

BBSR-
Online-Publikation
07/2025

Beurteilung von Brettschichtholz in bestehenden Konstruktionen



von

Prof. Dr. Stefan Winter
Michael Schulte-Wrede

Beurteilung von Brettschichtholz in bestehenden Konstruktionen

Korrelation zwischen Klebstofffugen-Scherfestigkeiten von Bohrkernproben aus gealterten Brettschichtholzproben und den Biege-Schubfestigkeiten selbiger Brettschichtholzproben im Originalmaßstab

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-17.18

Projektlaufzeit: 05.2017 bis 11.2019

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Steffen Kisseler, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autoren

Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter (Projektleitung)
winter@tum.de

Dipl.-Ing. Michael Schulte-Wrede (Projektbearbeitung)

Redaktion

Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Michael Schulte-Wrede

Stand

April 2020

Gestaltung

Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Michael Schulte-Wrede

Bildnachweis

Titelbild: Michael Schulte-Wrede

Alle weiteren Abbildungen: Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, 2019

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Winter, Stefan; Schulte-Wrede, Michael, 2025: Beurteilung von Brettschichtholz in bestehenden Konstruktionen: Korrelation zwischen Klebstoffugen-Scherfestigkeiten von Bohrkernproben aus gealterten Brettschichtholzproben und den Biege-Schubfestigkeiten selbiger Brettschichtholzproben im Originalmaßstab. BBSR-Online-Publikation 07/2025, Bonn. <https://doi.org/10.58007/7wbk-te46>

DOI 10.58007/7wbk-te46

ISSN 1868-0097

Bonn 2025

Vorwort

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-17.18)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Darüber hinaus gilt unser besonderer Dank:

- Der Firma Pollmeier Massivholz GmbH Co.KG für die kostenlose Bereitstellung von Verstärkungsmaterial aus BauBuche
- Der Firma Binderholz GmbH für die kostenlose Lieferung und Bereitstellung von Prüfkörpern aus Brettschichtholz
- Dem Sachverständigenbüro Scharmacher für die fachliche Begleitung und Diskussionsbeiträge.
- Der Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. für die fachliche Begleitung und Diskussionsbeiträge.
- Der Firma Ulrich Lübbert Warenhandel GmbH & Co. KG für die fachliche Begleitung und Diskussionsbeiträge.
- Der Firma Dynea Chemicals für die kostenlose Bereitstellung von Klebstoff.
- Den Mitarbeitern der MPA Bau der TU München für die Unterstützung bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen

Kurzfassung

Das Forschungsvorhaben „Beurteilung von Brettschichtholz in bestehenden Konstruktionen - Korrelation der charakteristischen Festigkeiten von Klebstofffugen aus Kleinproben und aus Versuchen an Proben im Originalmaßstab“ befasst sich mit der Untersuchungsmethodik von Brettschichtholzkonstruktionen (BSH-Konstruktionen) im Bestand. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Untersuchung der Verklebung der Lamellenlagen, der ein wesentlicher Einfluss auf die vorhandene Schubfestigkeit zugeschrieben wird. Unter Einbezug von neuem und gealtertem Probenmaterial werden Ergebnisse aus Bauteilversuchen unter realer Belastungssituation, und aus in der Untersuchungspraxis etablierten Scherversuchen an Kleinproben, gegenübergestellt

Grundlage der Untersuchungen bildet ein dreiteiliges Versuchsprogramm mit unterschiedlich gealtertem Brettschichtholz-Probenmaterial, bei welchem der Zustand der Lamellenlagenverklebung entsprechend des jeweiligen Alters variiert. Im Vorfeld durchgeführte Berechnungen und Simulationen konkretisieren die jeweils angewendeten Prüfkonfigurationen. Eine präzise Bestandsaufnahme des Probenmaterials vor und während des Versuchsprogramms im Hinblick auf die darauffolgende Datenauswertung komplettiert die Prüfungsvorbereitungen.

Großformatige Dreipunkt-Biegeversuche mit Spannweiten von ca. drei Metern liefern Schubfestigkeitswerte des Probenmaterials, welche der realen Festigkeitswerte in einem Biegeträger entsprechen. Weiterhin liefern in Prüfnormen geregelte, kleinformatige Schubversuche bzw. Bohrkern-Scherversuche am gleichen Probenmaterial Ergebnisse zur Schubfestigkeit des Materials bzw. den Zustand der Verklebung, jedoch unter den Aspekten von geänderter Belastungssituation und Prüfkörperdimensionen.

Durch den Vergleich der gewonnenen Versuchsdaten wird eine Korrelation der realen Bauteil-Schubtragfähigkeit und den Festigkeitswerten der Kleinversuche bezüglich des unterschiedlichen Probenmaterials dargestellt. Dies stellt die Möglichkeit einer Abschätzung der Resttragfähigkeiten in Brettschichtholz-Bestandstragwerken auf Basis einer zerstörungsarmen Untersuchungsmethodik an Bohrkernen in Aussicht. Weiterhin gibt die statistische Auswertung der Prüfergebnisse aus den Kleinversuchen, und weiteren in der Vergangenheit ermittelten Datensätzen, Hinweise auf eine zweckmäßige Probennahme und Dateninterpretation in der Untersuchungspraxis.

Auf Basis der vorgestellten Ergebnisse, und parallel dazu angestoßener Diskussion in einem Fachgremium, wurde ein Entwurf einer Leitlinie zur Beurteilung von Brettschichtholzkonstruktionen im Bestand mittels Bohrkern-Scherprüfung als Arbeitsdokument für die Fachwelt erstellt. Um die ausgeführten Vorgehensweisen und Empfehlungen auf Ihre Gültigkeit zu prüfen, sollten weitere Versuche nach der in diesem Projekt praktizierten Vorgehensweise durchgeführt, ausgewertet und in die Interpretation der Ergebnisse mit einbezogen werden.

Abstract

The research project „Assessment of glulam in existing structures – correlation of characteristic strength values of glue lines in small-scale samples and of tests on samples in original scale” aims at further development of the investigation methodology of existing glued laminated timber (glulam) constructions. The focus herein lies on the investigation of the glue bond between lamella layers, which is regarded to have a significant influence on the present shear resistance. Incorporating newly produced and aged sample material, results gained from tests on large-scale construction components with realistic loading conditions are juxtaposed with results derived from small-scale shear tests established in investigation practice.

A three-staged testing program provides the basis for the investigation, and is executed on glulam specimens of different age, and therefore varying condition of the glue bond. Preliminary calculations and simulations substantiate the exercised test configurations. Precise inventory taking before and during the testing procedures, regarding the subsequent data evaluation, completes the preparations for testing.

Large-scale three-point bending tests with spans of around three meters provide values of shear resistance of the specimen’s material, representing real strength values of an element under bending load. Furthermore, small-scale shear tests and shear tests on drill cores according to existing test standards, and executed on the same specimen material, yield results of a shear strength of the material and the condition of glue bond, however comprehending differences in loading situation and test specimens’ dimensions.

Comparing the gained test results shows good correlation of real element shear resistance and shear strength values gathered from small-scale tests, regarding the different specimen materials. This adumbrates the possibility to derive the residual shear resistance of structural members by a minimal-invasive investigation method on drill core samples. Furthermore, the statistical evaluation of the test results, together with additional, existing datasets, provides recommendations for a purposive sample taking and data interpretation in investigation practice.

Considering the presented results, and parallel discussions with a group of experts, resulted in a draft of a guideline as a working document for the assessment of existing glulam structures with drill core shear tests. To validate the implemented approaches and recommendations, further testing according to the procedures in this project should be performed, evaluated, and implemented in the interpretation of the results.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	IV
1 Anlass und Zielsetzung	7
2 Grundlagen	9
2.1 Literaturrecherche	9
2.2 Alterung von Brettschichtholz	9
2.3 Verklebung	10
2.4 Aktuelle Untersuchungspraxis	10
2.5 Kritik an der bestehenden Bewertungsmethodik	13
2.5.1 Produktbezug	13
2.5.2 Prüfeinrichtung	13
2.5.3 Probennahme	13
2.5.4 Probenkonfektionierung	13
2.5.5 Prüfkörperkonditionierung	14
2.5.6 Bestimmung des Holzfaserbruchanteils	14
2.5.7 Normierung der Scherhöhe	15
2.6 Empfehlungen aus bisherigen Betrachtungen der Untersuchungsmethodik	16
3 Versuchsprogramm	19
3.1 Allgemeines	19
3.2 Herkunft des Probenmaterials	19
3.2.1 Bestandsprobe „Bad Kissingen“	19
3.2.2 Bestandsprobe Oktoberfest	20
3.2.3 Probe Referenz	21
3.3 Konfektionierung und Bezeichnung der Proben	21
3.4 Dokumentation der Vorschädigung der Proben	24
3.5 Dreipunkt-Biege-Schubversuche	25
3.5.1 Allgemeines	25
3.5.2 Vorberechnungen	26
3.5.3 Aufnahme der Materialparameter	29
3.5.4 Herstellung der Versuchskörper	30
3.5.5 Versuchsaufbau	31
3.5.6 Versuchsdurchführung	32
3.5.7 Versuchsbeobachtungen	34
3.5.8 Berechnung der Biege-Schubfestigkeiten	37
3.6 Schubversuche nach DIN EN 408	45

3.6.1	Allgemeines.....	45
3.6.2	Vorversuche	45
3.6.3	Berechnungen.....	48
3.6.4	Herausarbeiten der Schubproben	50
3.6.5	Aufnahme der Materialparameter.....	52
3.6.6	Herstellung der Prüfkörper	55
3.6.7	Versuchsdurchführung	55
3.6.8	Aufnahme der Bruchflächen.....	56
3.6.9	Versuchsergebnisse.....	56
3.7	Scherversuche nach DIN EN 14080, Anhang D	61
3.7.1	Allgemeines.....	61
3.7.2	Herausarbeitung der Prüfkörper	61
3.7.3	Materialparameter	63
3.7.4	Versuchsdurchführung	64
3.7.5	Aufnahme der Bruchflächen.....	65
3.7.6	Versuchsergebnisse.....	67
4	Erweiterung der Datengrundlage.....	79
4.1	Allgemeines	79
4.2	Literaturveröffentlichungen	79
4.3	Daten des MPA BAU, TUM	80
5	Zusammenführung der Versuchsergebnisse	81
5.1	Allgemeines	81
5.2	Berechnungen	81
5.3	Korrelation der Ergebnisse aus den Prüfreißen	81
5.4	Auswertung der weiteren Prüfdaten des MPA BAU	85
6	Empfehlungen und Ausblick.....	91
	Literaturverzeichnis	95
	Anlage A - Messdatenverläufe der Biege-Schubversuche	101
	Anlage B - Parameter der Schubprüfkörper	113
	Anlage C - Parameter der Scherprüfkörper	123
	Anlage D - Entwurf einer Leitlinie zur Beurteilung von Brettschichtholz konstruktionen im Bestand mittels Bohrkern-Scherprüfung.....	137

1 Anlass und Zielsetzung

Seit Beginn des letzten Jahrhunderts wurde eine Vielzahl von Bauwerken mit tragenden Brettschichtholzbauteilen errichtet. Im Zuge der Planung und Herstellung dieser Konstruktionen, bis hin zur späteren Gebäudenutzung, sind die spezifischen Baustoffeigenschaften sowie das Bauteilverhalten zu berücksichtigen. Bei Missachtung können z.B. Planungsfehler, Umbauten oder Umnutzungen der Gebäude zu Veränderungen bis hin zu Schäden an Brettschichtholz-Bauteilen führen. Diese Veränderungen betreffen unter anderem die Verklebungen der Brettschichtholzlamellen. Beispielsweise reagiert mit Harnstoff-Formaldehyd(UF-)Harzen verklebtes Brettschichtholz sensibel auf wechselnde bzw. hohe Luftfeuchten und Temperaturen (Aicher 2013).

Bei der Verwendung des organischen Baustoffes Holz in Brettschichtholzkonstruktionen sind in Zuge der Planung, der Errichtung, und des Betriebs bestimmte Regeln zur Vermeidung von, insbesondere tragsicherheitsrelevanten, Schäden zu beachten. In der Baupraxis aufgetretene Schäden deuten an, dass diese Regeln nicht ausreichend bekannt waren und sind, oder schlicht missachtet wurden und werden. Demnach besteht für bestehende Brettschichtholzkonstruktionen eine Notwendigkeit zur prophylaktischen Bauwerksuntersuchung hinsichtlich der Standsicherheit und einem eventuell bestehenden Sanierungsbedarf.

Ziel der Arbeit ist ein Beitrag zur Weiterentwicklung einer im Ansatz bestehenden Untersuchungsmethode zur Beurteilung von Brettschichtholzkonstruktionen im Bestand auf Basis einer minimal-invasiven Probenahme von Bohrkernen. Durch einen Vergleich von Versuchsdaten aus Belastungsversuchen an neuen und gealterten Brettschichtholzproben im großen und kleinen Maßstab sollen Zusammenhänge der Schub- und Scherfestigkeiten erkannt werden. Den in der Praxis gutachterlich tätigen Ingenieuren soll hiermit eine erweiterte Hilfestellung bei der Beurteilung bestehender Brettschichtholzkonstruktionen auf Basis von zerstörungsarmen Bauteilprüfungen bereitgestellt werden

2 Grundlagen

2.1 Literaturrecherche

In der ersten Phase des Projekts wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. Dabei wurden Publikationen im Hinblick auf folgende Bereiche recherchiert (Auszug):

- Die geschichtliche Entwicklung des Holzleimbau (Seraphin 2003; Halasz 1957; Klemm 1987)
- Die Untersuchungspraxis (Ingenieur Holzbau.de; Bayerisches Staatsministerium des Innern 2006; Fachkommission Bautechnik der Bauministerkonferenz (ARGEBAU), Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2013; Ehlbeck/Görlacher 1990; Steiger/Gehri 2010)
- Die relevanten Prüfmethoden (Blaß/Frese 2006; Künniger 2007; Diamantidis 2001; Gatternig 2012; Lavischi et al. 2001)
- Die Dauerhaftigkeit von Material und Konstruktionen (Raknes 1997; Kránitz et al. 2016; Schriever/Roffael 1987; Clad 1978; Özdemir 2009; Deppe 1986; Kolb/Frech 1978)
- Die Untersuchung der in der Praxis angewandten Untersuchungsmethoden von Bestands-Brettschichtholz (Dietsch et al. 2008; Winter/Kreuzinger 2008; Deppe 2000)

Im Folgenden wird auf ausgewählte Publikationen genauer eingegangen.

2.2 Alterung von Brettschichtholz

Bezüglich einer Änderung der reinen Festigkeitseigenschaften von Konstruktionsholz über seine Nutzungsdauer hinweg gibt es geteilte Meinungen. So wurde laut (Rug/Seemann 1989) zwar ein Festigkeitsabfall an Altholz erwartet, dieser konnte aber im Zuge von Belastungsversuchen an Bohrkernen nicht beobachtet werden. (Ehlbeck/Görlacher 1990) konnten aus Prüfungen an kleinen, fehlerfreien Proben keinen Unterschied der Druck-, Biege- und Scherfestigkeiten von altem Holz gegenüber neuem Holz nachweisen, verweisen jedoch auf die Notwendigkeit, Bauteile auch im Bestand einer „Sortierung nach der Tragfähigkeit“ zu unterziehen. Abgesehen von der Feststellung von Schäden infolge Pilz- oder Insektenbefall oder infolge Überlastungen könne erst nach einer weitergehenden, visuellen Untersuchung und Ermittlung weiterer Materialparameter wie Holzfeuchte, Rohdichte oder Elastizitätsmodul eine Aussage über die vorhandene Tragfähigkeit angestrebt werden. (Glos et al. 1987) stellten in Langzeit-Belastungsversuchen an Fichtenlamellen unter Zug- und Druckbeanspruchung einen deutlichen Einfluss der Belastungsdauer auf die Festigkeit fest, erwarten aber keine Festigkeitsminderung bei einer Beanspruchung bis maximal 50 % der Kurzzeitfestigkeit.

Mitte des 20. Jahrhunderts wurden im Holzleimbau noch überwiegend Harnstoffleime eingesetzt, deren generelle Eignung auch durch wissenschaftliche Untersuchungen propagiert wurde (Clad 1960; Egner/Kolb 1966). Jedoch wurde bereits auf negative Effekte durch hohe Umgebungsluftfeuchten hingewiesen. Weiterhin wurde in (Möhler/Steck 1980) gezeigt, dass in Brettschichtholzträgern bei Lagerung unter wechselnder Klimabeanspruchung Querspannungen an den Trägeraußenseiten oder im Trägerinneren entstehen, die auch die Verklebung belasten. Zusätzlich bewirkt die Lamellenverklebung eine Behinderung der spannungsfreien Querverformung durch Relaxation des Holzes, und bedingt folglich zusätzliche Spannungen.

In (Aicher 2013) wurde eine umfangreiche Bestandsaufnahme von mit Harnstoffharzverklebten Brettschichtholzbauteilen dokumentiert, und die Datengrundlage im Hinblick auf die Langzeitbeständigkeit und Sicherheit der Konstruktionen ausgewertet. Neben einer Zusammenstellung von bereits in der Vergangenheit durchgeführten Untersuchungen bzgl. des Langzeitverhaltens von harnstoffharzverklebten Holzbauteilen wurden auch relevante Prüfmethode beleuchtet und an neu verklebten Prüfkörpern angewendet. Hervorzuheben ist, dass Vergleiche von Versuchen an Bauteilen mit Harnstoffharzverklebung eine deutliche Abnahme der Scherfestigkeiten bei erhöhter Feuchtebeanspruchung zeigten. Auch wurde beschrieben, dass die Scherfestigkeiten von Bohrkernproben mit zunehmendem Alter der beprobten Gebäude abnahmen, was auf einen Alterungseffekt der Bauteile im Hinblick auf deren Festigkeit hindeutet.

2.3 Verklebung

Der Verbund der Lamellenlagen in Brettschichtholz wird durch eine vollflächige Verklebung der Lamellenbreitseiten hergestellt. Um einen ausreichenden Verbund zu gewährleisten, muss generell die Festigkeit dieser Verklebung auf mindestens dem gleichen Niveau wie die entsprechenden Festigkeiten des angrenzenden Holzes liegen. Bezüglich der Zug- und Druckscherfestigkeit wurde dies z.B. in (Bröker/Blaik 1986) versuchstechnisch an der Verklebung verschiedener Holzarten im klimatisierten Zustand, und unter Verwendung üblicher Klebstoffe, untersucht. Dabei wurden Festigkeiten in Höhe der Vollholzfestigkeiten erreicht.

