	709,1	159,3	76,1	11,4	500	41,62	11.989	12.212	513	0,519	2,199	3,475	4,94	0,95
A-VF0-06	159,0	75,8	709,0	159,0	75,8	11,2	512	45,43	13.189	12.667	561	0,492	2,386	3,322	9,91	0,98
A-VF0-07	158,7	75,8	709,1	158,7	75,8	11,4	509	46,14	14.594	14.226	565	0,662	2,067	3,207	13,89	0,97
A-VF0-08	159,0	75,8	708,9	159,0	75,8	11,4	509	47,24	14.808	14.718	580	0,437	1,965	3,042	10,84	0,99
A-VF0-09	159,3	76,1	708,9	159,3	76,1	11,4	494	48,03	13.206	13.226	593	0,488	2,335	3,435	6,33	0,94

Tab. Anhang C-10: Ausgangsdaten der Prüfreihe A-TF1

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	l _{LE} [mm]	b _{LE} [mm]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	f _{c,0,12} [N/mm ²]	E _{c,0,12,Reg} [N/mm ²]	E _{c,0,12,Reg} [N/mm ²]	F _{max,u} [kN]	w _{ini} [mm]	w _{lin} [mm]	w _r [mm]	c [-]	F _{max} / F _{Ende}
A-TF1-01	158,1	75,8	75,1	30,0	75,8	11,1	460	50,04	6.591	5.206	117	0,23	0,66	1,07	0,66	0,97
A-TF1-02	158,1	76,0	75,2	30,0	76,0	11,3	511	49,72	6.660	6.154	116	0,24	0,58	1,10	0,74	0,91
A-TF1-03	158,1	75,8	75,0	30,0	75,8	11,0	515	57,20	8.091	7.379	134	0,19	0,57	1,01	2,08	0,86
A-TF1-04	158,0	75,5	75,2	30,0	75,5	11,1	509	56,41	7.591	7.096	131	0,15	0,47	1,09	2,44	0,83
A-TF1-05 ¹⁾	158,1	75,7	74,9	30,0	75,7	11,2	439	44,41	9.035	6.814	103	0,21	0,55	0,62	0,73	0,96
A-TF1-06	158,9	75,8	75,0	30,0	75,8	11,3	518	56,59	8.154	7.244	131	0,18	0,53	1,05	1,02	0,89
A-TF1-07	158,9	75,9	75,0	30,0	75,9	11,1	522	54,39	7.156	6.552	127	0,22	0,58	1,01	2,41	0,89

Anmerkungen:

¹⁾zu hohe Vorbelastung bei Prüfung von A-TF1-05; wird folglich in Auswertung nicht berücksichtigt

Tab. Anhang C-11: Ausgangsdaten der Prüfreihe A-TF4

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	l _{LE} [mm]	b _{LE} [mm]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	f _{c,0.12} [N/mm ²]	E _{c,0.12,Reg} [N/mm ²]	E _{c,0.12,Reg} [N/mm ²]	F _{max,u} [kN]	w _{ini} [mm]	w _{lin} [mm]	w _f [mm]	c [-]	F _{max} /F _{Ende}
A-TF4-01	159,1	76,0	334,9	30,0	76,0	11,1	434	46,92	18.800	16.241	110	0,47	0,98	1,60	0,75	0,95
A-TF4-02	158,7	75,9	334,9	30,0	75,9	11,4	487	55,63	22.665	21.978	129	0,21	0,73	1,30	1,05	0,97
A-TF4-03	157,6	75,8	334,7	30,0	75,8	11,1	523	56,81	23.228	21.949	133	0,23	0,78	1,34	0,82	0,91
A-TF4-04	158,9	75,8	334,9	30,0	75,8	11,2	507	56,09	23.011	22.044	131	0,39	0,95	1,45	3,71 ¹⁾	0,75
A-TF4-05	159,0	76,0	335,0	30,0	76,0	11,1	450	47,52	19.346	18.516	111	0,35	0,92	1,40	0,63	0,93
A-TF4-06	158,9	76,0	334,9	30,0	76,0	11,1	510	58,48	23.567	23.104	137	0,17	0,71	1,30	2,02	0,84
A-TF4-07	159,1	76,0	335,0	30,0	76,0	11,2	521	61,91	24.168	23.421	145	0,18	0,79	1,34	1,30	0,96

Anmerkungen:

²⁾als Extremwert klassifiziert

Tab. Anhang C-12: Ausgangsdaten der Prüfreihe B-VF0

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	l _{LE} [mm]	b _{LE} [mm]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	f _{c,0.12} [N/mm ²]	E _{c,0.12,Reg} [N/mm ²]	E _{c,0.12,Reg} [N/mm ²]	F _{max,u} [kN]	w _{ini} [mm]	w _{lin} [mm]	w _f [mm]	c [-]	F _{max} /F _{Ende}
B-VF0-01	159,4	115,8	708,9	159,4	115,8	11,2	476	43,57	12.999	12.972	823	0,62	2,14	3,57	8,54	0,96
B-VF0-02	158,5	115,4	709,1	158,5	115,4	11,5	500	46,71	13.385	13.184	867	0,82	2,56	3,63	9,06	0,96
B-VF0-03	158,6	115,4	708,9	158,6	115,4	11,4	489	43,46	12.970	12.931	810	0,60	2,08	3,44	4,62	0,77
B-VF0-04	159,0	115,6	708,7	159,0	115,6	11,5	467	42,06	12.577	12.419	784	0,49	2,20	3,18	2,84	0,86
B-VF0-05	158,3	115,7	708,8	158,3	115,7	11,3	481	45,26	13.107	13.196	846	0,47	2,43	3,19	6,00	0,83
B-VF0-06	158,3	115,6	708,7	158,3	115,6	11,3	489	46,42	13.186	13.064	867	0,45	2,10	3,45	4,17	0,80
B-VF0-07	158,5	115,6	708,8	158,5	115,6	11,3	476	43,76	13.208	13.191	819	0,54	2,38	3,20	5,79	0,81
B-VF0-08	158,9	115,7	708,7	158,9	115,7	11,4	467	42,00	12.885	12.868	786	0,29	1,91	2,99	3,86	0,88
B-VF0-09	159,3	115,4	708,7	159,3	115,4	11,4	514	51,55	13.459	13.428	964	0,61	2,37	3,94	4,82	0,76
B-VF0-10	158,6	115,7	709,3	158,6	115,7	11,6	462	40,88	11.880	11.732	759	0,56	2,23	3,38	2,83	0,89

Tab. Anhang C-13: Ausgangsdaten der Prüfreihe B-TF1

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	l _{LE} [mm]	b _{LE} [mm]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	f _{c,0.12} [N/mm ²]	E _{c,0.12,Reg} [N/mm ²]	E _{c,0.12,Reg} [N/mm ²]	F _{max,u} [kN]	w _{ini} [mm]	w _{lin} [mm]	w _f [mm]	c [-]	F _{max} / F _{Ende}
B-TF1-01	158,6	115,6	235,2	30,0	115,6	11,3	494	52,46	16.696	15.662	186	0,23	0,74	1,20	1,18	0,97
B-TF1-02	158,7	115,7	235,3	30,0	115,7	11,2	476	50,31	15.478	14.131	179	0,18	0,71	1,25	1,39	0,98
B-TF1-03	159,2	115,9	235,6	30,0	115,9	11,2	476	47,98	13.652	12.949	171	0,22	0,54	1,55	1,35	0,92
B-TF1-04	158,9	115,9	235,5	30,0	115,9	11,2	492	52,23	14.636	12.640	186	0,47 ²⁾	0,99	1,64	1,34	0,94
B-TF1-05	158,7	115,5	235,2	30,0	115,5	11,2	478	48,85	15.474	14.334	173	0,22	0,70	1,27	1,40	0,99
B-TF1-06	158,9	115,4	235,4	30,0	115,4	11,2	497	52,59	17.341	16.371	187	0,22	0,50	1,12	2,02	0,93
B-TF1-07	158,8	115,5	235,5	30,0	115,5	11,4	498	51,34	16.271	15.316	181	0,24	0,70	1,37	2,10	0,96

Anmerkungen:

²⁾als Extremwert klassifiziert

Tab. Anhang C-14: Ausgangsdaten der Prüfreihe B-TF2

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	l _{LE} [mm]	b _{LE} [mm]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	f _{c,0.12} [N/mm ²]	E _{c,0.12,Reg} [N/mm ²]	E _{c,0.12,Reg} [N/mm ²]	F _{max,u} [kN]	w _{ini} [mm]	w _{lin} [mm]	w _f [mm]	c [-]	F _{max} / F _{Ende}
B-TF2-01	158,7	115,8	235,7	60,0	115,8	10,7	499	50,39	12.958	11.407	364	0,62	1,26	1,87	2,04	0,97
B-TF2-02	158,5	115,9	235,2	60,0	115,9	11,3	476	49,43	12.219	11.197	351	0,57	1,09	1,94	1,95	0,98
B-TF2-03	159,2	115,8	235,3	60,0	115,8	11,2	494	52,25	11.309	10.817	372	0,35	1,08	1,86	2,49	0,93
B-TF2-04	159,4	116,0	235,4	60,0	116,0	11,1	501	50,48	11.244	10.443	361	0,40	1,05	1,85	1,93	0,97
B-TF2-05	158,9	115,4	235,6	60,0	115,4	11,1	474	46,69	12.500	10.410	332	0,45	1,08	1,66	1,41	0,97
B-TF2-06	158,5	115,8	235,2	60,0	115,8	11,2	504	52,60	14.196	13.385	374	0,36	0,89	1,70	2,69	0,93
B-TF2-07	158,7	115,4	235,4	60,0	115,4	11,3	498	50,64	12.781	11.887	358	0,40	1,04	1,88	1,47	0,99

Tab. Anhang C-15: Ausgangsdaten der Prüfreihe B-TF3

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	l _{LE} [mm]	b _{LE} [mm]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	f _{c,0.12} [N/mm ²]	E _{c,0.12,Reg} [N/mm ²]	E _{c,0.12,Reg} [N/mm ²]	F _{max,u} [kN]	w _{ini} [mm]	w _{lin} [mm]	w _f [mm]	c [-]	F _{max} /F _{Ende}
B-TF3-01	158,5	115,7	235,3	90,0	115,7	11,0	495	53,31	11.705	11.040	572	0,39	1,10	1,77	4,38	0,95
B-TF3-02	158,7	115,3	235,4	90,0	115,3	11,3	474	51,98	12.449	12.018	551	0,32	1,01	1,58	3,75	0,88
B-TF3-03	158,7	115,7	235,2	90,0	115,7	11,1	477	51,84	11.951	11.587	555	0,33	1,00	1,90	2,09 ²⁾	0,99
B-TF3-04	159,2	116,0	235,2	90,0	116,0	11,0	482	50,36	11.885	11.144	542	0,45	1,02	1,77	4,18	0,97
B-TF3-05	159,0	115,6	235,2	90,0	115,6	11,2	476	49,25	12.329	11.682	525	0,38	1,00	1,53	3,95	0,95
B-TF3-06	158,8	115,4	235,2	90,0	115,4	11,2	503	55,38	13.540	12.696	589	0,35	0,99	1,63	4,48	0,95
B-TF3-07	158,8	115,5	235,5	90,0	115,5	11,0	487	48,19	11.804	10.210	516	0,49	1,06	1,79	3,42	0,95

Anmerkungen:

²⁾als Extremwert klassifiziert

Tab. Anhang C-16: Ausgangsdaten der Prüfreihe B-TF4

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	l _{LE} [mm]	b _{LE} [mm]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	f _{c,0.12} [N/mm ²]	E _{c,0.12,Reg} [N/mm ²]	E _{c,0.12,Reg} [N/mm ²]	F _{max,u} [kN]	w _{ini} [mm]	w _{lin} [mm]	w _f [mm]	c [-]	F _{max} /F _{Ende}
B-TF4-01	158,4	115,6	235,2	158,4	60,0	11,1	514	57,04	14.277	13.032	557	0,49	1,11	1,68	3,20	0,90
B-TF4-02	158,4	115,5	235,3	158,4	60,0	11,4	498	57,44	14.712	13.819	556	0,31	0,93	1,52	3,37	0,90
B-TF4-03	158,4	115,4	235,3	158,4	60,0	11,4	502	59,52	14.408	13.735	576	0,53	1,18	1,78	3,13	0,82
B-TF4-04	158,6	115,4	235,3	158,6	60,0	11,2	515	59,33	13.305	12.751	578	0,44	0,99	1,89	4,68	0,88
B-TF4-05	158,6	115,1	235,5	158,6	60,0	11,3	501	53,93	13.273	12.183	524	0,70	1,14	2,07	3,28	0,81
B-TF4-06	158,9	115,3	235,3	158,9	60,0	11,0	525	61,07	14.474	13.969	600	0,38	1,03	1,70	4,22	0,94
B-TF4-07	154,2	115,2	235,3	154,2	60,0	11,2	478	55,92	13.068	12.806	530	0,37	1,05	1,67	6,17	0,89

Tab. Anhang C-17: Ausgangsdaten der Prüfreihe C-VF0

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	l_{LE} [mm]	b_{LE} [mm]	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{c,0.12}$ [N/mm ²]	$E_{c,0.12,Reg}$ [N/mm ²]	$E_{c,0.12,Reg}$ [N/mm ²]	$F_{max,u}$ [kN]	w_{ini} [mm]	w_{lin} [mm]	w_f [mm]	c [-]	F_{max}/F_{Ende}
C-VF0-01	150,7	119,6	709,6	150,7	119,6	11,0	477	34,67	10.194	10.130	644	0,19	1,85	3,24	4,84	0,82
C-VF0-02	150,4	120,1	709,8	150,4	120,1	11,3	396	32,23	9.757	9.680	594	0,36	1,94	3,07	3,84	0,84
C-VF0-03	150,5	120,1	709,8	150,5	120,1	11,5	455	34,35	9.456	9.459	630	0,34	2,10	3,54	3,10	0,89
C-VF0-04	150,5	119,8	709,8	150,5	119,8	11,4	409	31,44	9.008	8.983	577	0,29	2,06	3,42	2,85	0,92
C-VF0-05	150,5	119,8	709,7	150,5	119,8	11,2	440	33,81	9.991	9.877	624	0,34	1,65	3,21	3,96	0,95
C-VF0-06	150,3	120,4	709,9	150,3	120,4	11,3	444	32,73	10.010	10.028	605	0,32	2,05	3,23	2,18	0,96
C-VF0-07	150,7	120,0	709,6	150,7	120,0	11,1	416	30,18	8.789	8.717	561	0,22	1,95	3,09	6,01	0,78
C-VF0-08	150,0	120,0	709,7	150,0	120,0	11,2	418	32,40	8.877	8.912	597	0,32	2,10	3,54	2,44	0,93
C-VF0-09	150,2	120,1	709,9	150,2	120,1	11,3	489	36,22	11.403	11.371	667	0,31	1,93	3,16	5,31	0,98
C-VF0-10	150,6	119,8	709,7	150,6	119,8	11,1	467	40,26	11.984	12.059	746	0,41	2,00	3,42	4,42	0,88