Die Anforderungen an die Verklebung und einhergehende Prüfverfahren wurden im Laufe der Zeit fortgeschrieben (Kowaltschuk 1979). Der aktuelle Stand der Technik ist in (DIN EN 301:2013-12) in Verbindung mit der Normenreihe (DIN EN 302:2013-06) festgelegt.

2.4 Aktuelle Untersuchungspraxis

Eine Zusammenfassung von Methoden zur Untersuchung von bestehenden Holzkonstruktionen wurde im Zuge einer COST-action (Dietsch/Köhler 2010) erarbeitet. Neben der qualitativen Bestandsaufnahme und zerstörungsfreien Prüfmethode wurde auch

die Scherprüfung an Bohrkernproben als prinzipielle Möglichkeit zur Bestandsuntersuchung vorgestellt.

Aufgrund der Forderung nach einer minimalinvasiven Prüfung des Bestandstragwerks stellt die in der Praxis etablierte Scherprüfung an kleinformatigen Bohrkernproben eine Möglichkeit dar, quantitative Kennwerte von Brettschichtholzbauteilen zu gewinnen. Zur Bestimmung von Scherfestigkeiten aus Bereichen von Klebstoffugen wird dabei ein Verfahren aus (DIN EN 14080:2013-09) übernommen. Durch die Entnahme von Bohrkernen mit einem Durchmesser von üblicherweise 35 mm (Durchmesser Bohrloch 50 mm), und anschließendem Wiederverschließen des Bohrlochs mit einem fest eingeklebten Holzstopfen, kann von einer zerstörungsarmen Probennahme ausgegangen werden. Die Bohrkernproben werden am Bauteil so entnommen, dass jeweils eine Klebefuge in der Bohrkernachse liegt (Abbildung A- 1). Nach entsprechender Aufbereitung der Bohrkernproben (Anschnitt an zwei Flächen rechtwinklig zur Klebefuge und Aufteilung in kleinere Prüfkörperabschnitte entlang der Bohrkernachse) kann eine Scherkraft über die so entstandenen Belastungsflächen in eine rechteckige Scherfläche und in Faserrichtung des Holzes eingetragen werden (Abbildung A- 2). Vor der Belastungsprüfung sind die Prüfkörper gemäß Norm auf ihre Gleichgewichtsfeuchte unter Normklima ($T = 20 \pm 2 \text{ °C}$, rel. Luftfeuchte = $65 \pm 5 \%$) zu konditionieren. Zusätzlich ist nach erfolgter Scherprüfung an den versagten Scherflächen visuell der Holzfaserbruchanteil in Prozent zu bestimmen (Abbildung A- 3) .



Abbildung A- 1:
Bohrkernentnahme

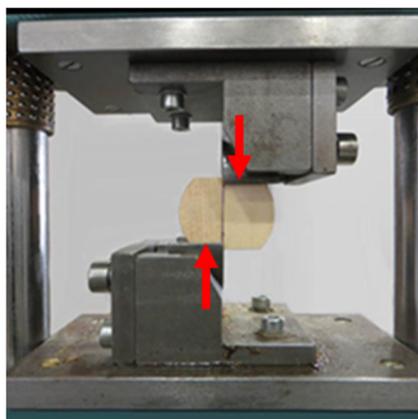


Abbildung A- 2: Scherprüfung

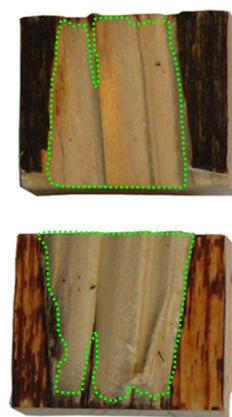


Abbildung A- 3:
Holzfaserbruchanteil

Aus der Höchstlast (Bruchlast) und der gemessenen Scherfläche wird die Scherfestigkeit in Versagensebene f_v ($= k_v \cdot F_{Bruch}/A$) berechnet.

Über einen Faktor k_v ($= 0,78 + 0,0044 \cdot \text{Dicke der Scherfläche}$) erfolgt eine Normierung bezüglich der verringerten Scherfläche im Vergleich zu Prüfkörpern aus Prüfstäben. Zur Feststellung der Integrität der Klebefuge müssen die Einzelwerte und der Mittelwert der Scherfestigkeit, abhängig vom aufgenommenen Holzfaserbruchanteil auf den Scherflächen, bestimmte Grenzwerte erfüllen, siehe Tabelle 2-1. Die Auswertung der quantitativen Prüfergebnisse resultiert somit in der qualitativen Aussage, das die Funktionalität der Verklebung als gegeben oder nicht gegeben angesehen werden kann.

Tabelle 2-1: Mindestwerte des Faserbruchanteils, bezogen auf die Scherfestigkeit f_v^a

Scherfestigkeit f_v , in N/mm ²	Mittelwert			Einzelwerte		
	6	8	$f_v \geq 11$	$4 \leq f_v < 6$	6	$f_v \geq 10$
Mindestwert des Faserbruchanteils, in % ^b	90	72	45	100	74	20

^a Zwischenwerte werden linear interpoliert.
^b Für Mittelwerte muss der Mindestwert des prozentualen Faserbruchanteils $144 - (9 \cdot f_v)$ betragen. Für Einzelwerte muss der Mindestwert des prozentualen Faserbruchanteils, bezogen auf die Scherfestigkeit $f_v \geq 6,0$ N/mm², $153,3 - (13,3 \cdot f_v)$ betragen.

(DIN EN 14080:2013-09)

Tabelle 2-1 wurde zur visuellen Veranschaulichung in eine graphische Darstellung überführt (Abbildung A- 4). Beispielhaft ist zusätzlich eine fiktive Serie einer Bohrkern-Scherprüfung dargestellt.

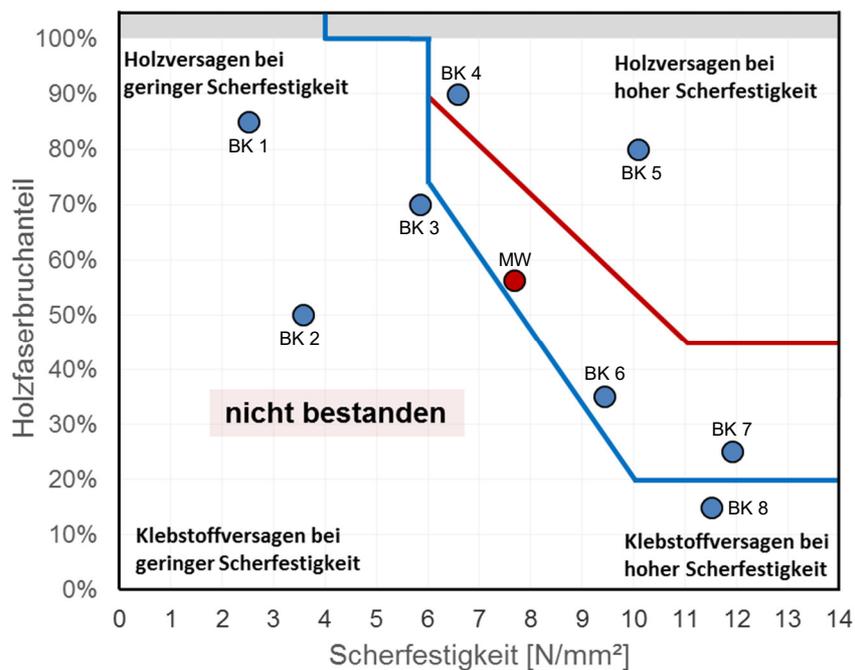


Abbildung A- 4: Graphische Interpretation des Scherprüfkörper-Bewertungsschemas in (DIN EN 14080:2013-09); beispielhafte Darstellung von Prüfergebnissen einer fiktiven Serie; blau: Einzelwerte (BK), rot: Mittelwert (MW)

Die in Abbildung A- 4 eingetragene, blaue Linie repräsentiert die Grenze zur Bewertung der Einzelergebnisse, die rote Linie die Grenze bzgl. des Mittelwerts der Prüfergebnisse. Gemäß Norm müssen zur positiven Beurteilung der Verklebung *alle* Einzelwerte die in Tabelle 2-1 gegebenen Mindestwerte überschreiten, also rechts der blauen Linie liegen. Gleichzeitig muss der Mittelwert ebenfalls rechts der roten Linie liegen.

2.5 Kritik an der bestehenden Bewertungsmethodik

2.5.1 Produktbezug

Die vorgestellte Prüfungs- und Bewertungsmethodik zur Feststellung der Integrität der Lamellenverklebung in Brettschichtholz ist in einer Produktnorm verankert. Diese legt die Leistungsanforderungen (unter anderem) für Brettschichtholz nach aktuellem Stand der Technik, und weiter die Mindestanforderungen an die Herstellung, fest. Die normativen Verweise beziehen sich auf die Erstprüfung eines herstellenden Betriebs bzw. auf die laufende, werkseigene Produktionskontrolle, und somit auf neu produziertes Brettschichtholz. An keiner Stelle der Norm wird Bezug auf Anforderungen oder eine Prüfung von Brettschichtholz im Bestand genommen.

2.5.2 Prüfeinrichtung

Die zu verwendende Prüfvorrichtung für die Bohrkern-Scherprüfung ist in (DIN EN 14080:2013-09) nur schematisch mittels einer Prinzipskizze dargestellt. Dies führt zu einer unterschiedlichen Umsetzung der Prüfvorrichtung an den durchführenden Instituten, die die Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander in Frage stellt. Ein Einfluss der Schervorrichtung auf die Prüfergebnisse wurde in (Muliyanto 2007; Steiger/Gehri 2007) untersucht und bestätigt. Insbesondere bei Kleinproben wie den hier verwendeten Bohrkernen wirken sich kleine Veränderungen an der Prüfung auf die Ergebnisse aus.

2.5.3 Probennahme

Für die Entnahme von Bohrkernen im Zuge der Beurteilung von Bestandstragwerken finden sich in den begleitenden Normen weder Hinweise zur notwendigen Anzahl der zu entnehmenden Bohrkern, noch auf mögliche Entnahmestellen. Diese Festlegungen werden, der jeweiligen Situation am zu untersuchenden Objekt entsprechend, vom durchführenden Ingenieur selbst getroffen. Somit ergeben sich durch die subjektiv bestimmte, und nicht einheitlich geregelte, Bohrkernentnahme am bestehenden Tragwerk Unsicherheiten bei der Bewertung. Auch das Entnahmewerkzeug ist nicht weiter definiert. (Feurerer 2009) konnte in seiner Versuchsreihe in Bezug auf die Bohrkern-Scherfestigkeit keinen signifikanten Unterschied zwischen drei verwendeten Bohrern einer Bauart (Scheibenschneider) mit unterschiedlicher Güte und Geometrie feststellen, jedoch variieren die zur Bohrkernentnahme verwendeten Werkzeuge und Vorrichtungen mitunter erheblich. (Gaspar et al. 2008) verwendete geschlossene Kernbohrer und empfiehlt die Verwendung von kürzeren und leichteren Bohrern aus dünnwandigem Material, um die Beeinflussung der Probe durch den Bohrprozess zu minimieren, und den Bohrprozess zu optimieren.

2.5.4 Probenkonfektionierung

Die Beschreibung des Zuschnitts der Bohrkernproben zu Scherprüfkörpern ist in (DIN EN 14080:2013-09) beschrieben. Die Geometrie der Bohrkern ist in einer Skizze veranschaulicht, die Länge wird mit einer Spanne von 50 mm bis 120 mm angegeben. Weiter sind die Bohrkern „an zwei Flächen rechtwinklig zur Klebfuge maschinell anzuschneiden, ...

und der Länge nach aufzuteilen, sodass die Prüfkörper rechteckige Scherflächen erhalten“. Diese Beschreibung lässt Raum zur Interpretation. Eine folglich an mehreren Instituten praktizierte Aufteilung des Bohrkerns in mehrere Prüfkörper wird nicht weiter spezifiziert. Auch ist ein geometrischer Bezug (Scherflächenvergleich) zu den in (DIN EN 14080:2013-09) ebenfalls definierten Abmessungen von Prüfstab-Scherprüfkörpern nicht klar ersichtlich.

2.5.5 Prüfkörperkonditionierung

Ein Einfluss der Holzfeuchte der Scherprüfkörper auf den Holzfaserbruchanteil konnte in (Feurerer 2009) nicht belegt werden. Im Gegensatz dazu konnten in seinen Versuchsreihen signifikante Auswirkungen auf die Bohrkern-Scherfestigkeit bei unterschiedlichen Holzfeuchten festgestellt werden. Innerhalb der Stichprobe ergab sich ein Scherfestigkeitsmaximum bei 11.3 % Holzfeuchtigkeit, während sich bei Ab- oder Zunahme der Holzfeuchtigkeit die Werte verringerten. Damit standen die Ergebnisse im Widerspruch zur in der Literatur beschriebenen Annahme einer Zunahme/Abnahme von Holzfestigkeiten bei unterschiedlichen Holz-Feuchtegehalten (Niemz/Sonderegger 2017).

Gemäß (DIN EN 14080:2013-09) sind die Prüfkörper vor der Belastung auf ihre Gleichgewichtsfeuchte zu konditionieren. Jedoch können die Holzfeuchten in aus dem Bestand entnommenen Proben zum Zeitpunkt der Entnahme stärker variieren als Proben aus neu produziertem Brettschichtholz mit bereits vorkonditionierten Lamellen. Zudem repräsentiert eine Prüfung von Proben mit dem in der Nutzung herrschenden Feuchteniveau mitunter besser den wahren Zustand des Materials in der Konstruktion. Durch eine Konditionierung der Proben um mehrere $\Delta\%$ -Holzfeuchte könnte die Klebefuge der Bohrkerns schon im Vorfeld der Scherbelastung durch induzierte Querkzugspannungen belastet, und so die Scherfestigkeit beeinflusst, werden. Dagegen spricht, dass Bauteile in Bestand oft eine nicht mehr nachvollziehbare Historie von klimatischen Schwankungen ihrer Umgebung, und damit auch wechselnde Holzfeuchten, erfahren haben, was den Einfluss einer Konditionierung relativiert.

2.5.6 Bestimmung des Holzfaserbruchanteils

Für die Bestimmung des Holzfaserbruchanteils gibt (DIN EN 14080:2013-09) keine Angaben zur Vorgehensweise, es wird lediglich die Angabe des Ergebnisses in Prozent, auf die nächste durch 5 teilbare Zahl, gefordert.

Eine rudimentäre Hilfestellung zur Bestimmung des Holzfaserbruchanteils findet sich in den Prüfverfahren für Klebstoffe für tragende Holzbauteile. In (DIN EN 302-2:2013-06), die ein Prüfverfahren zur Delaminierungsbeständigkeit von Klebefugen unter einer Klima- und Feuchtebelastung beschreibt, ist eine Öffnung in der Klebefuge, im übertragenen Sinn also ein Bruch mit Beteiligung der Klebstofffuge, dann als Delaminierung definiert, wenn ein Holzbruch ausschließlich innerhalb der ersten Zellschichten hinter der Klebstoffschicht auftritt, wobei der Verlauf des Bruches durch den Faserwinkel und den Aufbau der Jahresringe nicht beeinflusst wird. Dieser Holzbruch ist durch feine, wollige Holzfasern in der Grenzfläche zwischen dem Holzlaminat und der Klebstoffschicht gekennzeichnet. In wieweit sich diese

Definition allerdings auf einen Holzbruch bei einer Bohrkern-Scherprüfung übertragen lässt, ist aufgrund der prinzipiell unterschiedlichen Prüfverfahren fraglich.

In (DIN EN 302-1:2013-06) soll nach erfolgter Längszug-Scherprüfung der prozentuale Anteil an Holzaustriss auf der geprüften Klebstofffläche durch Sichtprüfung auf 10 % geschätzt, und in Folge als Mittelwert für jeweils zehn gültige Prüfergebnisse angegeben werden. Im Gegenzug zur Abstufung in 5% Schritten in (DIN EN 14080:2013-09) wird hier einer gewissen Ungenauigkeit bei der visuellen Bestimmung Rechnung getragen. Weitere Vorgehensweisen werden nicht angegeben.

Eine etwas konkretere Definition eines Holzbruchanteils bietet eine Norm zu Prüfverfahren bezüglich der Qualität der Verklebung von Sperrholz (DIN EN 314-1:1991-08-12). Im Anhang A werden Referenzabbildungen von Bruchflächen (schwarz-weiß in teilweise minderer Qualität) für eine vergleichende Bestimmung der Prüfkörper-Bruchflächen zur Verfügung gestellt. Es wird darauf hingewiesen, dass nur Bruchflächen mit braunem Klebstoff dargestellt sind (ein Hinweis darauf, dass eine Bestimmung bei hellem Klebstoff nur mit größeren Ungenauigkeiten durchführbar ist). Der Holzbruchanteil soll, *wenn möglich* in 5%-Schritten, mindestens auf 10% genau, bestimmt werden. Auch soll ein Holzfaserbelag auf den Bruchflächen in Form von sehr feinen Fasern (erkennbar weitgehend nur unter Verwendung einer 10-fachen visuellen Vergrößerung), sowie größere Faserverbände, berücksichtigt werden. Die Beschreibung schließt mit dem Hinweis: „Die Bestimmung des Holzbruchanteils ist subjektiv und muss geübt werden. Obwohl geschulte und erfahrene Prüfer zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse erhalten, können zwischen verschiedenen Prüfern und Labors Unterschiede auftreten.“ (DIN EN 314-1:1991-08-12).

(Feurerer 2009) ließ vier „in der Holzfaserbruchanteil-Bestimmung geübte Personen“, und drei „Laien“, den Holzfaserbruch an jeweils sieben Bohrkern-Scherprüfkörpern aus zwei Serien mit unterschiedlichen Klebstoffen (Resorzin-Formaldehyd-Harz und Melamin-Formaldehyd-Harz) bestimmen. Aufgrund der dunklen Färbung waren die Variationskoeffizienten bei der Verklebung mit Resorzin-Formaldehyd-Harz etwas geringer als bei einer Verklebung mit Melaminharz. Jedoch wichen die von den einzelnen Prüfern bestimmten Werte der Holzfaserbruchanteile in beiden Serien oftmals um mehr als 50 % voneinander ab.