Tab. Anhang C-18: Ausgangsdaten der Prüfreihe D-VF0

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	l _{LE} [mm]	b _{LE} [mm]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	f _{c,0.12} [N/mm ²]	E _{c,0.12,Reg} [N/mm ²]	E _{c,0.12,Reg} [N/mm ²]	F _{max,u} [kN]	w _{ini} [mm]	w _{lin} [mm]	w _f [mm]	c [-]	F _{max} / F _{Ende}
D-VF0-01	150,9	77,1	469,8	150,9	77,1	10,9	416	36,87	9.342	9.485	444	0,33	1,82	2,48	3,97	0,89
D-VF0-02	150,7	76,9	469,8	150,7	76,9	11,0	451	34,20	9.828	9.658	409	0,27	1,30	2,38	2,82	0,94
D-VF0-03	150,5	77,0	469,9	150,5	77,0	10,8	395	32,31	9.134	9.073	388	0,22	1,32	2,27	2,14	0,93
D-VF0-04	150,6	77,0	469,9	150,6	77,0	10,8	425	31,55	8.821	8.840	380	0,18	1,35	2,35	3,16	0,79
D-VF0-05	150,9	77,0	469,8	150,9	77,0	11,6	450	36,22	9.622	9.584	426	0,21	1,44	2,49	2,22	0,92
D-VF0-06	151,0	77,1	470,0	151,0	77,1	11,6	456	31,53	8.260	8.201	371	0,27	1,48	2,78	2,40	0,94
D-VF0-07	150,0	77,0	469,8	150,0	77,0	11,3	398	25,90	6.596	6.595	305	0,24	1,44	3,06	3,79	0,90
D-VF0-08	150,4	77,1	469,9	150,4	77,1	11,5	517	44,47	11.584	11.403	523	0,39	1,59	2,62	4,88	0,91
D-VF0-09	150,1	77,1	469,8	150,1	77,1	11,2	473	36,74	9.535	9.521	435	0,29	1,63	2,48	4,19	0,88
D-VF0-10	150,2	77,3	469,8	150,2	77,3	11,3	490	44,60	12.086	11.880	529	0,26	1,54	2,36	4,75	0,86

C-4 Ausgangsdaten der Prüfreihe – BSP

Tab. Anhang C-19: Ausgangsdaten der Prüfreihe E-VF0

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	l _{LE} [mm]	b _{LE} [mm]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	f _{c,0,12} [N/mm ²]	E _{c,0,12,Reg} [N/mm ²]	E _{c,0,12,Reg} [N/mm ²]	F _{max,u} [kN]	w _{ini} [mm]	w _{lin} [mm]	w _r [mm]	c [-]	F _{max} / F _{Ende}
E-VF0-01	250,3	90,2	165,1	250,3	90,2	9,5	461	27,34	4.746	4.518	667	0,18	0,82	1,73	4,18 ¹⁾	0,89
E-VF0-02	250,2	89,9	165,0	250,2	89,9	9,4	434	26,07	4.065	3.837	636	0,44	1,10	1,97	2,41	0,91
E-VF0-03	250,3	89,8	165,0	250,3	89,8	9,7	462	29,41	4.956	4.708	710	0,31	0,91	1,72	2,05	0,92
E-VF0-04	250,3	90,1	165,0	250,3	90,1	9,3	455	30,13	5.969	5.752	739	0,26	0,78	1,40	2,91	0,89
E-VF0-05	250,2	90,2	165,0	250,2	90,2	9,8	494	29,10	4.661	4.307	703	0,34	1,04	1,80	2,51	0,88

Anmerkungen:

¹⁾als Extremwert klassifiziert

Tab. Anhang C-20: Ausgangsdaten der Prüfreihe E-TF1

Bez.	L [mm]	B [mm]	H [mm]	l _{LE} [mm]	b _{LE} [mm]	u [%]	ρ ₁₂ [kg/m ³]	f _{c,0,12} [N/mm ²]	E _{c,0,12,Reg} [N/mm ²]	E _{c,0,12,Reg} [N/mm ²]	F _{max,u} [kN]	w _{ini} [mm]	w _{lin} [mm]	w _r [mm]	c [-]	F _{max} / F _{Ende}
E-TF1-01	250,2	90,4	165,0	60,0	90,4	9,3	464	28,38	4.930	3.981	167	0,37	0,96	1,71	1,17	0,92
E-TF1-02	250,3	90,4	165,2	60,0	90,4	9,5	448	30,76	5.317	3.934	180	0,68	1,40	1,93	2,59	0,87
E-TF1-03	250,3	90,2	165,1	60,0	90,2	9,9	454	30,73	6.082	4.846	177	0,51	1,12	1,69	1,64	0,98
E-TF1-04	250,2	90,3	164,9	60,0	90,3	9,3	451	29,16	5.556	4.490	172	0,31	0,92	1,47	1,73	0,91
E-TF1-05	250,0	90,5	165,2	60,0	90,5	9,5	465	33,50	6.060	5.126	197	0,29	0,92	1,60	2,56	0,85

C-5 Mercury – Messungen der Prüfreihe BSH und BSP

Im Folgenden werden jeweils eine Mercury Messung der Hauptdehnungen im linearen Bereich und eine bei F_{max} als repräsentative Messung für eine Prüfreihe dargestellt. Die Messungen selbst wurden nur an Prüfreihe mit Teilflächenbelastung im Lasteinleitungsbereich in Kombination mit vollflächigem Auflager durchgeführt. In den Messungen wurde die Lasteinleitung und der anzunehmende Verlauf der Lastausbreitung qualitativ ergänzt.

C-5.1 Prüfreihe A-TF1 und A-TF4

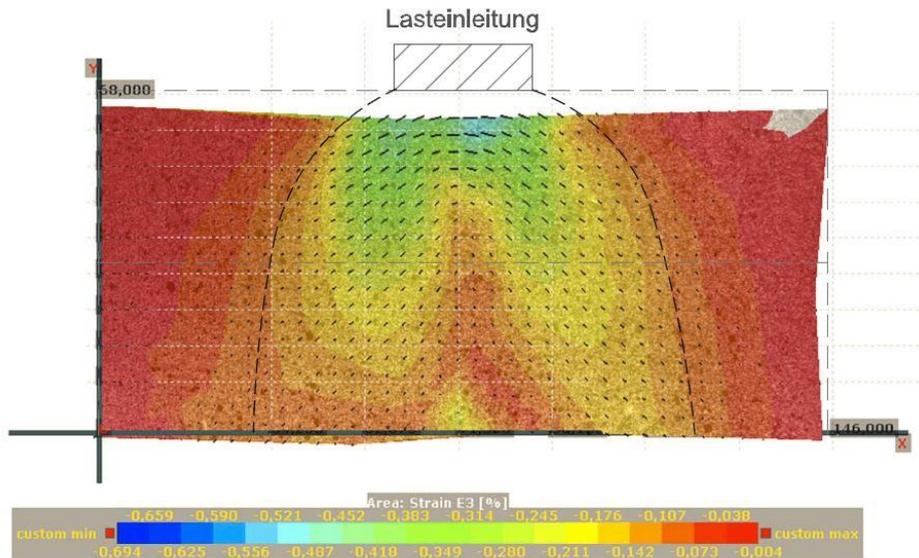


Abbildung 4-31: repräsentative Mercury Messung im lin. Bereich für die Prüfreihe A-TF1

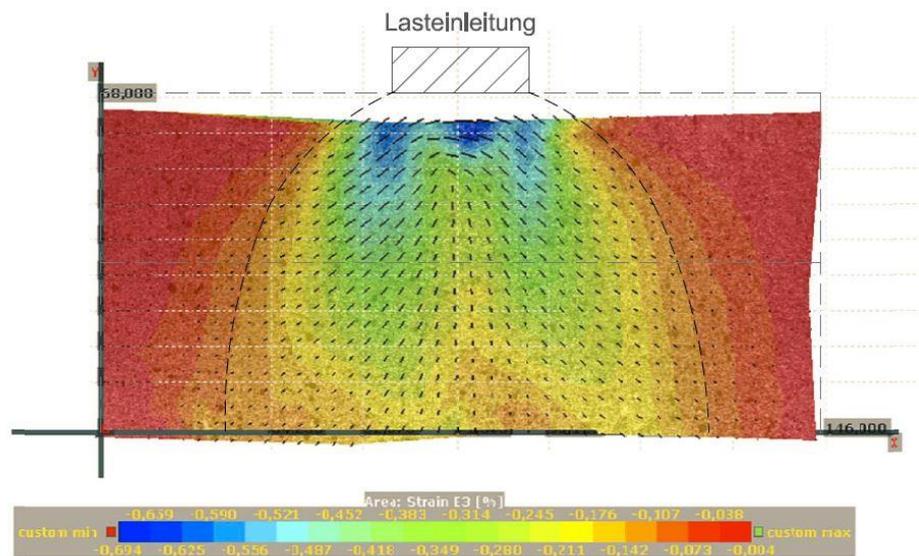


Abbildung 4-32: repräsentative Mercury Messung bei F_{max} für die Prüfreihe A-TF1

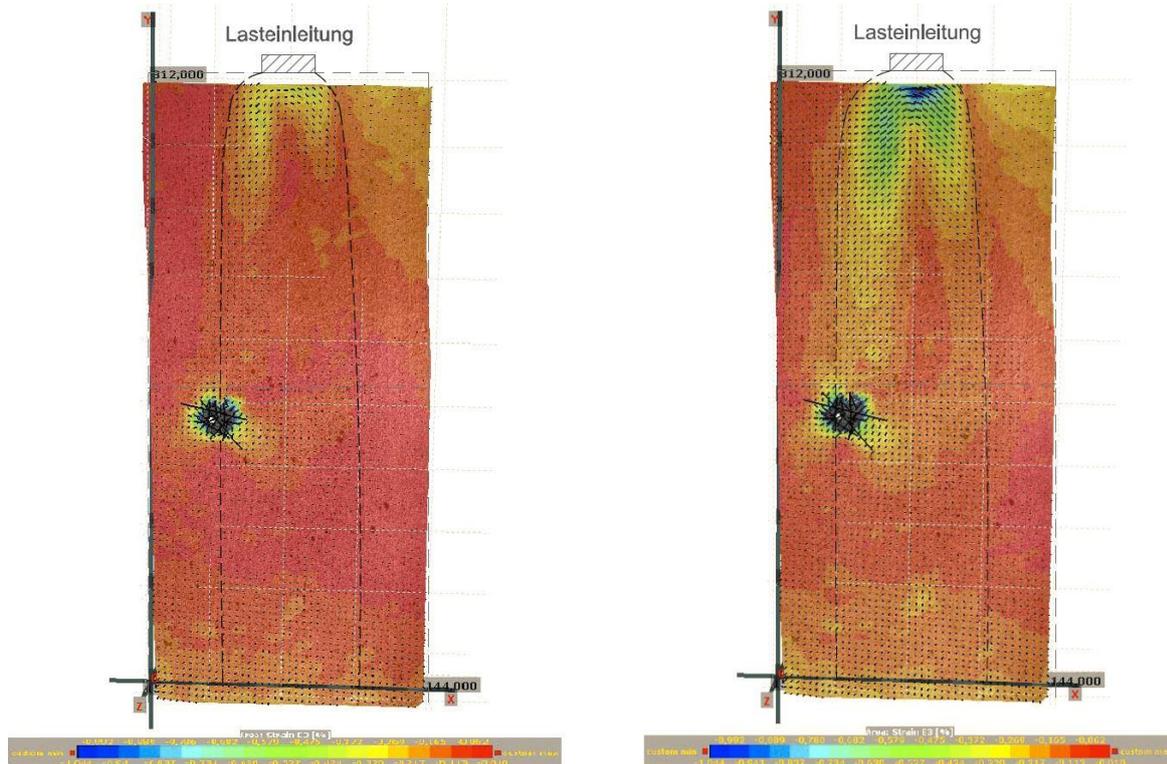


Abbildung 4-33: links: repräsentative Mercury Messung im lin. Bereich für die Prüfreihe A-TF4; rechts: repräsentative Mercury Messung bei F_{max} für die Prüfreihe A-TF4

Bei der schwarz erscheinenden Fläche handelt es sich um einen Ast an dem die Mercury-Messung nur bedingt funktioniert.