In einem in Kanada durchgeführten Ringversuch zwischen neun Laboratorien mit zwölf fachkundigen Mitarbeitern variierte die Bestimmung des Holzfaserbruchanteils an Blockscher-Prüfkörpern mit rotem Klebstoff zwischen 20 % und 100 %. Aus diesem Grund äußerten (Yang et al. 2008) Bedenken, den durch Personen visuell bestimmten, quantitativen Wert des Holzfaserbruchanteils bei der Bewertung der Qualität einer Holzverklebung heranzuziehen.

2.5.7 Normierung der Scherhöhe

Aufgrund der Abmessungen der Bohrkern von 35 mm, und folglich einer Scherhöhe von etwa 26 mm, wird in (DIN EN 14080:2013-09) die Bohrkern-Scherfestigkeit über einen Faktor k_v auf eine Scherhöhe von 50 mm (Prüfstabmaß) normiert. Ein Einfluss der Scherhöhe auf die Scherfestigkeit wurde in (Feurerer 2009) untersucht und bestätigt, wenn auch auf einem etwas geringeren Niveau als in (DIN EN 14080:2013-09) durch k_v realisiert. Parallel dazu wurde in

einer weiteren Abschlussarbeit (Mulyanto 2007) eine rechnerische Analyse der Spannungszustände bei der Scherprüfung an Bohrkernen abgehandelt. Es ergaben sich Spannungsspitzen und Einflüsse aus Querspannungen auf die Ergebnisse, und zwar abhängig von der Scherhöhe. Die Scherbreite hingegen wurde als Einflussfaktor auf die Ergebnisse als vernachlässigbar angesehen.

Ein größerer Bohrkern Durchmesser von 60 mm wurde auf Basis von Untersuchungen in (Koller 2007) vorgeschlagen. Damit ließe sich die rechnerische Normierung aufgrund der geringen Scherhöhe bei Bohrkernen mit 35 mm Durchmesser umgehen. Das größere, dazu notwendige, Bohrloch würde jedoch einen erheblich größeren Eingriff in das Bestandsbauwerk darstellen.

2.6 Empfehlungen aus bisherigen Betrachtungen der Untersuchungsmethodik

Auf Basis ihrer Untersuchungen äußerten (Tannert et al. 2012) Kritik an der Praxis, von kleinformatischen Bohrkern-Scherprüfungen an Klebefugen auf die globale Leistungsfähigkeit von Brettschichtholz zu schließen. Die gewonnenen Informationen seien durch die punktuelle Probennahme lokal beschränkt und erfassen mitunter nicht die hohe Streuung zwischen unterschiedlichen Klebefugen eines Bauteils. Die Verwendung der Bohrkern-Scherprüfung zur Bestimmung eines Bauteilwiderstandes sei nicht möglich, da, nach Auswertung von Versuchsergebnissen aus Biege-, Schub und Bohrkern-Scherprüfungen an gleichem Probenmaterial, die Scherfestigkeiten der Bohrkern nicht mit der Schubfestigkeit des Bauteils korrelierte. Folglich könne von den Ergebnissen aus Bohrkern-Scherprüfungen an Bestandsbauteilen nicht auf Rest-Festigkeitswerte der untersuchten Brettschichtholz-Bauteile geschlossen werden. An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass die im Biegeversuch geprüften Brettschichtholz-Einfeldträger durch Biegezugbrüche versagten, und keiner der Versuchskörper ein Schubversagen zeigte.

(Rug et al. 2013) kommen im Zuge Ihrer Untersuchungen und Prüfungen von historischen Brettschichtholz zu dem Schluss, dass es nicht ratsam wäre, die aktuell angewandte, normative Bewertungsmethodik (DIN EN 386:2002-04) für eine Beurteilung von historischen Brettschichtholzkonstruktionen mit Kaseinverklebung heranzuziehen, da sich nach Aussage der Autoren die hierin aufgeführten Leistungs- und Mindestanforderungen auf moderne kunstharzbasierende Klebstoffsysteme bezögen.

Neben der bereits genannten Scherprüfung an Prüfstäben bzw. Bohrkernen zur Qualitätsprüfung von Klebstoffugen im Zuge einer Erstprüfung oder werkseigenen Produktionskontrolle kann alternativ eine Delaminierungsprüfung durchgeführt werden. Die beschränkte Praxistauglichkeit der Delaminierungsprüfung aufgrund des hohen Aufwandes bei der Durchführung wurde in (Scharmacher 2011) geschildert. Zudem erschweren Randspannungseinflüsse bei einer geringen Probengröße die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Die Scherprüfung wird generell als geeignet für die Bestandsuntersuchung

angesehen, wobei weitere Untersuchungen bzgl. alternativer Prüfkörpergeometrien und Ursachen der relativ hohen Streuungen der Prüfergebnisse angeregt werden.

Um die Ungenauigkeit bei der Aufnahme des Holzfaserbruchanteils zu reduzieren, wurden seit einigen Jahren die Möglichkeiten der digitalen Bildanalysetechnik sondiert. Auf der Basis von vorangegangenen Erprobungen mit Bildanalysetechnik wurde in (Yang et al. 2008) ein Algorithmus zur digitalen Einordnung von grauschattierten Bildaufnahmen an Scherflächen entwickelt, der den Mittelwert einer visuellen Beurteilung besser repräsentierte und geringere Streuungen aufwies. Vergleichbar dazu wurde von (Künniger 2008) eine halbautomatische Methode zur Bestimmung des Holzfaserbruchanteils entworfen und aufgrund der höheren Objektivität im Vergleich zur visuellen Beurteilung für die Anwendung in Industrie und Forschung empfohlen.

3 Versuchsprogramm

3.1 Allgemeines

Für das vorliegende Forschungsvorhaben wurde ein Versuchsprogramm mit groß- und kleinformatischen Versuchs- und Prüfkörpern aus Brettschichtholz entworfen, mit dem Ziel, einen Vergleich zwischen der Schubfestigkeit des Materials unter einer realen Biegebeanspruchung, und Schub- bzw. Scherfestigkeiten unter einer Beanspruchung von lokalen Bereichen des Holzes und der Klebefugen, zu ermöglichen.

Dazu wurden an vergleichbarem Probenmaterial insgesamt 19 großformatige 3-Punkt-Biege-Schubversuche, 201 Schubversuche nach DIN EN 408, und 344 Bohrkern-Scherversuche nach DIN EN 14080, Anhang D, durchgeführt.

3.2 Herkunft des Probenmaterials

3.2.1 Bestandsprobe „Bad Kissingen“

Eine Bestandsprobe stammte aus einer im Jahr 1974 errichteten Eissporthalle in Bad Kissingen, die aufgrund akuter Einsturzgefahr im Jahr 2005 rückgebaut wurde (Abbildung A-5). Die Hauptträger des Dachtragwerks bestanden aus ca. 41 m langen, 2,2 m hohen und 220 mm breiten Fichten-Brettschichtholz-Vollquerschnitten aus harnstoffharzverklebten Lamellen. Im Laufe der Lebenszeit wurden am Bauwerk mehrere Veränderungen vorgenommen. So wurde im Jahr 1989 eine Fassade ergänzt, was die klimatischen Verhältnisse veränderte. Im Jahr 2004 wurde eine Dachbegrünung aufgebracht.

Zum Zeitpunkt des Rückbaus wurden im Zuge der damaligen Schadensaufnahme teilweise sehr tiefe Risse beobachtet, die ungünstigen, klimatischen Belastungen zugerechnet wurden. Weiterhin wurden aufgrund einer undichten Dachhaut bereichsweise extreme Durchfeuchtungen des Materials und stellenweiser Pilzbefall verzeichnet. Diese Informationen entstammen einem, zum damaligen Zeitpunkt durch den Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TU München angefertigten, Protokoll.

Im Zuge des Rückbaus wurde im Jahr 2005 ein noch intaktes, jedoch mit erheblicher Rissbildung gezeichnetes, Trägersegment von 7,6 m Länge und vollen Querschnittsabmessungen zur weiteren Untersuchung in das Labor des Materialprüfungsamtes für das Bauwesen der Technischen Universität München (MPA BAU, TUM) überbracht. Zu Transportzwecken wurde die Probe zum damaligen Zeitpunkt auf etwa halber Höhe halbiert (unteres Teilstück siehe Abbildung A-6). Der Querschnitt bestand aus Lamellen mit einer Stärke von 30 mm, in die, verteilt über die Lamellenbreite, zwei 4 mm breite und ca. 10 mm tiefe Entlastungsnuten eingesägt waren. In Trägerlängsrichtung waren einzelne Lamellen durch Keilzinkung verbunden, die Verbindungsstellen waren versetzt. Aus einer oberflächlichen, visuellen Begutachtung wurde die Qualität der Lamellen in Richtung einer

Sortierklasse S 10 geschätzt. Genauere Angaben zur Lamellengüte aus z.B. einem Leimbuch waren nicht verfügbar.

Durch die bis zu den aktuellen Versuchen verstrichene, lange Lagerzeit von mehr als 10 Jahren unter im Labor herrschendem, konstanten Klima (22 °C, 55 % rel. LF) wurde davon ausgegangen, dass sich eine über den gesamten Querschnitt gleichmäßige Holzfeuchte im Bereich einer Holz-Ausgleichsfeuchte von 10 % eingestellt hatte. Diese Annahme wurde durch Messungen an über die Querschnittsbreite verteilte Darrproben bestätigt, siehe Abschnitt 3.6.5.



Abbildung A- 5: Eissporthalle Bad Kissingen – Herkunft Bestandsprobe



Abbildung A- 6: Bestandsprobe Bad Kissingen

In Folge sind alle in Bezug zur Bestandsprobe „Bad Kissingen“ stehenden Versuchsserien, Versuchskörper, Prüfkörper, und die zugehörigen Auswertungen an dem Kurzzeichen „K“ zuordenbar.

3.2.2 Bestandsprobe Oktoberfest

Eine weitere Bestandsprobe entstammte dem Tragwerk eines jährlich temporär aufgebauten Festzeltes des Münchner Oktoberfestes. Nach viermaligem Einsatz wurde eine Probe aus dem Tragwerk entnommen und unter Laborklimabedingungen über einen Zeitraum von mindestens fünf Jahren eingelagert, sodass von einer gleichmäßigen Holzfeuchteverteilung

über den Querschnitt ausgegangen wurde. Diese Annahme wurde ebenfalls durch nachfolgende Messungen bestätigt, siehe Abschnitt 3.6.5.

Die unbearbeitete Probe hatte eine Länge von ca. 7 m, eine Breite von 200 mm und eine über die Länge veränderliche Höhe von ca. 510 mm bis 680 mm. Die Lamellen hatten eine Dicke von 40 mm, und waren in Trägerlängsrichtung durch Keilzinkung verbunden, die Verbindungsstellen waren versetzt.

Im Vergleich zur Bestandsprobe K beschränkte sich die Rissbildung bei der Bestandsprobe O auf einzelne Lamellen und einzelne Delaminierungen von Lamellenfugen, und nur auf eine der beiden Trägerseiten. Es ist nicht bekannt, dass sich das Tragwerk des Festzeltes zum Zeitpunkt der Probennahme bezüglich seiner Tragsicherheit in einem kritischen Zustand befand.

In Folge sind alle in Bezug zur Bestandsprobe „Oktoberfest“ stehenden Versuchsserien, Versuchskörper, Prüfkörper und die zugehörigen Auswertungen an dem Kurzzeichen „O“ zuordenbar.

3.2.3 Probe Referenz

Eine Referenzprobe, bestehend aus neun neu produziertem Fichten-Brettschichtholzabschnitten, wurden von der Fa. Binder zur Verfügung gestellt. Die Abschnitte wurden der laufenden Brettschichtholzproduktion entnommen, und hatten identische Maße von $l = 3,5 \text{ m} \times b = 200 \text{ mm} \times h = 400 \text{ mm}$. Die Güte der Lamellen (Sortierklasse, T-Klassen) mit einer Stärke von 40 mm variierte über die Querschnittshöhe. Abgesehen von einer bei allen Abschnitten einheitlichen Lamellenklasse T22 der jeweiligen zwei Randlamellen oben und unten waren bei jeweils drei Abschnitten Lamellen der Güte T11 (entspricht C12), T14 (entspricht C24) und T22 (entspricht mindestens C35) verbaut. Die Lamellenverklebung wurde nach heutigem Stand der Technik mit einem Melamin-Harnstoff-Formalaldehyd-Harz ausgeführt. Durch die produktionsbedingte Konditionierung des Lamellenmaterials konnte von einer gleichmäßigen Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt ausgegangen werden. Diese Annahme wurde ebenfalls durch nachfolgende Messungen bestätigt, siehe Abschnitt 3.6.5. Oberflächliche Fehlstellen waren im Werk durch ca. 5 mm starke Einleger kaschiert worden, was für die folgenden Prüfungen jedoch als unkritisch angesehen wurde.

In Folge sind alle in Bezug zur Probe „Referenz“ stehenden Versuchsserien, Versuchskörper, Prüfkörper und die zugehörigen Auswertungen an dem Kurzzeichen „R“ zuordenbar.

3.3 Konfektionierung und Bezeichnung der Proben

Die Bestandsproben wurden zunächst in weitere Teilproben, im Hinblick auf die späteren Maße der Biege-Schubversuchskörper, zerlegt. Hier wurde bereits ein Verhältnis von Länge : Höhe = 6 : 1 der späteren Versuchskörper angestrebt, welches sich bei in der Vergangenheit durchgeführten Biege-Schubversuchen als günstig erwies (Schickhofer 2001). Vorab wurden aus der Probe der Eishalle Bad Kissingen einige Nägel und Holzschrauben

entfernt, die ursprünglich am unteren Trägerrand, vermutlich zur Querkzugverstärkung, eingebaut worden waren. Diese durch die Verstärkungselemente beeinflussten Bereiche wurden beim Abbund der Teilproben berücksichtigt und waren in Folge nicht in den Versuchs- und Prüfkörpern enthalten. Zur Egalisierung der Oberflächen und Verbesserung der Sichtbarkeit von Vorschädigungen wurden von den Proben-Seitenflächen in einem Schleifautomaten ca. 2 mm Material abgenommen. Die einseitig nicht rechtwinklig zu den Trägerachsen liegenden Endflächen wurden nicht abgekappt, da diese Enden planmäßig nicht im Prüfbereich der Teilproben lagen.

Um im weiteren Verlauf des Prüfprogramms sämtliche Teilproben bzw. Versuchs- und Prüfkörper eindeutig zuweisen zu können, wurden sie gemäß ihrer Herkunft in drei Serien eingruppiert:

- Serie „K“ mit den Teilproben **K-I bis K-VIII** aus der Eishalle Bad Kissingen
- Serie „O“ mit den Teilproben **O-I bis O-II** aus dem Oktoberfestzelt
- Serie „R“ mit den Teilproben **R-I bis R-IX** aus der Produktion der Fa. Binder

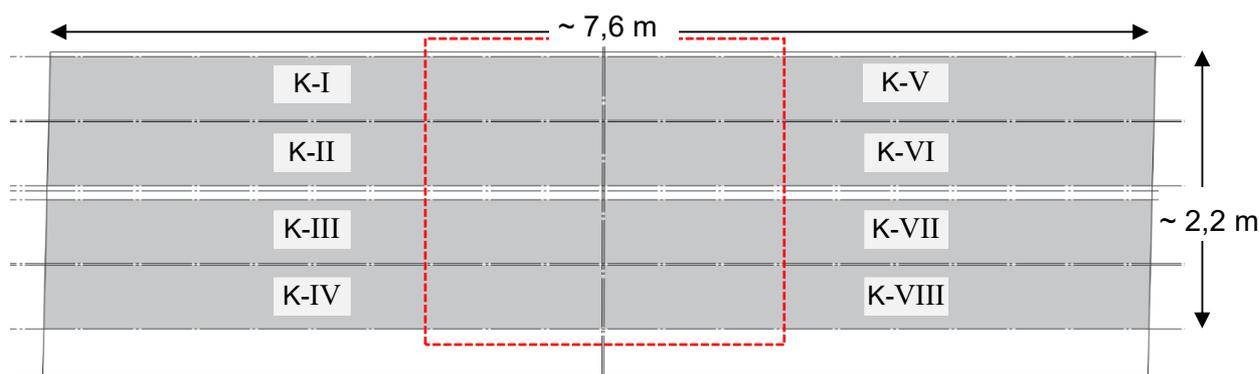


Abbildung A- 7: Zuschnitt der Probe „Eishalle Bad Kissingen“; Die rote Markierung kennzeichnet den Bereich des planmäßigen Schubversagens.

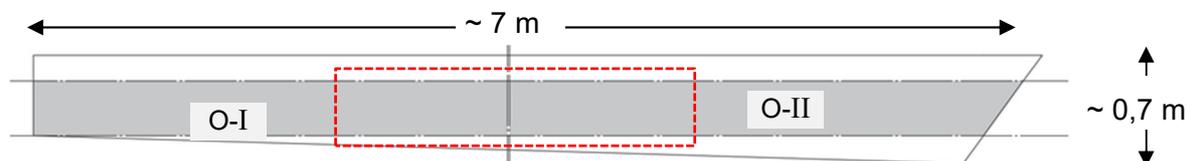


Abbildung A- 8: Zuschnitt der Probe „Oktoberfestzelt“; Die rote Markierung kennzeichnet den Bereich des planmäßigen Schubversagens.

Bedingt durch den Abbund wurden die Randlamellen angeschnitten, sodass diese Lamellen von der nominellen Lamellendicke abwichen. Dies wurde im weiteren Verlauf der Versuchsdurchführungen und Auswertungen nicht weiter berücksichtigt, da kein relevanter Einfluss auf die zu prüfenden Schubeigenschaften erwartet wurde. Ein gegebenenfalls

geringer Effekt auf die Biegeeigenschaften wurde vernachlässigt, da diese nicht Ziel der Untersuchungen waren.

Die Teilproben aus neuem Brettschichtholz der Serie R orientierten sich mit ihren Abmessungen an den Bestands-Teilproben der Serie K. Sie wurden mit einer Länge von 3500 mm angeliefert, somit konnte jeweils ein Endstück von 300 mm Länge abgetrennt werden, aus dem in Folge die weiteren Kleinproben für die Schub- und Scherversuche in der Nachbarschaft des globalen Versagens gewonnen werden konnten.

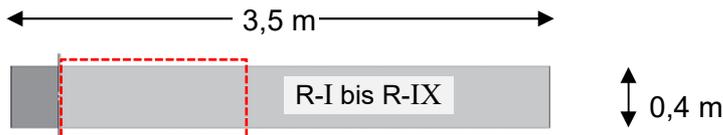


Abbildung A- 9: Zuschnitt der Proben „Referenz“ R-I bis R-IX; Die rote Markierung kennzeichnet den Bereich des planmäßigen Schubversagens. Links: abgetrenntes Endstück (dunkelgrau)

Die Maße aller Teilproben der drei Serien können Tabelle 3-1 entnommen werden.

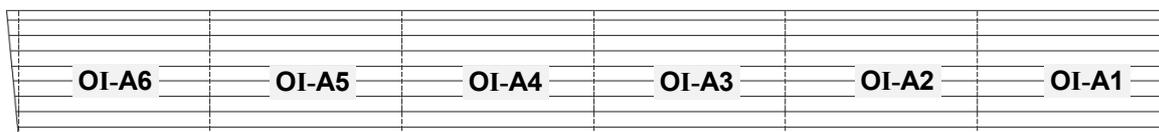
Tabelle 3-1: Dimensionen der Teilproben aller drei Serien

	Teilprobe	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Lamellenstärke [mm]
Serie K	K-I	3580	215	424	30
	K-II	3590	215	424	
	K-III	3600	215	424	
	K-IV	3610	215	424	
	K-V	3560	215	424	
	K-VI	3550	215	424	
	K-VII	3540	215	424	
	K-VIII	3530	215	424	
Serie O	O-I	3050	195	345	40
	O-II	3125	195	345	
Serie R	R-I	3200	200	400	40
	R-II	3200	200	400	
	R-III	3200	200	400	
	R-IV	3200	200	400	
	R-V	3200	200	400	
	R-VI	3200	200	400	
	R-VII	3200	200	400	
	R-VIII	3200	200	400	
	R-IX	3200	200	400	

Um im weiteren Verlauf des Prüfprogramms sämtliche lokalen Stellen an den einzelnen Teilproben eindeutig ausweisen zu können, wurden die beiden Seitenflächen jeder Teilprobe mit **A** und **B** benannt, und jede Seitenfläche in Abschnitte von je 500 mm mit der Bezifferung **1** bis maximal **8** eingeteilt. Innerhalb einer Teilprobe lagen sich korrespondierend bezifferte Abschnitte gegenüber. Abbildung A- 10 verdeutlicht die Vorgehensweise. Zur weiteren,

visuellen Orientierung wurden die Abschnitte durch vertikale Linien im Abstand von 50 mm unterteilt.

Teilprobe OI, Seite A



Teilprobe OI, Seite B

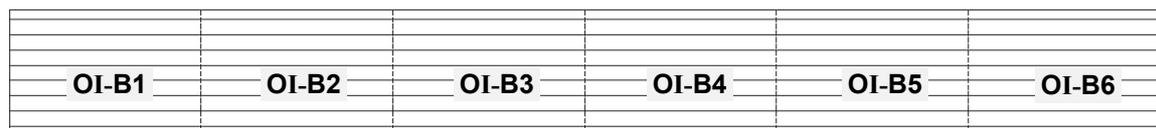


Abbildung A- 10: Benennung der Seiten und Abschnitte der Teilproben (am Beispiel Teilprobe O-I)

3.4 Dokumentation der Vorschädigung der Proben

Um nach erfolgten, zerstörenden Prüfungen den Einfluss der vorherig bestehenden Lamellenrisse und Delaminierungen der Klebefugen der Bestandsproben untersuchen zu können, wurden diese in ihrer Lage und Tiefe vermessen.

Zur Rissvermessung wurde eine Messeinrichtung aus einem induktiven Wegaufnehmer und einem Seilzugwegaufnehmer verwendet. Für jeden bestehenden Riss bzw. für jede offene Fuge wurde die Lage in jedem Abschnitt an beiden Seiten der Teilproben, und die Tiefe, aufgenommen. Der Vorgang wird in Abbildung A- 11 verdeutlicht.

Die Risstiefe wurde durch Einschub eines an der Tastspitze des induktiven Wegaufnehmers angebrachten Blattes einer Fühlerlehre ($d = 0,15 \text{ mm}$) gemessen. Falls die Risstiefe den Messbereich des Wegaufnehmers überschritten ($> 50 \text{ mm}$), wurden die Aufnahme der Tiefe händisch durch Einschub eines längeren Fühlerblattes ergänzt. Hierbei ist anzumerken, dass der Messwert immer die Mindesttiefe des jeweiligen Risses angibt, da bei einem vertikalen Abwandern des Risses innerhalb des Querschnitts, insbesondere bei Rissen innerhalb von Lamellen, das Fühlerblatt nicht bis zur maximalen Risstiefe eindringen konnte. Zur Bestimmung der Lage der Risse in Teilproben-Längsrichtung wurde in jedem Abschnitt bei jeder Tiefenmessung die horizontale Distanz vom Messpunkt zum Anfang des Abschnitts (0 – 500 mm) mittels eines gekoppelten Seilzugwegaufnehmers aufgenommen. Die Messpunkte hatten einen Abstand von ca. 1 – 2 cm.

Alle Lamellenlängsstöße durch Keilzinkung wurden auf der Oberfläche markiert.

Im Zuge der Rissaufnahme wurden die Lamellen und Fugen der Teilproben bezeichnet. Dabei startete die Zählweise am oberen Probenrand, mit der Bezeichnung L1 für die oberste Lamelle, entsprechend F2 für die oberste Klebefuge.



Abbildung A- 11: Messeinrichtung zur Rissaufnahme

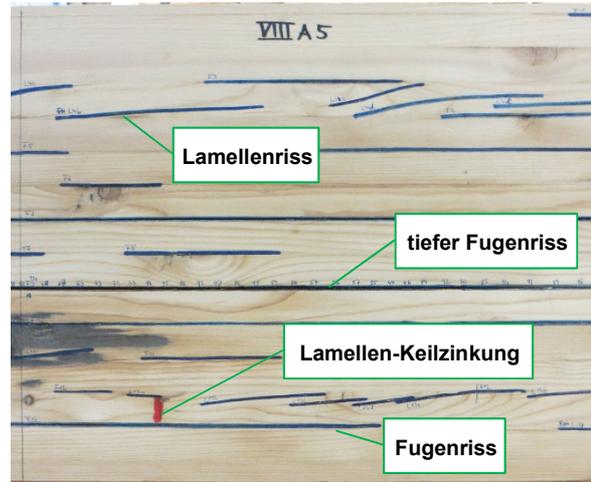


Abbildung A- 12: Aufnahme eines Messfeldes (am Beispiel KVIII, Abschnitt 5, Seite A)

Abbildung A- 13 zeigt eine Auswertung der Messdaten der Risstiefenmessung für eine Fugenebene in einem Abschnitt einer Teilprobe.

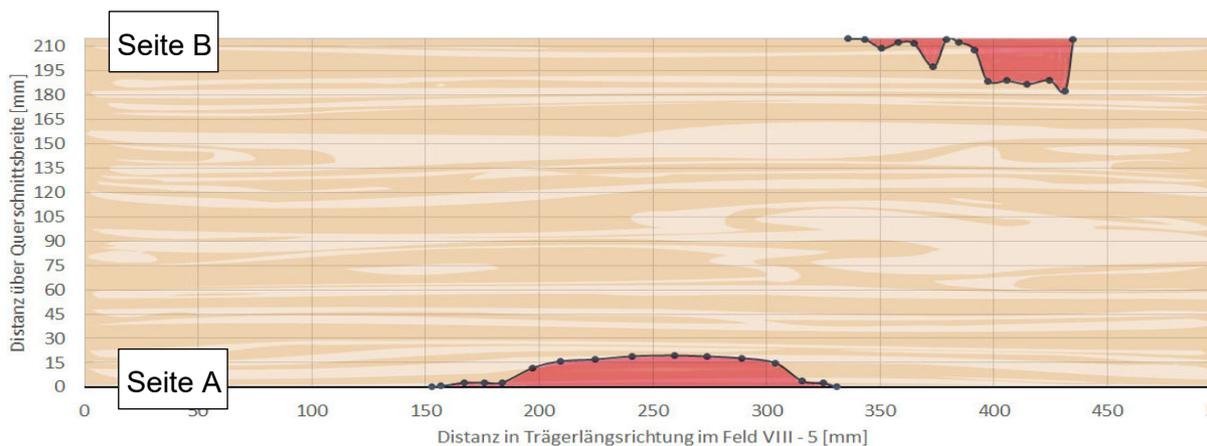


Abbildung A- 13: Auswertung der Messdaten aus der Rissaufnahme, Horizontalschnitt der Teilprobe (am Beispiel K-III, Messfeld 5, Klebefuge in Fuge F3)

3.5 Dreipunkt-Biege-Schubversuche

3.5.1 Allgemeines

Ziel dieser Versuchsreihe war es, den Schubwiderstand der Versuchskörper unter einer realitätsnahen Biegebelastung zu ermitteln. Gewählt wurde ein Aufbau als 3-Punkt-Biegeversuch, die Spannweite wurde im ersten Schritt, abhängig vom verfügbaren Probenmaterial, auf ca. 3 m abgeschätzt. Im Zuge von Vorberechnungen der zu erwartenden Biegezug- und Schubspannungen wurden die Maße der Versuchskörper sowie die Versuchskonfiguration weiter konkretisiert.

Aufgrund des Verhältnisses von Lamellen-Zugfestigkeit zu Lamellen-/Klebefugen-Schubfestigkeit, und unter Voraussetzung eines üblichen Verhältnisses von Spannweite zu Trägerhöhe, dominiert bei einem auf Biegung belasteten Brettschichtholzträger das Biege-Zugversagen, bevor sich ein Schubversagen einstellt. Unter Einbezug der Betrachtungen in (Lackner 2011b) wurden zur Provokation eines Schubversagens Versuchskörper mit einem verstärkten Zug- und Druckbereich entworfen. Eine Möglichkeit der Verstärkung besteht durch Aufkleben von Hartholzlamellen mit höheren Zug- und Druckfestigkeiten. Ein Furnierschichtholzprodukt aus Buche bietet sich aufgrund seiner Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften bei vertretbarem Materialaufwand, und seiner guten Verklebbarkeit mit dem Probenmaterial, an. Die Firma Pollmeier unterstütze hier das Projekt mit seinem Produkt.

Nach dem Aufkleben der Verstärkungslamellen erfolgte die Biegebelastung der Versuchskörper bis zum Schubversagen.

3.5.2 Vorberechnungen

Ziel der Berechnungen war es, durch Anpassung der geometrischen Abmessungen des Versuchsaufbaus, im Querschnitt des Trägers eine Schubspannung größer der angenommenen Schubfestigkeit zu erreichen, und gleichzeitig die maximalen Biegezugspannungen auf das Niveau der charakteristischen Biegefestigkeiten des Probenmaterials bzw. der Verstärkungslamellen zu begrenzen. Gleichzeitig sollte jedoch der Charakter einer Biegebelastung nicht durch einen zu gedrunenen Aufbau (Verhältnis Spannweite zu Höhe $l/h < 5$) gestört werden.

Als geometrische Eingangsgrößen für die Berechnung dienten Länge, Höhe und Breite der Brettschichtholz-Proben der einzelnen Serien. Im Fall von randnahen Delaminierungen in den Klebstoffugen bei den Bestandsproben berücksichtigte die Berechnung eine verminderte Breite des Querschnitts. Die charakteristischen Biegefestigkeits- und Steifigkeitseigenschaften wurden aus den aktuellen Normen entnommen. Für das Probenmaterial der Bestandsproben wurde aufgrund einer Abschätzung der Sortierklasse an den sichtbaren Lamellenoberflächen von S10 eine Lamellenbiegefestigkeit von $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$ und ein Elastizitätsmodul $E_0 = 11.000 \text{ N/mm}^2$ angesetzt. Unter Kenntnis der Sortierung der Randlamellen des Referenzprobenmaterials in Klasse T22 konnte hier mit einer höheren Lamellenbiegefestigkeit von $f_{m,k} = 30,5 \text{ N/mm}^2$ gerechnet werden, der E-Modul wurde einheitlich mit 11.000 N/mm^2 angenommen. Die Biegezugfestigkeit des Materials der Verstärkungslamellen wurde aus (Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-838) mit $f_{m,0,flatt,k} = 80 \text{ N/mm}^2$ entnommen, sowie $E_0 = 16.800 \text{ N/mm}^2$.

Die Schubfestigkeit des Probenmaterial wurde, abweichend vom normativen Wert, mit einem in (Brandner et al. 2012) vorgestellten Ansatz, und in Abhängigkeit der schubbeanspruchten Fläche, errechnet. Hier wurde im Gegensatz zu den auf 5%-Quantilniveau angesetzten Biegefestigkeiten der Mittelwert auf das 95%-Quantilniveau erhöht. Durch den somit hoch angesetzten Wert der Schubfestigkeit im Gegensatz zu den niedrig angesetzten Werten für

die Biegefestigkeit wurde die Wahrscheinlichkeit für ein Schubversagen des Probenmaterials erhöht.

Eine Variable in der Berechnung war die Dicke der oben und unten angeordneten Verstärkungslamellen, weiterhin die Spannweiten (\leq Trägerlänge) der Biegeversuche in den einzelnen Serien.

Die Berechnungsmethodik entsprach dem Gamma-Verfahren bzw. dem Verfahren nach (DIN EN 1995-1-1) für zusammengesetzte Querschnitte. Unter der Annahme einer schubstarrten Verbindung in den Klebefugen zwischen dem Probenmaterial und den Verstärkungslamellen wurde ein effektiver E-Modul und effektives, statisches Moment, abhängig von der Dicke der Verstärkungslamellen, berechnet. Im Zuge eines iterativen Vorgangs ergab sich eine geeignete Lamellendicke von 40 mm, weiter die Versuchslast, und folglich die Biegezugspannungen und Biege-Schubspannungen im Querschnitt.

Die Berechnungen zeigten, dass ein bezüglich seiner Spannweite symmetrisch aufgebauter 3-Punkt-Biegeversuch unter den gegebenen Randbedingungen nicht verlässlich zu einem Schubversagen führt. Als kritisch erwies sich die Überschreitung der Biegezugfestigkeit der Randlamellen im Probenquerschnitt. Daher wurde das Verhältnis von Lastangriffspunkt der Einzellast zur Spannweite von 0,5 auf 0,33 reduziert, um einseitig eine Querkrafterhöhung zu erreichen, und gleichzeitig die Biegezugspannungen auf einem unkritischen Niveau zu halten. Ein positiver Nebeneffekt war die Erhöhung der Wahrscheinlichkeit des Schubversagens auf einer Seite (in Folge als Prüfbereich bezeichnet), was Vorteile bzgl. der visuellen Beobachtung bei der späteren Versuchsdurchführung versprach.

Mittels einer Finite-Element-Simulation (FEM-Programms ANSYS) wurde der Versuchsaufbau nachgerechnet, um die Ergebnisse der analytischen Vorberechnung zu validieren. Das Modell wurde aus dreidimensionalen, 8-knotigen Volumenelementen SOLID 185 aufgebaut, welchen ein orthotropes Materialverhalten von Brettschichtholz bzw. Furnierschichtholz zugewiesen wurde. Die Klebefuge wurde als ideal starr angenommen. Die Berechnungen erfolgten ausschließlich im linear elastischen Bereich.

Die zugrundeliegenden Steifigkeitseigenschaften der Brettschichtholzproben orientierten sich an den in (DIN EN 14080:2013-09) angegebenen Werten für GL 24h:

$$E_{0,mean} = 11500 \text{ N/mm}^2, \quad E_{90,mean} = 300 \text{ N/mm}^2, \quad G_{mean} = 650 \text{ N/mm}^2; \quad G_{r,mean} = 65 \text{ N/mm}^2$$

Die zugrundeliegenden Steifigkeitseigenschaften der Lasteinleitungsplatten aus Furnierschichtholz wurden aus (Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-838) entnommen:

$$E_{0,mean} = 16800 \text{ N/mm}^2, \quad E_{90,mean} = 470 \text{ N/mm}^2, \quad G_{mean} = 850 \text{ N/mm}^2 = G_{r,mean} \text{ (explizit kein Wert angegeben)}$$

Die Querkontraktionszahlen für das Probenmaterial wurden auf Grundlage der Werte für Fichte von (Niemz 1993) zu $v_{\text{parallel-quer}} = v_{\text{quer-parallel}} = 0,016$ und $v_{\text{quer-quer}} = 0,33$ gewählt. Da für Buchen-Furnierschichtholz keine Werte vorlagen, wurden an dieser Stelle die Werte für Fichte

übernommen. Der Einfluss der Querkontraktionszahlen spielte im Laufe der angestrebten Berechnungen bei der Ergebnisfindung eine untergeordnete Rolle.

Die Spannungen lagen etwas unter dem Niveau der analytischen Berechnung, generell wurden die Ergebnisse jedoch bestätigt.