C-5.2 Prüfreihe B-TF1 bis B-TF4

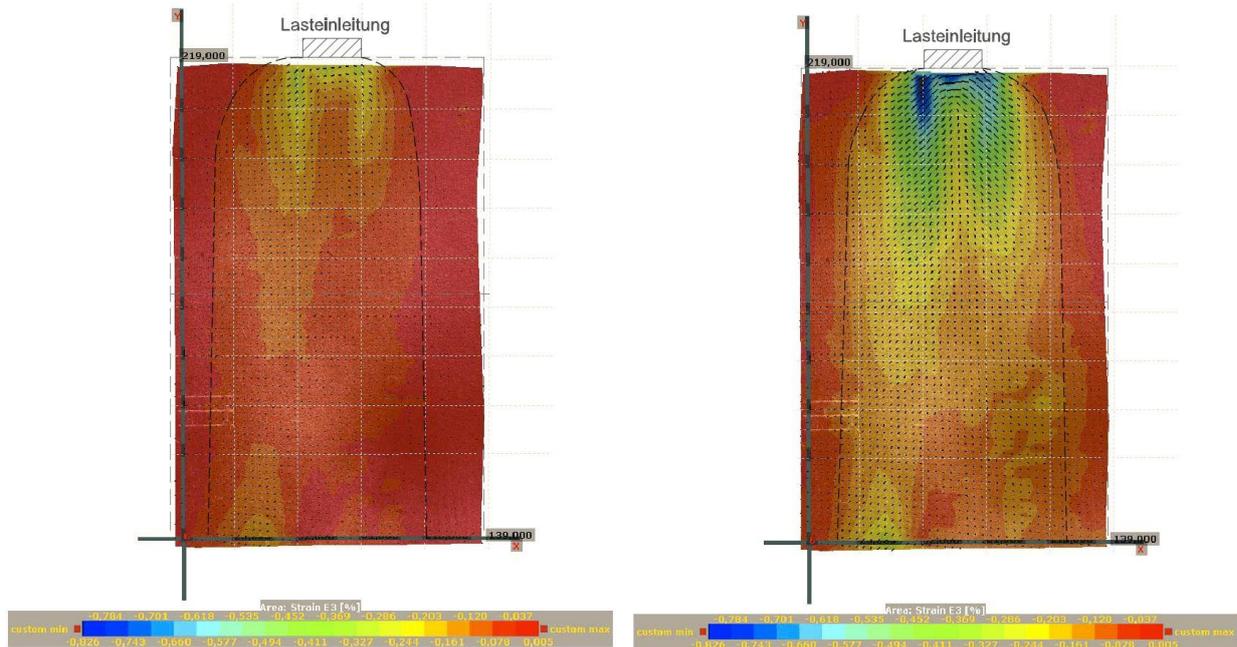


Abbildung 4-34: links: repräsentative Mercury Messung im lin. Bereich für die Prüfreihe B-TF1; rechts: repräsentative Mercury Messung bei F_{max} für die Prüfreihe B-TF1

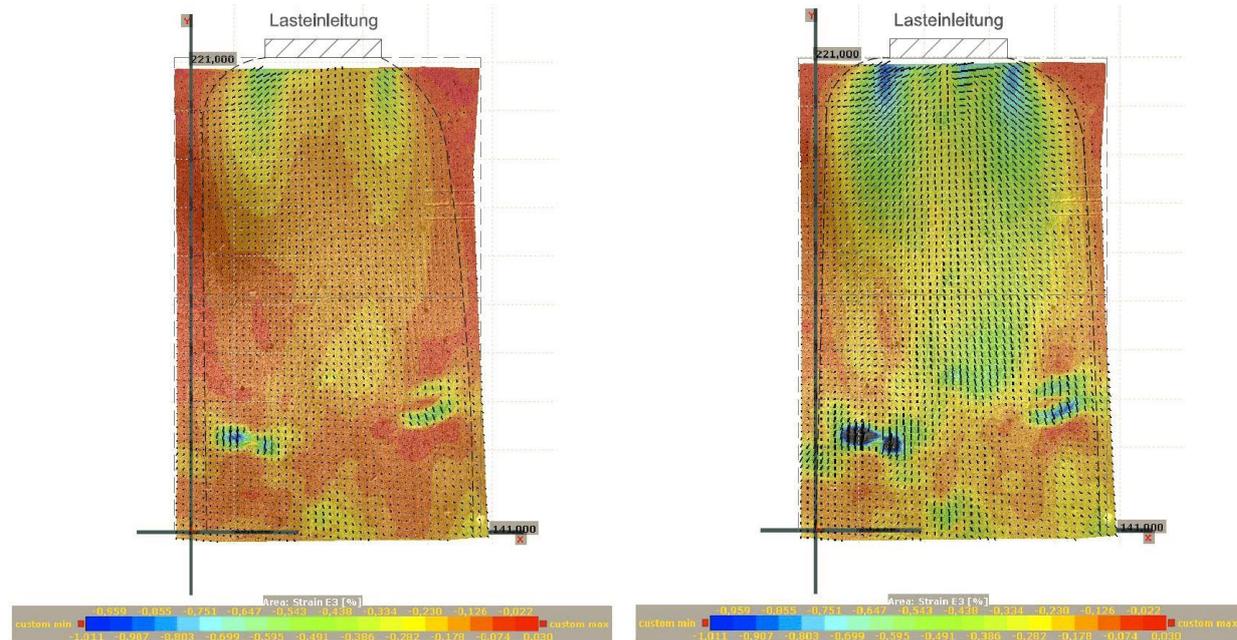


Abbildung 4-35: links: repräsentative Mercury Messung im lin. Bereich für die Prüfreihe B-TF2; rechts: repräsentative Mercury Messung bei F_{max} für die Prüfreihe B-TF2

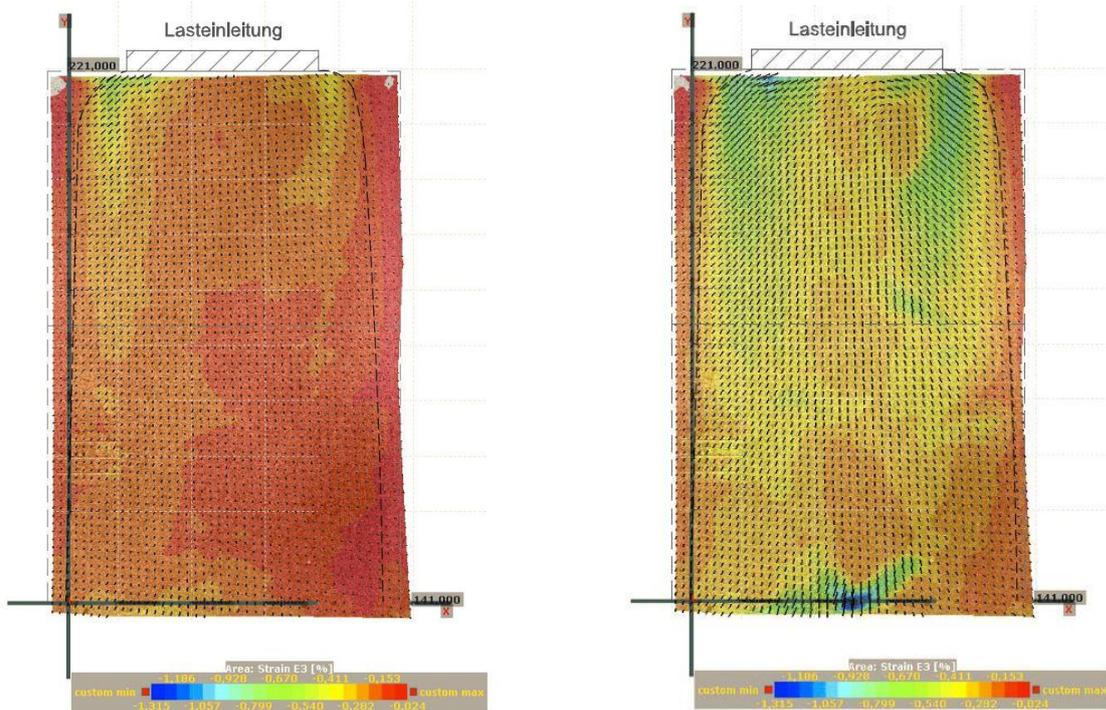


Abbildung 4-36: links: repräsentative Mercury Messung im lin. Bereich für die Prüfreihe B-TF3; rechts: repräsentative Mercury Messung bei F_{max} für die Prüfreihe B-TF3