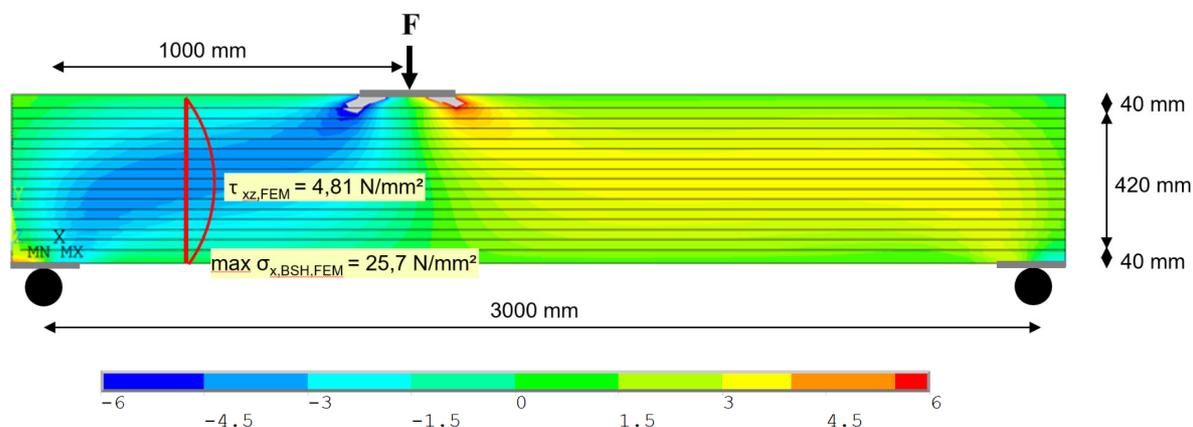


Abbildung A- 14: Analytische und FEM Berechnung der entworfenen Versuchskonfiguration der Serie K

In (Scharmacher 2011) wurde zur Provokation eines Schubversagens in Biegeversuchen an Brett-schichtholzträgern die wirksame Schubfläche durch Sägeschnitte in den Klebefugenrandbereichen reduziert. Dies hat einerseits den Nutzen, dass ein Schubversagen in einer zur Untersuchung angedachten Klebefuge wahrscheinlich wird. Jedoch ist durch die Selektion und Bearbeitung einer bestimmten Fuge das Versagen nicht mehr zufällig verteilt, bzw. entsteht nicht an der wahren, schwächsten Stelle im Querschnitt. Im aktuellen Vorhaben wurde auf eine künstliche Reduzierung der Schubfläche, und folglich eine Störung des zu untersuchenden Brett-schichtholzquerschnitts, verzichtet. Durch die Vorberechnung und die Ertüchtigung des Probenquerschnitts mit Verstärkungslamellen konnte von einem Schubversagen ausgegangen werden.

Ein weiteres, auch in der Literatur geschildertes, Problem bei der Konfiguration eines Biege-Schubversuches ist ein Querdruckversagen des Holzes an den Lasteinleitungspunkten bzw. Auflagern durch den zum Erreichen eines Schubversagens notwendigen, hohen Lasteintrag. Um örtliche Eindrückungen des Holzes an den Auflagern über der gelenkigen Rollenlagerung möglichst klein zu halten, dürfen bei Biegeprüfungen gemäß (DIN EN 408:2012-10) kleine Stahlplatten zwischen den Prüfkörper und die Belastungspunkte oder Auflager eingelegt werden. Im vorliegenden Fall wiesen die Verstärkungslamellen aus Buchen-Furnierschichtholz im Vergleich zu Weichholz eine viermal so hohe, charakteristische Druckfestigkeit quer zur Faser ($f_{c,90,fiat,k} = 10 \text{ N/mm}^2$) auf. Darauf basierend wurde in den Vorberechnungen, zur Vermeidung eines Querdruckversagens der Verstärkungslamellen, eine notwendige Auflagerlänge von 160 mm und einer Lasteinleitungslänge von 240 mm abgeschätzt. Zur Vergrößerung des querdruckfreien Schubbereichs zwischen den Lasteinleitungspunkten wurde jedoch eine möglichst geringe Lasteinleitungslänge angestrebt. Zudem musste bei hohen Querkräften von einem Querdruckversagen des innerhalb der Verstärkungslamellen

liegenden Fichtenholzes ausgegangen werden. Daher wurde entschieden, die Lasteinleitungslängen auf 100 mm bzw. 200 mm zu beschränken, und die Lasteinleitungsbereiche mit senkrecht zur Faser eingedrehten, selbstbohrenden Vollgewindeschrauben zu verstärken, die die Last über die gesamte Versuchskörper-Querschnittshöhe einleiten. Der querdruckfreie Schubbereich konnte dann entsprechend (Brandner et al. 2012) über die gesamte Länge zwischen den Verstärkungsschrauben angesetzt werden. Ein signifikanter Einfluss auf das Schubversagen bestand nicht, da durch das Verhältnis der Steifigkeit der Schraubenbettung im Holz auf Abscheren zur Schubsteifigkeit des Probenmaterials eine Aktivierung der Schraubenbettung erst nach einem Schubversagen erfolgt.

3.5.3 Aufnahme der Materialparameter

Vor dem Aufkleben der Verstärkungslamellen wurden die Teilproben aller Serien zur Bestimmung der globalen Rohdichte vermessen und gewogen. Zudem wurden die Holzfeuchten an bis zu sechs Stellen in einer Tiefe von 30 mm mittels elektrischer Widerstandsmessung aufgenommen. Tabelle 3-2 zeigt eine Übersicht der gemessenen Materialparameter. Einzelne Werte wichen bezogen auf den Mittelwert maximal $\pm 0,6\%$ ab (was in etwa der gerätetechnischen Messunsicherheit von $\pm 0,5\%$ entspricht).

Aufgrund der gegebenen Ungenauigkeit der widerstandselektrischen Messmethode diente diese Messung als erste Abschätzung des globalen Materialfeuchtegehaltes der Biege-Schubprüfkörper. In Folge des Versuchsprogramms wurden weitere Darrversuche zur differenzierteren Bestimmung durchgeführt (Kapitel 3.6.5).

Tabelle 3-2: globale Materialparameter des Probenmaterials

	Teilprobe	Masse [kg]	Rohdichte [kg/m ³]	Mittlere Holzfeuchte [%]
Serie K	K-I	156	478	13,4
	K-II	149	455	13,3
	K-III	153	466	13,4
	K-IV	147	447	13,3
	K-V	149	459	13,7
	K-VI	150	464	13,3
	K-VII	156	483	13,6
	K-VIII	149	463	13,3
Serie O	O-I	97	473	12,9
	O-II	98	466	12,8
Serie R	R-I	122	436	12,0
	R-II	125	446	12,1
	R-III	125	446	11,9
	R-IV	124	443	12,3
	R-V	126	450	13,0
	R-VI	125	446	12,8
	R-VII	124	443	12,8
	R-VIII	123	439	13,4
	R-IX	126	450	13,2

3.5.4 Herstellung der Versuchskörper

Nach der im Abschnitt 3.3 und Abschnitt 3.4 beschriebenen Konfektionierung und Dokumentation des Probenmaterials wurden auf den oberen und unteren Teilprobenflächen 3200 mm lange, 220 mm breite und 40 mm dicke Verstärkungslamellen aus Buchenfurnierschichtholz aufgeklebt.

Bei der Verklebung kam ein 2-Komponenten Phenol-Resorzin-Formaldehyd-Klebstoffsystem der Firma Dynea zum Einsatz, das sich aufgrund seines günstigen Verhaltens beim Verkleben von unterschiedlichen Holzarten, und seiner relativ langen, offenen Wartezeit, für den Zweck anbot. Für einen gleichmäßigen, beidseitigen Klebstoffauftrag diente eine Auftragsrakel (Abbildung A- 15). Um den erforderlichen Pressdruck von ca. 0,8 N/mm² über einen Zeitraum von mindestens sechs Stunden zu erreichen, wurden die Versuchskörper in eine Pressvorrichtung eingelegt, in der der Pressdruck über Stahltraversen und eine beidseitige Abspannung mit Gewindestangen und Muttern aufgebracht werden konnte. Die Höhe des Anzugsdrehmoments zur Aufbringung des notwendigen Pressdrucks wurde vorab mit einer untergelegten Kraftmessdose bestimmt. Auf diese Weise wurden insgesamt acht Versuchskörper aus der Brettschichtholz-Probe aus der Eishalle Bad Kissingen, zwei Versuchskörper aus der Brettschichtholz -Probe aus dem Oktoberfestzelt, und neun Versuchskörper aus den neu produzierten Brettschichtholz-Proben der Fa. Binder hergestellt.

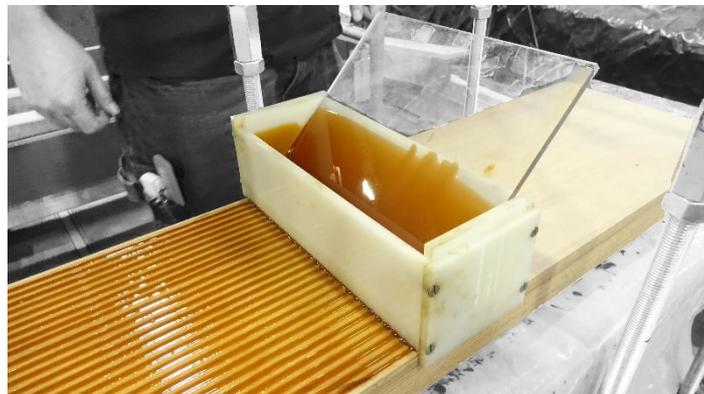


Abbildung A- 15: Klebstoffauftrag mittels Auftragsrakel



Abbildung A- 16: Verklebung der Biege-Schubversuchskörper

Nach der Verklebung wurden die zur Verstärkung des Auflager- und Lasteinleitungsbereichs vorgesehenen Vollgewindeschrauben eingedreht. Zum Einsatz kamen zur Verfügung stehende Vollgewindeschrauben mit Durchmessern zwischen 10 und 13 mm (Europäische technische Bewertung ETA-12/0062), (Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-519) . Geringe Unterschiede im Typ der verwendeten Schrauben wurden toleriert, da diese nicht Gegenstand der Untersuchungen waren, und der Verstärkungseffekt bei jedem Typ gegeben war. Beim Ausbau der Schrauben nach erfolgter Belastung zeigten sich keine Abrisse und nur sehr geringe Verformungen bei jedem Schraubentyp.

Die Schrauben wurden jeweils nach dem Vorbohren eines ca. 200 mm tiefen Pilotlochs über die ganze Versuchskörperhöhe bis zur Ebenmäßigkeit der Schraubenköpfe zur Oberfläche eingedreht. An den Auflagerflächen wurden im immer gleichen Raster jeweils vier, an den Lasteinleitungsflächen jeweils fünf Schrauben eingedreht, siehe Abbildungen 19 bis 18.

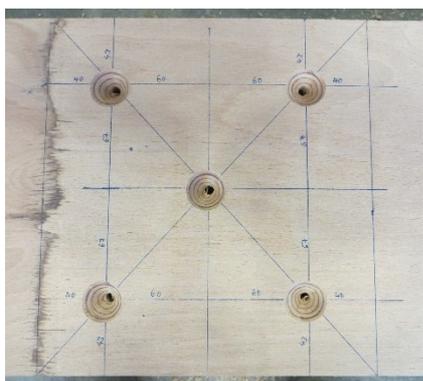


Abbildung A- 17: Vorbereitete Einschraublöcher an der mittigen Lasteinleitung



Abbildung A- 18: Eindrehen der Vollgewindeschrauben

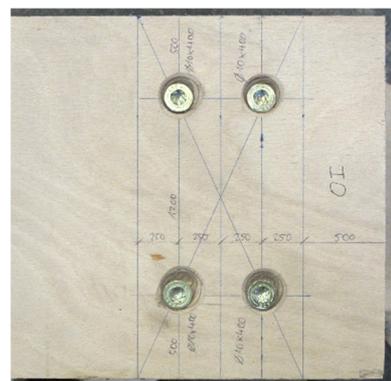


Abbildung A- 19: eingedrehte Verstärkungsschrauben an den Auflagern

Eine Ausnahme bildeten die Versuchskörper V bis VIII der Serie K, da nach den Belastungen der ersten Versuchskörper dieser Serie die Versagenslasten die berechneten Lasten weit unterschritten und sodann entschieden wurde, zu Vergleichszwecken die zweite Hälfte der Serie ohne Lasteinleitungsverstärkung zu belasten. Weiterhin wurde der Versuchskörper I der Serie R ohne eingedrehte Verstärkungsschrauben belastet.

3.5.5 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau der 3-Punkt- Biegeversuche ist in Abbildung A- 20 schematisch dargestellt. Die Längen und Höhen des Aufbaus in den einzelnen Serien sind in Tabelle 3-3 gelistet.

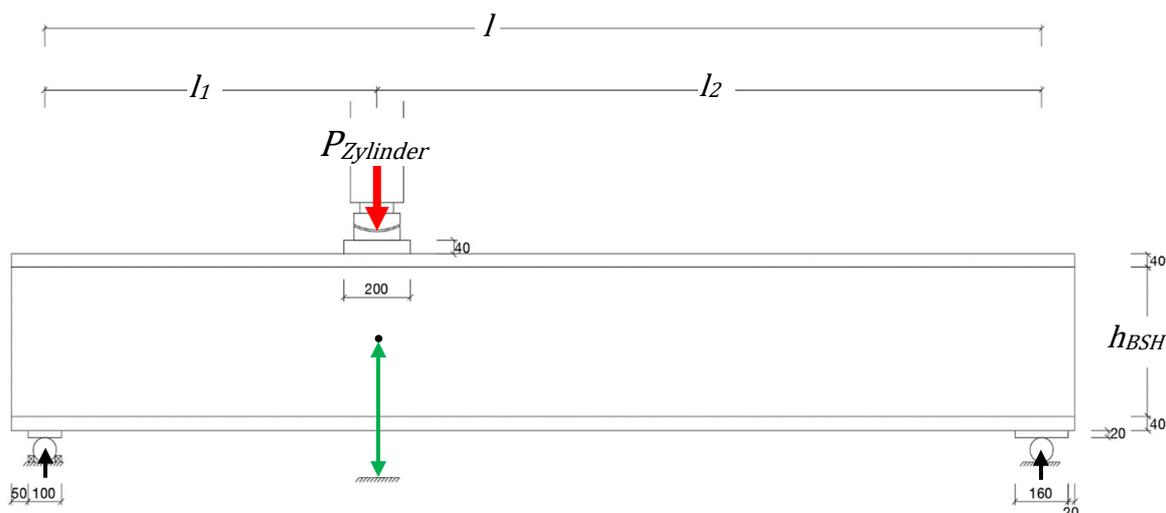


Abbildung A- 20: Versuchskonfiguration der Biege-Schubversuche; rot: Belastung; grün: Messung der Durchbiegung

Tabelle 3-3: Geometrie des Versuchsaufbaus

Serie	l [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	h_{BSH} [mm]	l / l_1 [mm]
K	3000	1000	2000	424	0,33
O	2615	810	1805	345	0,31
R	3000	1000	2000	400	0,33

Die Längen l_1 , l_2 und h_{BSH} unterschieden sich zwischen den Serien aufgrund des verfügbaren Probenmaterials und der Vorberechnung.

3.5.6 Versuchsdurchführung

Die Biege-Schubversuchskörper wurden in einem Portalrahmen mit einem hydraulischen Druckzylinder weggeregelt belastet. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug einheitlich 0,05 mm/s.

An den Lasteinleitungspunkten wurden zum gleichmäßigen Lasteintrag Stahlplatten untergelegt, die über die gesamte Trägerbreite und Längen von 100/160 mm an den Auflagern und 200 mm an der oberen Lasteinleitung betrug. Somit stand jeder Schraubenkopf der verstärkenden Vollgewindeschrauben auf einer Stahlplatte auf, die Kräfte wurden direkt über die gesamte Querschnittshöhe eingeleitet. Der Versuchsaufbau ist aus den folgenden Abbildungen 21 bis 24 ersichtlich.

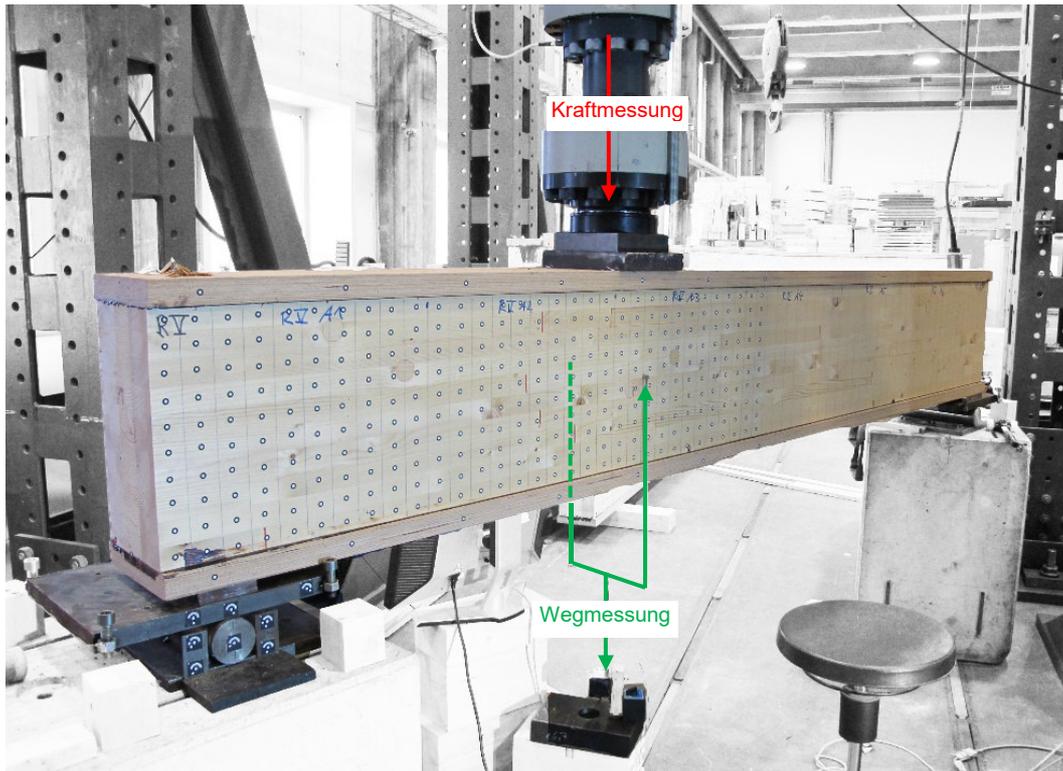


Abbildung A- 21: beispielhafter Versuchsaufbau eines Biege-Schubversuchs



Abbildung A- 22: Auflager auf Seite I_1



Abbildung A- 23: Lasteinleitung oben am Hydraulikzylinder



Abbildung A- 24: Auflager auf Seite I_2

Während des Versuchs wurde die eingetragene Last kontinuierlich aufgezeichnet. Ebenfalls aufgezeichnet wurden der Maschinenweg des Druckzylinders, und die mittlere Durchbiegung des Versuchskörpers unter der Lasteinleitung. Diese wurde auf halber Querschnittshöhe durch eine an beiden Versuchskörperseiten auf halber Höhe fixierten Messbrücke abgegriffen und von einem zentralen Seilzugwegaufnehmer übertragen.

Zum Zweck der visuellen Dokumentation der Verformungen wurde der Prüfbereich (die für einen Schubbruch prädestinierte Versuchskörperseite mit kürzerem Abstand von Auflager zu Lasteinleitung) zusätzlich durch Foto- und Videosysteme aufgenommen. Dazu wurde auf einer Seite ein optisches Messsystem (GOM) verwendet, dass in Zeitabständen von einer Sekunde Bilder von der erfassten Oberfläche aufzeichnete. Im Nachgang konnten über auf der

Oberfläche aufgeklebte Messpunkte die Verformungen während der Belastung dargestellt werden. Abbildung A- 25 zeigt beispielhaft eine Bildserie während eines Schubrisses.

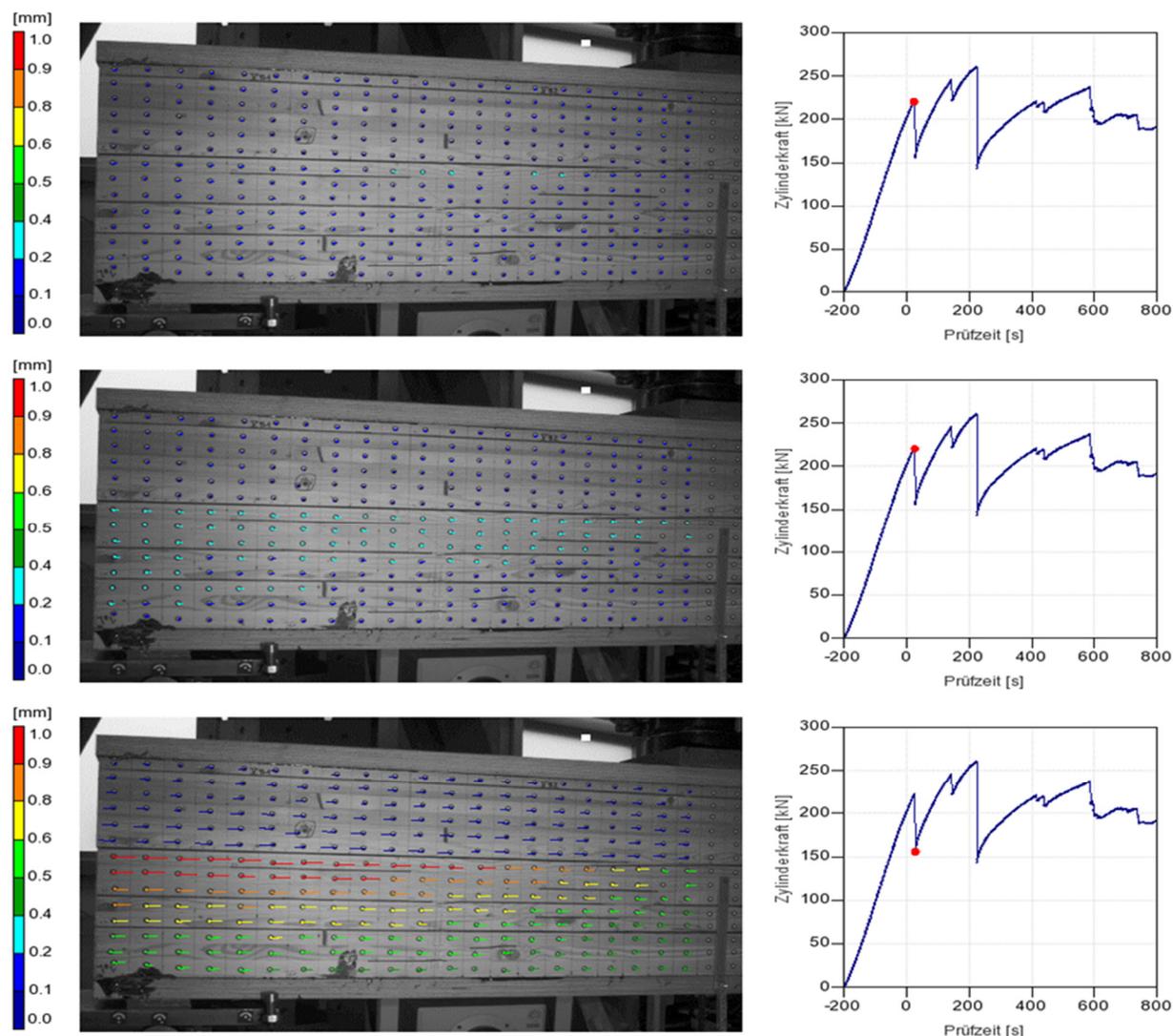


Abbildung A- 25: Auswertung der Daten des optischen Messsystems während eines Schubrisses

Auf der anderen Versuchskörperseite wurden die Oberflächenbewegungen mit einer Videokamera aufgenommen. Zusammen mit punktuell aufgenommenen Fotografien konnte so im Nachgang die genauen Versuchsverläufe rekonstruiert, und die einzelnen Schubversagen exakt bestimmt werden.

3.5.7 Versuchsbeobachtungen

In allen Belastungsversuchen der Biege-Schubversuchskörper konnte Schubversagen beobachtet werden, bevor bei großen Verformungen ein Biegezugversagen der Verstärkungslamellen und des Probenmaterials auftrat. Nach dem ersten Schubriss traten in Folge weitere Schubrisse im Prüfbereich, und auch auf der dem Prüfbereich abgewandten Seite, auf.

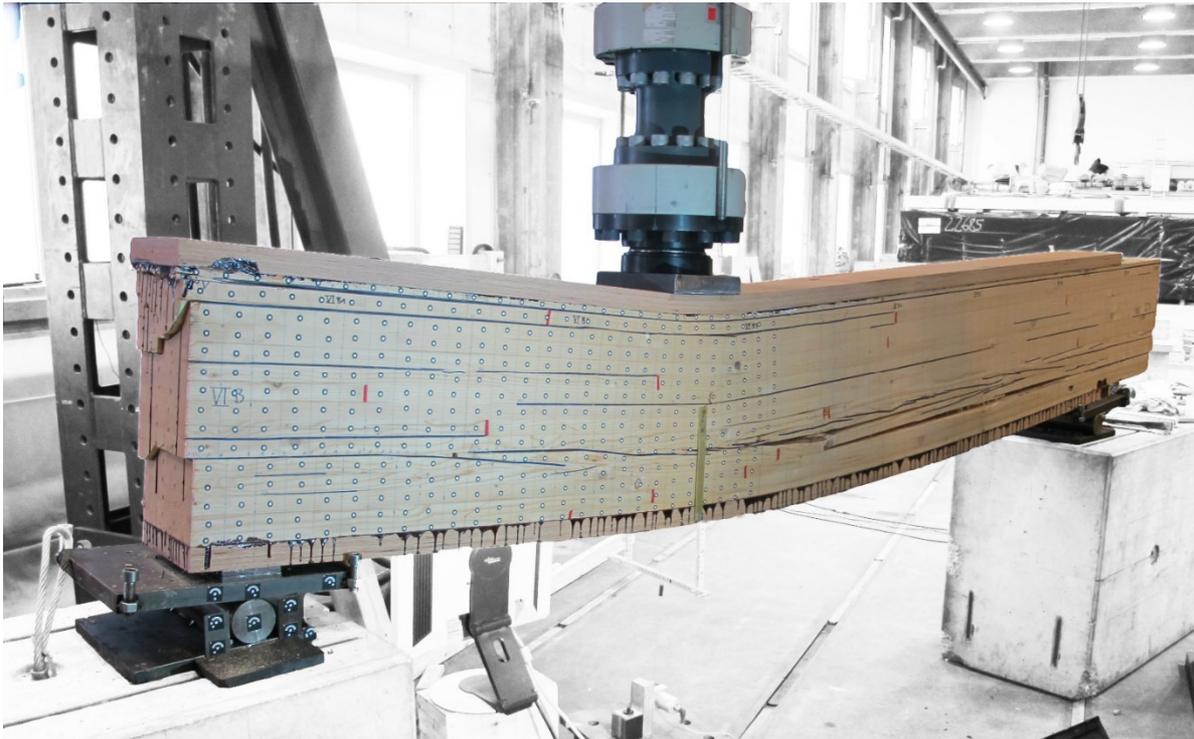


Abbildung A- 26: Biege-Schubversuch nach der Belastungsphase (beispielhaft K-VI)

In Serie K mit zum Teil tiefen Schwindrissen und erheblich vorgeschädigten Klebefugen der Lamellenverklebung wurde der erste Schubriss vorwiegend an einer teil-delaminierten Klebefuge initiiert. Über die Querschnittsbreite gesehen wanderte der Schubriss jedoch oftmals vom Fugenrissgrund in die Lamelle nach oben oder unten ab.

Die Verklebung der Verstärkungslamellen zeigte eine ausreichende Festigkeit, keine der Verklebungen versagte, bevor der erste Schubriss auftrat. Lediglich bei Versuchskörper R-I wanderte der in der obersten Lamelle des Probenmaterials initiierte, erste Schubriss im Randbereich in die Klebefuge zur Verstärkungslamelle ab. Da dieser Bereich im Vergleich zum restlichen Schubriss sehr klein war, wurde dies in der weiteren Auswertung nicht weiter berücksichtigt.

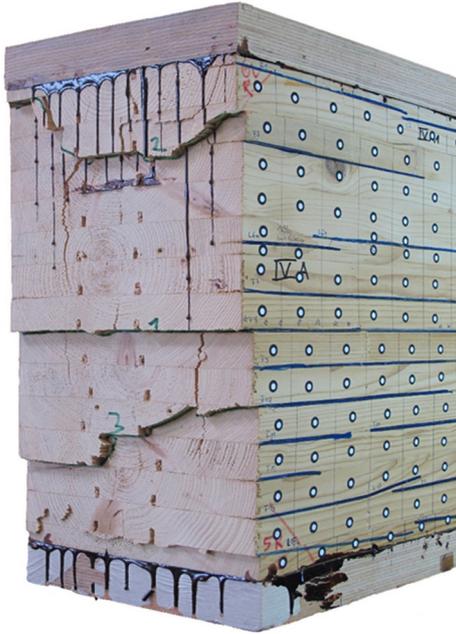


Abbildung A- 27: Rissbild am Querschnittsende des Prüfbereichs (beispielhaft R-IV)



Abbildung A- 28: Rissbild am Querschnittsende gegenüber des Prüfbereichs (beispielhaft R-IV)

Bei den im Auflagerbereich und im Bereich der Lasteinleitung unverstärkten Versuchskörpern der Serie K zeigten sich keine lokalen Eindrückungen. Beim einzigen unverstärkten Versuchskörper der Serie R (R-I) entstanden aufgrund des höheren Lastniveaus im Verlauf der Belastung erhebliche Eindrückungen an der Verstärkungslamelle und den darunterliegenden Probenlamellen im Bereich der Auflager- und Lasteinleitungsbereiche. Die Auswertung des ersten Schubrisses dieses Versuchs wurde aufgrund des sonst unauffälligen und den weiteren Versuchen entsprechenden Belastungs- und Versagensbildes nicht verworfen.

Ein Unterschied im Verhalten beim ersten Schubbruch zwischen unverstärkten zu verstärkten Versuchskörpern konnte visuell nicht erkannt werden.

Zur Kontrolle der Risstiefenmessungen in Kapitel 3.4 wurden ausgewählte Biege-Schubversuchskörper an einer Schubbruchfläche mit vorab teildelaminierter Klebefuge geteilt, um die Bruchflächen sichtbar zu machen. Die vorab delaminierten Bereiche waren durch eine dunklere Einfärbung der Oberflächen in den geöffneten Fugen visuell gut von vorab nicht delaminierten Flächen unterscheidbar. Abbildung A- 27 zeigt einem Vergleich der Flächen der graphisch aufgetragenen Messdaten der Risstiefenmessung mit den visuell beobachteten, vorab delaminierten Flächen.

Bei der Versuchskörperzerlegung ergab sich, dass die Risstiefen bei der Vorab-Messung teilweise unterschätzt wurden, da die Fühlerblattlehre in Bereichen mit vertikal abwandernden Rissen bzw. sonstigen Hindernissen im Riss nicht vollständig bis zum Rissgrund vordringen konnte. Folglich wurde aus der Datengrundlage für die anschließenden Berechnungen ein Faktor von 1,1 zur Erhöhung der tatsächlichen Risttiefe ermittelt.

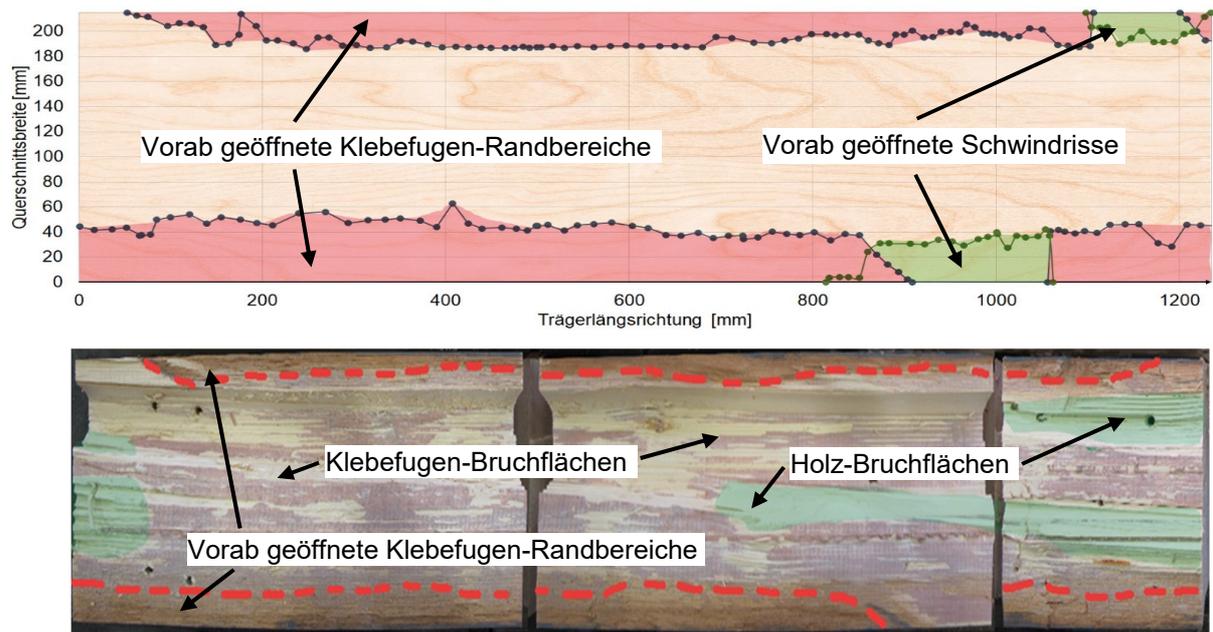


Abbildung A- 29: Abgleich der Vorab durchgeführten Risstiefenmessung mit wahren Bruchflächen der Biege-Schubversuchskörper

3.5.8 Berechnung der Biege-Schubfestigkeiten

Zur Berechnung der Biege-Schubfestigkeiten der Biege-Schub-Versuchskörper wurde jeweils der erste Schubbruch während der Belastungsphase herangezogen. Er war charakterisiert durch den ersten, merklichen Abfall der Versuchslast mit erkennbarer Horizontalverschiebung in einer Klebefuge zwischen zwei Lamellen der Schubprobe, bzw. einem Horizontalriss mit erkennbarer Verschiebung innerhalb einer Lamelle. Zur Bestimmung dienten die Beobachtungen in situ während der Belastung, und die Video-Aufzeichnungen bzw. Bilderserien des optischen Messsystems.

Tabelle 3-4 zeigt die ermittelten Kräfte bei den jeweils ersten Schubbrüchen der Versuchskörper. Zur weiteren Berechnung sind ebenfalls die korrespondierenden Höhen der Schubbrüche im Querschnitt angegeben. Diese wurden anhand der Rissverläufe am Querschnittsende visuell gemittelt.

Tabelle 3-4: Kräfte und Risshöhen beim ersten Schubriss der Biege-Schub-Versuchskörper

Versuchskörper	Zylinderkraft [kN]	Querkraft im Prüfbereich beim ersten Schubriss [kN]	Lage des des ersten Schubrisses im Querschnitt ¹⁾ [mm]
K-I	224,8	149,9	20
K-II	159,2	106,1	80
K-III	206,3	137,5	90
K-IV	91,7	61,1	10
K-V	223,3	148,9	30
K-VI	169,5	113,0	80
K-VII	196,0	130,7	100
K-VIII	131,1	87,4	10
O-I	370,5	255,7	90
O-II	407,0	280,9	60
R-I	395,6	263,7	180
R-II	405,9	270,6	30
R-III	379,3	252,9	70
R-IV	556,8	371,2	50
R-V	551,7	367,8	90
R-VI	535,0	356,7	160
R-VII	466,2	310,8	120
R-VIII	485,4	323,6	20
R-IX	498,8	332,5	60

¹⁾: Siehe Abbildung A- 30

Die einzelnen Belastungshistorien mit zugehörigen Maschinenwegen und Versuchskörper-Durchbiegungen unter der Lasteinleitung, sowie die Rissbilder an den Querschnittsenden der Prüfbereiche, sind in Anlage A dargestellt.

Die Berechnung der vorliegenden Schubspannung erfolgte nach der Balkentheorie 1. Ordnung, und unter der Annahme eines starren Verbundes in der Klebefuge zwischen Probe und Verstärkungslamellen. Die Steifigkeiten der Materialien wurden aus der aktuellen Normen bzw. Zulassungen gemäß Kapitel 3.5.2 entnommen.