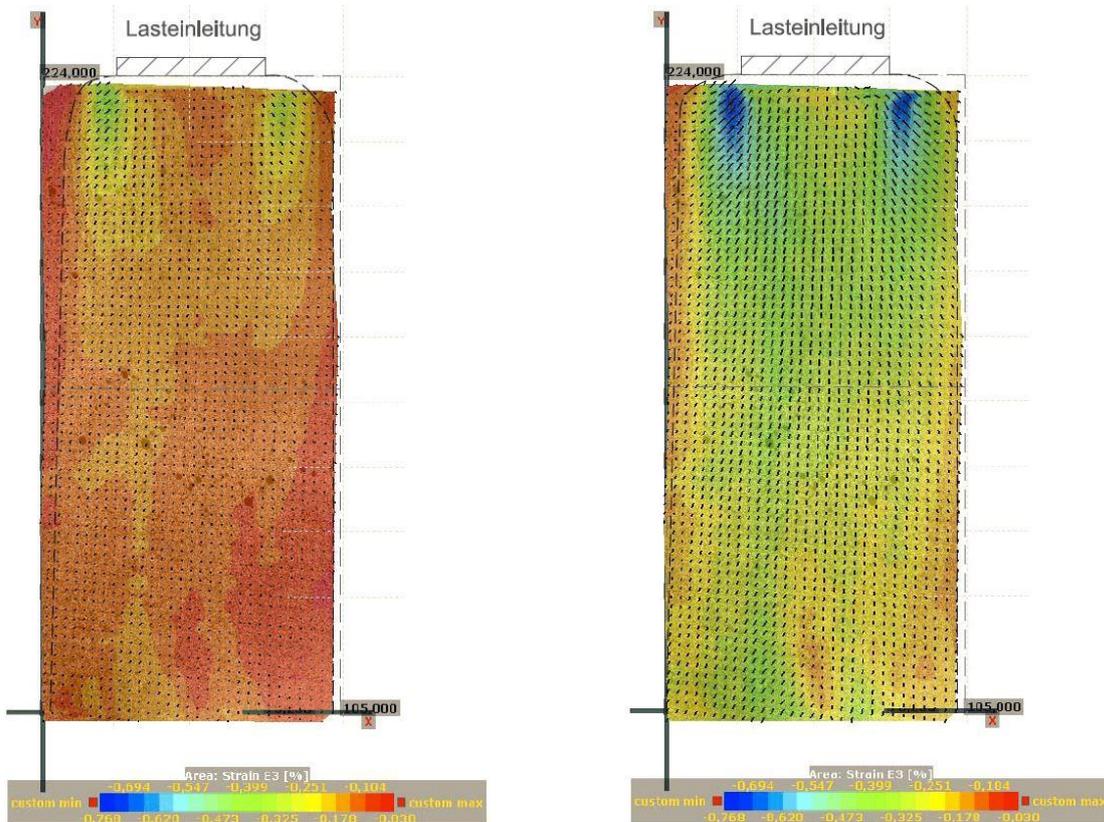


Abbildung 4-37: links: repräsentative Mercury Messung im lin. Bereich für die Prüfreihe B-TF4; rechts: repräsentative Mercury Messung bei F_{max} für die Prüfreihe B-TF4

C-5.3 Prüfreihe E-TF1

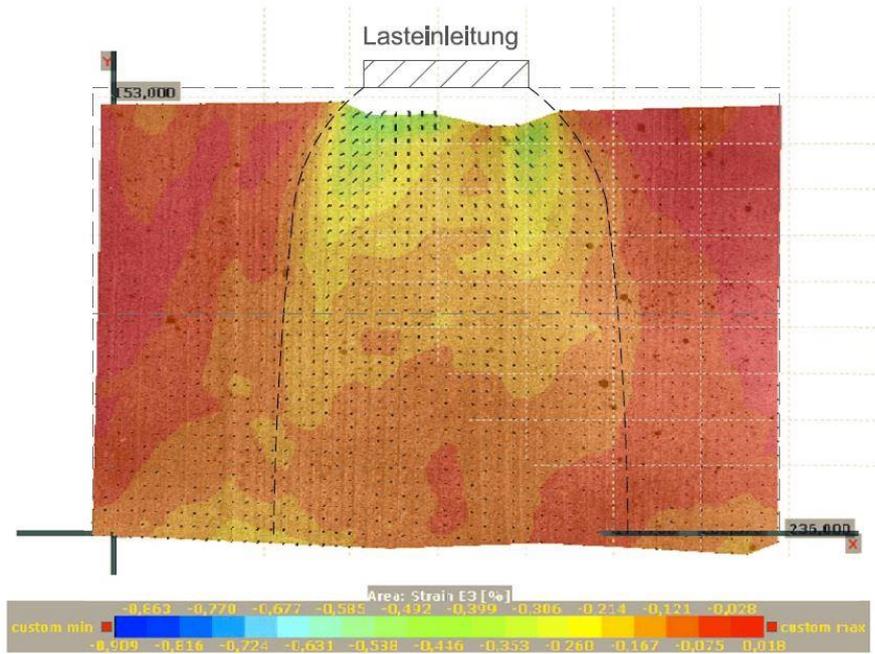


Abbildung 4-38: repräsentative Mercury Messung im lin. Bereich für die Prüfreihe E-TF1

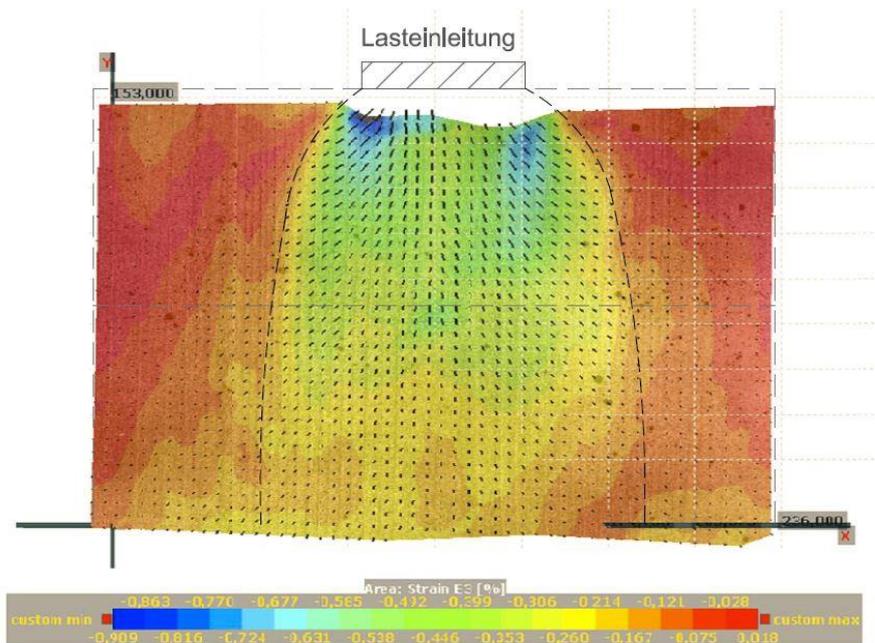


Abbildung 4-39: repräsentative Mercury Messung bei F_{max} für die Prüfreihe E-TF1