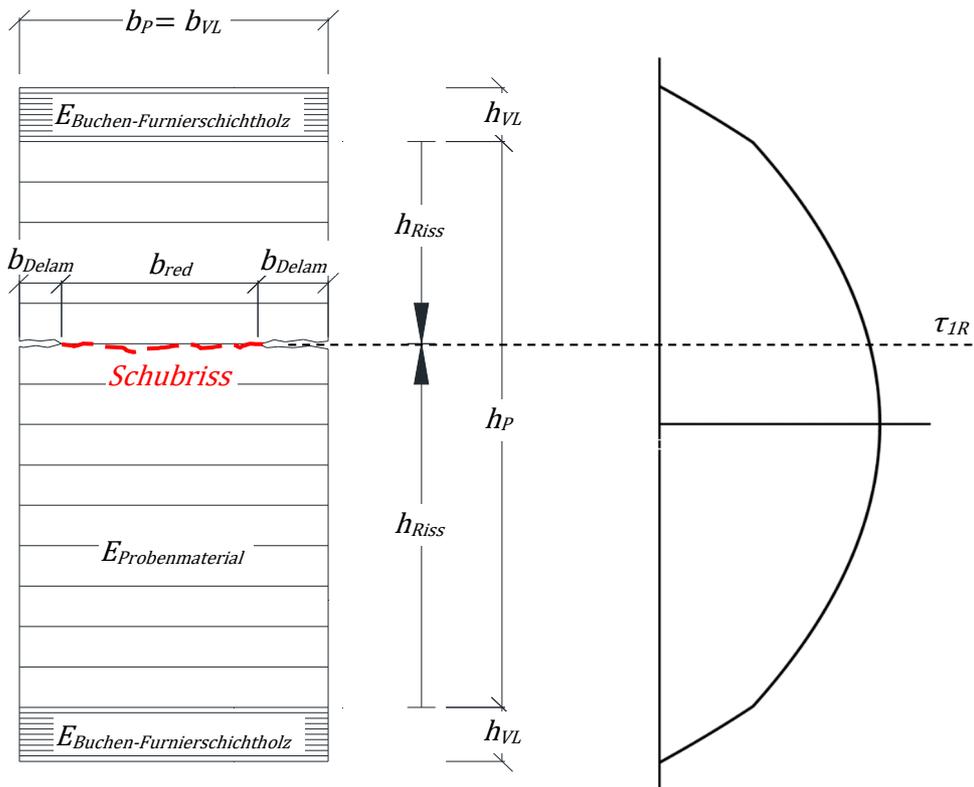


Abbildung A- 30: Schematische Darstellung (mit den Eingangsparametern für die Berechnung) eines Querschnitts beim ersten Schubriss und dem entsprechenden Schubspannungsverlauf vor dem Schubversagen

Aus der Zylinderkraft wurde im ersten Schritt die Querkraft im Prüfbereich berechnet.

$$V = P_{\text{Zylinder}} \frac{l - l_1}{l}$$

mit

P_{Zylinder} : Zylinderkraft

l : Spannweite

l_1 : Länge des Prüffeldes (siehe Abbildung A- 20)

Bei der Berechnung des statischen Momentes und des effektiven Flächenträgheitsmomentes des Querschnitts wurden die unterschiedlichen Steifigkeiten von Probenmaterial und Verstärkungslamellen über einen Faktor n_i berücksichtigt.

$$n_i = \frac{E_{\text{Buchen-Furnierschichtholz}}}{E_{\text{Probenmaterial}}}$$

Das effektive Flächenträgheitsmoment berechnete sich zu

$$I_{eff} = \frac{b_P \cdot h_P^3}{12} + n_i \cdot \frac{b_{VL} \cdot h_{VL}^3}{6} + 2 \cdot n_i \cdot A_{VL} \cdot \left(\frac{h_P + h_{VL}}{2} \right)^2$$

mit

b_P : Breite des Probenquerschnittes

h_P : Höhe des Probenquerschnittes

b_{VL} : Breite der Verstärkungslamelle

h_{VL} : Höhe der Verstärkungslamelle

A_{VL} : Querschnittsfläche der Verstärkungslamelle

Bei den Serie K und O traten Schubbrüche mitunter an Klebefugen auf, die aus der Risstiefenmessung bekannte Vorab-Delaminierungen aufwiesen. Zur Berücksichtigung der dadurch verringerten, wirksamen Querschnittsbreite wurde die nominelle Querschnittsbreite um ein mittleres Tiefenmaß der bestehenden Delaminierung reduziert. Zu diesem Zweck wurde aus den Messdaten der Risstiefenmessungen die delaminierte Fläche A_{Delam} der Klebefuge vom Trägerende bis zur Lasteinleitung berechnet. Die mittlere Tiefe der Delaminierung ergab sich auf jeder Versuchskörperseite zu

$$b_{Delam,Seite A /Seite B} = \frac{A_{Delam}}{l_1}$$

mit

A_{Delam} : vorab-delaminierte Fläche der am Schubriss beteiligten Fläche

l_1 : Länge des Prüffeldes (siehe Abbildung A- 20)

Somit konnte bei Schubrissen, die vorab delaminierte Fuge enthielten, eine reduzierte Querschnittsbreite b_{red} angesetzt werden. Dabei wurde der Breitenabzug durch einen Faktor 1,1 (siehe Abschnitt 3.5.6) erhöht. Dieser Faktor berücksichtigt Risstiefenmessungen, bei denen das Fühlerblatt nicht vollständig bis zum Rissgrund in den Riss eindringen konnte.

$$b_{red} = b_P - (b_{Delam,Seite A} + b_{Delam,Seite B}) \cdot 1,1$$

mit

b_P : Breite des Probenquerschnittes

$b_{Delam,Seite A}$: mittlere Tiefe der Vorab-Delaminierung auf Querschnittsseite A

$b_{Delam,Seite B}$: mittlere Tiefe der Vorab-Delaminierung auf Querschnittsseite B

Hierbei ist anzumerken, dass der Wert dieses Faktors bei der Berechnung der Schubfestigkeiten nur einen geringen Einfluss hat. Bei Nichtberücksichtigung des Faktors 1,1 ergibt sich eine um maximal 4 % geringere Schubfestigkeit.

Der Querschnitt aller Versuchskörper war achsensymmetrisch, die Symmetrieachse lag auf halber Querschnittshöhe. Somit ergab sich das statische Moment auf Höhe des ersten Schubrisses zu

$$S_{y,Risshöhe} = n_i \cdot A_{VL} \cdot \frac{1}{2}(h_P + h_{VL}) + A_{P,\Delta} \cdot \left(\frac{1}{4}h_P + \frac{1}{2}h_{Riss,min}\right)$$

mit

n_i : Verhältnis der Materialsteifigkeiten Verstärkungslamellen/Probenmaterial

A_{VL} : Querschnitt der Verstärkungslamelle

h_P : Höhe des Probenquerschnitts

h_{VL} : Höhe der Verstärkungslamelle

$A_{P,\Delta}$: Teil-Probenquerschnitt vom Querschnittsrand bis zum 1. Schubriss

$h_{Riss,min}$: Minimum aus beiden Risshöhen (siehe Abbildung A- 30)

Die Biege-Schubspannung auf Höhe des ersten Schubrisses berechnete sich zu

$$\tau_{Erstriss} = \frac{V \cdot S_{y,Risshöhe}}{I_{eff} \cdot b_{red}}$$

mit

V : Querkraft im Prüfbereich beim ersten Schubriss

$S_{y,Risshöhe}$: Statische Moment auf Höhe des ersten Schubrisses

I_{eff} : Effektives Flächenträgheitsmoment des Querschnitts

b_{red} : Reduzierte Querschnittsbreite

Wie in (Klapp/Brüninghoff 2005; Brandner et al. 2012) dargelegt, besteht ein Zusammenhang zwischen der Schubfestigkeit von Holz und des beanspruchten Schubvolumens bzw. der beanspruchten Schubfläche. Aufgrund des Einflusses von vorab bestehenden Rissen im vorliegenden Probenmaterial wurde im Zuge der vorliegenden Auswertung der Flächenansatz gewählt. Um die unterschiedlichen Dimensionen der Versuchskörper der einzelnen Serien zu berücksichtigen, wurden folglich die berechneten Biege-Schubspannungen auf eine einheitliche, schubbeanspruchte Fläche normiert. Als Referenz wurde die schubbeanspruchte Fläche der Serie R herangezogen. Die Potenz des Normierungsfaktors wurde in Anlehnung

an (Lackner 2011a) mit $k_s = 0,2$ angesetzt. Somit errechneten sich die normierten Biege-Schubspannungen beim ersten Schubriss zu

$$\tau_{Erstriss,normiert} = \tau_{Erstriss} \cdot \frac{1}{\left(\frac{A_{S,VK i}}{A_{S,VK Serie R}}\right)^{0,2}}$$

mit

$A_{S,VK i}$: Schubbeanspruchte Fläche des Biege-Schubversuchskörpers

$A_{S,VK Serie R}$: Schubbeanspruchte Fläche bei der Serie R

$\tau_{Erstriss}$: Biege-Schubspannung auf Höhe des ersten Schubrisses

Die Berechnung der schubbeanspruchten Fläche berücksichtigte auch eine Verringerung der Breite durch vorab geöffnete Risse und Klebefugen. Ebenfalls wurde bei der Berechnung berücksichtigt, ob im Versuchskörper Querdruckverstärkungen am Auflager und der Lasteinleitung vorhanden waren. Gemäß (Brandner et al. 2012) vergrößert sich durch den Wegfall des Lastausbreitungswinkels der querdruckfreie Bereich, und somit die Fläche mit einer reinen Schubbeanspruchung.

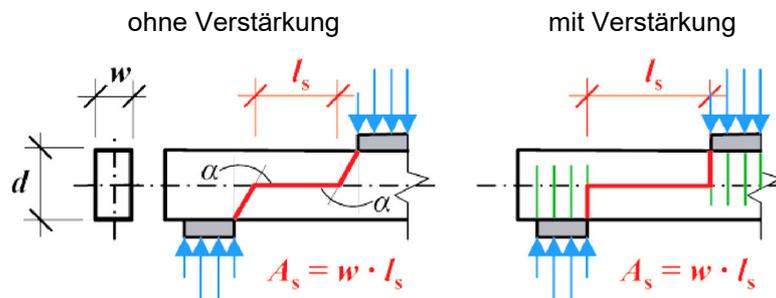


Abbildung A- 31: Ansatz der beanspruchten Schubfläche ohne bzw. mit Querdruckverstärkungen durch selbstbohrende Vollgewindeschrauben (Brandner et al. 2012); Ansatz $\alpha = 30^\circ$

Tabelle 3-5: Biege-Schubspannungen beim ersten Schubriss der Biege-Schubversuchskörper

Versuchskörper	τ_{1R} ¹⁾	$\tau_{1R,norm}$ ²⁾	$\bar{x}(\tau_{1R,norm})$ ³⁾	$\sigma(\tau_{1R,norm})$ ⁴⁾	$VarK(\tau_{1R,norm})$ ⁵⁾
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
K-I	2,57	2,47			
K-II	1,49	1,47			
K-III	2,53	2,34			
K-IV	1,51	1,35			
K-V	2,87	2,47	1,86	0,491	26,4
K-VI	2,11	1,80			
K-VII	1,62	1,49			
K-VIII	1,70	1,46			
O-I	3,72	3,51			
O-II	4,83	4,49	4,00	-	-
R-I	1,86	1,72			
R-II	3,88	3,88			
R-III	3,37	3,37			
R-IV	5,25	5,25			
R-V	4,53	4,53	3,87	1,060	27,4
R-VI	4,62	4,62			
R-VII	3,31	3,31			
R-VIII	3,45	3,45			
R-IX	4,72	4,72			

¹⁾ τ_{1R} : Schubspannung im ersten Schubriss

²⁾ $\tau_{1R,norm}$: Schubspannung im ersten Schubriss, Normierung der schubbeanspruchten Fläche

³⁾ $\bar{x}(\tau_{1R,norm})$: Arithmetisches Mittel der normierten Schubspannung im ersten Schubriss

⁴⁾ $\sigma(\tau_{1R,norm})$: Standardabweichung der normierten Schubspannung im ersten Schubriss

⁵⁾ $VarK(\tau_{1R,norm})$: Variationskoeffizient der normierten Schubspannung im ersten Schubriss

In der Serie R mit neu produzierten Brettschichtholzproben unterschied sich die Sortierung der Mittellamellen. Bis auf die zwei Randlamellen, welche einheitlich der Sortierung T22 entstammten, waren die Versuchskörper aus Lamellen der Sortierung T11 / T14 / T22 zusammengesetzt. Zum Vergleich der Biege-Schubfestigkeiten wurde die Serie R in drei Unterserien ausgewertet. Zum einen gruppierten sich die Versuchskörper nach ihrer Lamellenzusammensetzung, zum Zweiten wurden Gruppen mit Schubrissen innerhalb der gleichen Lamellensortierung gebildet. Die Tabellen 3-6 und 3-7 zeigen die statistische Auswertung der Biege-Schubspannungen im ersten Schubriss. Hier wurde keine Normierung auf eine schubbeanspruchte Fläche vorgenommen, da alle zum Vergleich herangezogenen Biege-Schubversuchskörper die gleichen Abmessungen hatten.

Unter Beachtung des geringen Stichprobenumfangs zeigt sich keine Korrelation zwischen der Lamellensortierung und der Biege-Schubfestigkeit.

Tabelle 3-6: Statistische Auswertung der Biege-Schubspannungen beim ersten Schubriss in den Biege-Schubversuchskörper in Serie R, getrennt nach der Lamellensortierung

Versuchskörper	τ_{1R} ¹⁾	T-Klasse ²⁾	$\bar{x}(\tau_{1R})$ ³⁾	$\sigma(\tau_{1R})$ ⁴⁾	$VarK(\tau_{1R})$ ⁵⁾
(mit T-Klasse des Lamellenaufbaus)	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
R-I (T11)	1,86	T22			
R-II (T11)	3,88	T11	3,04	1,05	34,6
R-III (T11)	3,37	T11			
R-IV (T14)	5,25	T14			
R-V (T14)	4,53	T14	4,80	0,39	8,1
R-VI (T14)	4,62	T22			
R-VII (T22)	3,31	T22			
R-VIII (T22)	3,45	T22	3,83	0,78	20,3
R-IX (T22)	4,72	T22			

¹⁾ τ_{1R} : Schubspannung im ersten Schubriss

²⁾ T-Klasse : Sortierklasse (T-Klasse) der Lamelle, in der der erste Schubriss auftrat

³⁾ $\bar{x}(\tau_{1R})$: Arithmetisches Mittel von τ_{1R} einer Unterserie aus Serie R mit innenliegenden Lamellen einer T-Klasse

⁴⁾ $\sigma(\tau_{1R,norm})$: Standardabweichung von τ_{1R} einer Unterserie aus Serie R mit innenliegenden Lamellen einer T-Klasse

⁵⁾ $VarK(\tau_{1R,norm})$: Variationskoeffizient von τ_{1R} einer Unterserie aus Serie R mit innenliegenden Lamellen einer T-Klasse

Tabelle 3-7: Statistische Auswertung der Biege-Schubspannungen beim ersten Schubriss in den Biege-Schubversuchskörper in Serie R, getrennt nach T-Klassen der versagten Lamellen

Versuchskörper	τ_{1R} ¹⁾	T-Klasse ²⁾	$\bar{x}(\tau_{1R})$ ³⁾	$\sigma(\tau_{1R})$ ⁴⁾	$VarK(\tau_{1R})$ ⁵⁾
(mit T-Klasse des Lamellenaufbaus)	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
R-II (T11)	3,88	T11	3,62	0,36	10,0
R-III (T11)	3,37	T11			
R-IV (T14)	5,25	T14			
R-V (T14)	4,53	T14	4,89	0,51	10,3
R-I (T11)	4,62	T22			
R-VI (T14)	3,31	T22			
R-VII (T22)	3,45	T22	3,59	1,16	32,4
R-VIII (T22)	4,72	T22			
R-IX (T22)	4,62	T22			

¹⁾ τ_{1R} : Schubspannung im ersten Schubriss

²⁾ T-Klasse : Sortierklasse (T-Klasse) der Lamelle, in der der erste Schubriss auftrat

³⁾ $\bar{x}(\tau_{1R})$: Arithmetisches Mittel von τ_{1R} einer Unterserie aus Serie R mit innenliegenden Lamellen einer T-Klasse

⁴⁾ $\sigma(\tau_{1R,norm})$: Standardabweichung von τ_{1R} einer Unterserie aus Serie R mit innenliegenden Lamellen einer T-Klasse

⁵⁾ $VarK(\tau_{1R,norm})$: Variationskoeffizient von τ_{1R} einer Unterserie aus Serie R mit innenliegenden Lamellen einer T-Klasse

3.6 Schubversuche nach DIN EN 408

3.6.1 Allgemeines

Die Schubversuche nach (DIN EN 408:2012-10) dienen zur Feststellung der Schubfestigkeit in Faserrichtung von Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz. Dabei werden auf eine geometrisch definierte Probe des zu untersuchenden Holzes konfektionierte Lasteinleitungsplatten aus Stahl aufgeklebt. Anschließend wird in den Prüfkörper unter einem Winkel von 14° zur Faserrichtung des Holzes eine Kraft eingeleitet, um ein Schubversagen zu provozieren. Durch die spezielle Prüfanordnung verläuft die Lastresultierende durch den geometrischen Mittelpunkt des Prüfkörpers, somit werden Lastexzentrizitäten und folglich ein Momenteneintrag vermieden. Gleichzeitig wird ein Einfluss der durch die Neigung entstehenden Querdruckspannungen auf die Versagenslast geringgehalten. Aus den ermittelten Schubfestigkeiten wird auf eine Schubfestigkeit von Bauholz und Brettschichtholz gefolgert.

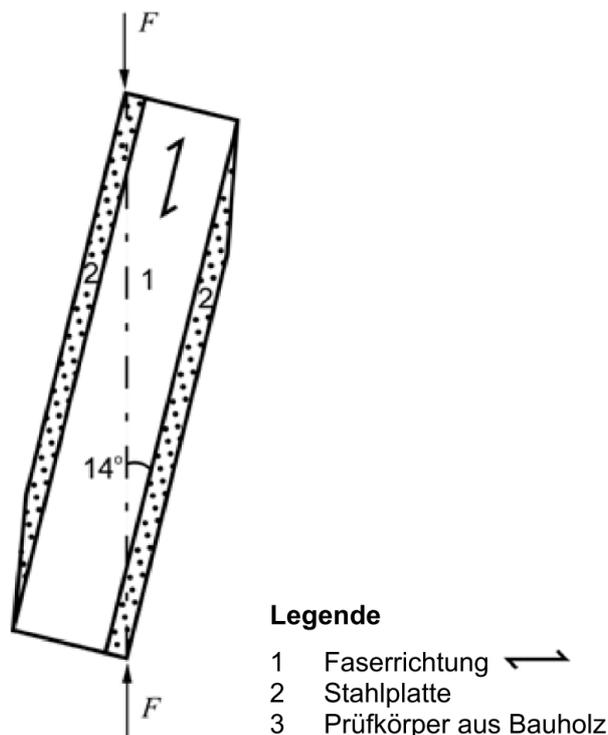


Abbildung A- 32: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung nach (DIN EN 408:2012-10)

3.6.2 Vorversuche

In diesem Projekt war eine hohe Anzahl an Schubversuchen nach EN 408 geplant. Um den Materialaufwand (konfektionierte Stahlplatten) möglichst gering zu halten, wurde angedacht, die Stahlplatten durch 60 mm dicke Buche-Furnierschichtholzplatten zu ersetzen. Zur Feststellung der Tauglichkeit dieser Vorgehensweise wurden Vorversuche in vier Serien durchgeführt. Hierzu wurden aus einem Probenabschnitt des Bestands-

Brettschichtholzmaterials Lamellenpaare herausgearbeitet, siehe Abbildung A- 33. Zur Prüfung wurde ein Lamellenpaar mit visuell sichtbar delaminiertem Fugenrandbereich, und ein Lamellenpaar ohne erkennbare Fugendelaminierung, ausgewählt. Die Lasteinleitungsplatten aus 60 mm Buchen-Furnierschichtlamellen wurden vergleichbar mit der in Kapitel 3.5.4 beschriebener Vorgehensweise aufgeklebt.

Um einen weiteren Vergleich zwischen Versuchskörpern mit der beim Normprüfkörper vorgeschriebenen Dicke von 32 mm, und einem Versuchskörper mit der gesamten Probenbreite, zu ermöglichen, wurden aus Probenabschnitten mit gleicher Klebefuge Versuchskörper mit voller Querschnittsbreite, bzw., durch Teilung über die Querschnittsbreite in mehrere Abschnitte, Versuchskörper mit 32 mm hergestellt, siehe Abbildung A- 35. Alle Versuchskörper mit 32 mm Dicke enthielten keine vorab delaminierten Klebefugen.



Abbildung A- 33: aufgeteilter Probenabschnitt
1) Klebefuge mit Delaminierung im Fugenrandbereich
2) Klebefuge ohne sichtbare Delaminierung



Abbildung A- 34: Herstellung der Versuchskörper durch aufgeklebte Lasteinleitungsplatten



Abbildung A- 35: aufgetrennter Versuchskörper, Breite = 32 mm

Die Schubprüfung wurde in einer Universalprüfmaschine weggeregelt mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,05 mm/s durchgeführt. Dabei wurde die Last über zwei parallele Stahlplatten auf die in einem Winkel von 14° abgeschrägten Lasteinleitungsplatten aus

Buchen-Furnierschichtholz übertragen. Der Kraftverlauf während der Belastung wurde messtechnisch erfasst.



Abbildung A- 36: Schubprüfung der vollen Querschnittsbreite



Abbildung A- 37: Schubprüfung mit Normbreite = 32 mm

Bei den Versuchskörpern mit voller Probenbreite zeigten sich unterschiedliche Versagensbilder. Im Versuchskörper mit einer teilweise delaminierten Klebefuge entstand der Schubbruch mehrheitlich in Fugenebene. Die zuvor delaminierten Bereiche waren durch eine unterschiedliche Oberflächenfarbe gut erkennbar, siehe Abbildung A- 38. Der Versuchskörper ohne delaminierte Fuge zeigte einen Schälrisse über die Klebefuge hinweg, bedingt durch einen ähnlichen Jahrringverlauf in den angrenzenden Lamellen, siehe Abbildung A- 39.



Abbildung A- 38: Klebefugenebene nach Prüfung; erkennbar sind die vorab delaminierten Fugenrandbereiche

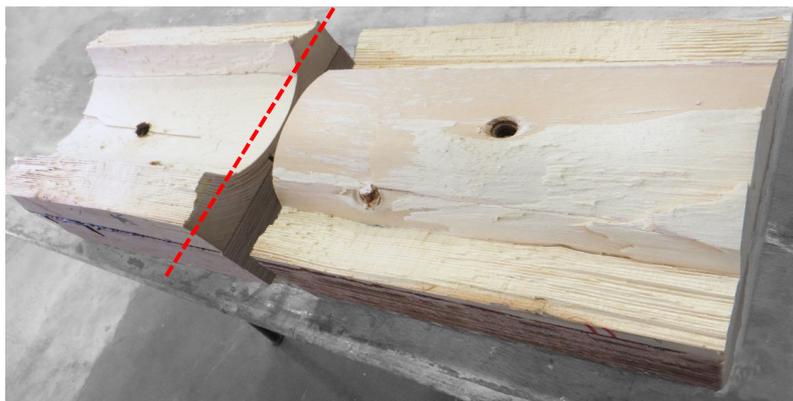


Abbildung A- 39: Versagensbild des Versuchskörpers mit voller Fugenbreite ohne erkennbare Delaminierung der Klebefuge (rote Linie); kein Versagen in der Fugenebene

Die auf eine Breite von 32 mm zugeschnittenen Versuchskörper versagten mehrheitlich durch einen Schubbruch im Holz, sodass die resultierende Schubfestigkeit einen Mindestwert der Klebefugen-Schubfestigkeit darstellt.

Die quantitativen Ergebnisse sind in Tabelle 3-8 zusammengefasst. Die Mittelwerte der Ergebnisse aus den 32 mm breiten Prüfkörpern liegen im Bereich der Ergebnisse der Versuchskörper mit voller Probenbreite. Der Mittelwert der Festigkeiten bei den teilweise delaminierten Versuchskörpern liegt niedriger als bei den Versuchskörpern mit intakter Klebefuge, was einen Einfluss einer Randdelaminierung auf die Scherfestigkeit vermuten lässt. Aufgrund der kleinen Stichprobe der Vorserie sind diese Beobachtungen jedoch nicht aussagekräftig.

Tabelle 3-8: Ergebnisse der Vorab-Schubversuche

	keine visuelle Delaminierung		Delaminierung im Randbereich	
	d = 32mm	d = 215 mm	d = 32mm	d = 215 mm
Anzahl [-]	4	1	2	1
Mittelwert [N/mm ²]	4,64	4,34	1,87	2,10
Standardabweichung [N/mm ²]	0,54	-	0,54	-
Variationskoeffizient [%]	12%	-	29%	-

Die Vorversuche zeigten, dass die Versuchskonfiguration ablauftechnisch gesehen dazu geeignet ist, Schubversuche durchzuführen, da bei keiner Prüfung die Klebefuge zwischen Probenmaterial und Verstärkungslamelle versagte. An den Lasteinleitungsflächen der Verstärkungslamellen war kein lokales Druckversagen erkennbar. Die durch die Versuchsgeometrie verursachte Exzentrizität der Lastresultierenden führte zu keiner Verdrehung der Versuchskörper durch das entstehende innere Moment.

3.6.3 Berechnungen

Durch den Ersatz der normativ vorgegebenen Stahlplatten zur Lasteinleitung mit Buche-Furnierschichtholzplatten verändert sich die Spannungsverteilung im Versuchskörper während der Belastung. Wegen der breiteren Lasteinleitungsplatten verläuft die Lastresultierende bei

Beibehaltung eines Neigungswinkels von 14° nicht mehr durch den geometrischen Schwerpunkt des Versuchskörpers, womit es zu einer inneren Momentenbelastung kommt. Eine Vergrößerung des Last-Faser-Winkel zur Vermeidung eines inneren Momentes wurde nicht in Erwägung gezogen, da sich dabei der Einfluss der Querdruckspannungen auf die Versagenslast erhöht.

Weiterhin ist die Steifigkeit der Buche-Furnierschichtplatten erheblich geringer als die der Stahlplatten, und somit die Dehnung trotz größerem Querschnitt etwa doppelt so hoch ($A_{\text{BauBuche}} \approx 6 \times A_{\text{Stahl}}$, $E_{\text{BauBuche}} \approx 1/12 \times E_{\text{Stahl}}$), was wiederum einen Einfluss auf die Spannungsverteilung zur Folge hat.

Um den Einfluss der veränderten Versuchskonfiguration abschätzen zu können, wurden Finite-Element-Berechnungen innerhalb des FEM-Programms ANSYS mit dreidimensionalen Simulationsmodellen, mit den unterschiedlichen Lasteinleitungsplatten, durchgeführt. Für die Modellierung der Prüfkörper wurden 20-knotige Volumenelemente SOLID 186 verwendet, welchen ein orthotropes Materialverhalten von Brettschichtholz bzw. Furnierschichtholz zugewiesen wurde. Die Klebefuge wurde als ideal starr angenommen. Die Berechnungen erfolgten ausschließlich im linear elastischen Bereich.

Die zugrundeliegenden Steifigkeitseigenschaften und Querdehnzahlen der Brettschichtholzproben und der Lasteinleitungsplatten aus Buche-Furnierschichtholz wurden entsprechend den Berechnungen in Abschnitt 3.5.2 gewählt. Die Steifigkeitseigenschaft der Lasteinleitungsplatten aus Stahl wurden aus (DIN EN 10025-2:2018-07) zu $E_{\text{mean}} = 210000 \text{ N/mm}^2$ entnommen.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abbildung A- 40 als Schubspannungsverläufe in den Prüfkörpern dargestellt.

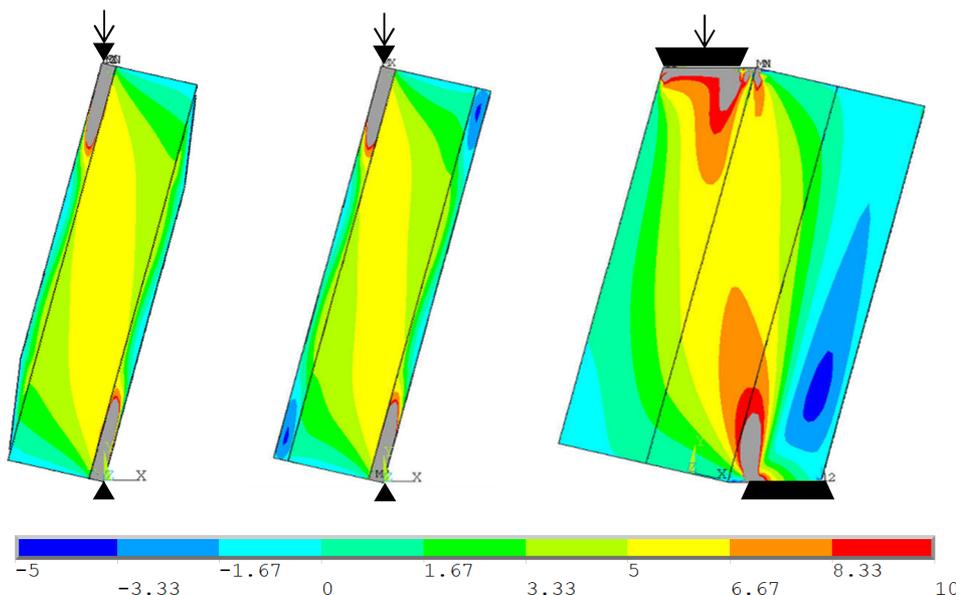


Abbildung A- 40: Vergleich der simulierten Schubspannungsverteilungen im Schubprüfkörper unter Berücksichtigung unterschiedlicher Lasteinleitungsplatten; links: Stahlplatten mit abgeschrägten Enden, Mitte: Stahlplatten ohne abgeschrägte Enden, rechts: Buche-Furnierschichtholzplatten

Die Berechnungen zeigen einen relativ geringen Einfluss der normativ vorgeschriebenen Abschrägung der Lasteinleitungsplatten aus Stahl im Vergleich zu Platten ohne Abschrägung. Beim Einsatz von Buche-Furnierschichtholzplatten ändert sich der Schubspannungsverlauf vor allem im unteren Bereich der Auflagerung.

Im Zuge einer Arbeitsgruppensitzung des projektberatenden Gremiums wurden die Ergebnisse der Vorversuche und der Berechnungen diskutiert. Auf Basis der Ergebnisse wurde entschieden, von der alternativen Verwendung der Lasteinleitungsplatten aus Buche-Furnierschichtholzplatten abzusehen. Grund war der aus den Berechnungen ersichtliche Unterschied in den Spannungsverteilungen im Vergleich zu den normativ vorgesehenen Stahlplatten. Im weiteren Projektverlauf wurden, auch aus Konsistenzgründen zur genannten Prüfmethode, die Schubprüfungen nach EN 408 mit abgeschrägten Stahlplatten durchgeführt.

3.6.4 Herausarbeiten der Schubproben

Die Schubproben für die Schubprüfungen nach DIN EN 408 wurden nach erfolgten Biege-Schubversuchen für die Serien K und O aus Teilen der versagten Biege-Schub-Versuchskörpern herausgearbeitet (Abbildung A- 41). Dafür wurden diese zunächst in kleinere Abschnitte zerlegt (Abbildung A- 42). Ein Abstand zu den im Biege-Schubversuch versagten Bereichen wurde eingehalten, sodass davon ausgegangen werden konnte, dass die Schubproben durch die Belastung der Träger nicht vorgeschädigt waren. Die Schubproben der Serie R wurden aus den vorher abgetrennten Randabschnitten herausgearbeitet.

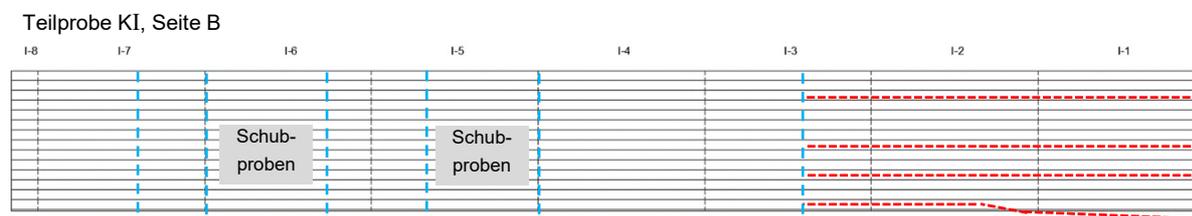


Abbildung A- 41: Entnahme der Schubproben aus Biege-Schub-Versuchskörpern, beispielhafte Darstellung am Träger KI; blau: Teilungsschnitte; rot: Schubbrüche



Abbildung A- 42: Zerlegter Biege-Schub-Versuchskörper KI

Es wurden Schubproben mit mittig angeordneter Klebefuge, sowie Proben innerhalb von Lamellen, gewonnen. Planmäßig wurden keine Proben herausgearbeitet, die eine vorab delaminierte Klebefuge enthielten. Die Entnahmestellen wurden nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewählt:

- Lage (Höhe) eines Schubbruchs in den Biege-Schub-Versuchskörpern während der Biegebelastung
- Durchgehende, ungestörte Lamellen ohne Keilzinkung bzw. Schubversagen in den Biege-Schubversuchskörpern
- Abstand zu lokalen Randdelaminierungen in den Klebefugen
- Vermeidung von Ästen in der Schubprobe
- Abstand zum Trägerrend
- Ausgewogenes Verhältnis der Jahrringlage(n) der Lamelle(n); parallel, senkrecht und unter einem Winkel zur nominellen Scherebene

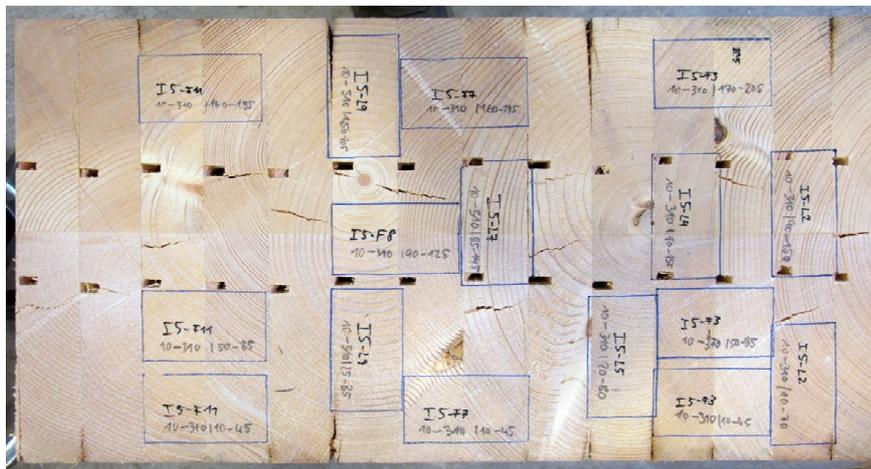


Abbildung A- 43: Aufteilung eines Querschnittssegments im Schubprüfkörper (beispielhaft für Abschnitt 5 des Biege-Schubversuchskörpers KI)

Die Bezeichnung der Schubproben erlaubte es, im Nachhinein den genauen Entnahmeort im jeweiligen Träger nachzuvollziehen.

[Serie] [Träger] [Abschnittsnr.] - [Lamellennr. / Fugenr.]
 [Längslage im Abschnitt (von ... bis) [mm]]
 [Abstand von Seite A (von ... bis) [mm]]

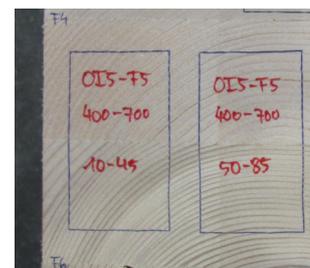


Abbildung A- 44: Bezeichnungssystematik der Schubprüfkörper, rechts: Beispiel

Die Querschnittsmaße der Schubproben in Serie K wichen aufgrund von Randbedingungen wie Lamellendicke und vorhandenen Entlastungsnuten teilweise von dem normativ geforderten Querschnitt der Prüfkörper von $55 \pm 1 \text{ mm} \times 32 \pm 1 \text{ mm}$ ab.

Die Parameter der Schubprüfkörper können Anlage B entnommen werden.

3.6.5 Aufnahme der Materialparameter

Jede Schubprobe wurde mit einer Länge von ca. 330 mm aus den Biege-Schub-Versuchskörpern herausgearbeitet. Somit wurde beim Zuschnitt auf das Längenmaß der Prüfkörper von 300 mm je eine Darrprobe gewonnen, an welcher der Feuchtegehalt jeder Schubprobe festgestellt wurde. Die Jahrringbreiten und Jahrringlage(n) jeder Schubprobe wurden aufgenommen, welche in drei Kategorien (parallel / unter einem Winkel / senkrecht zur nominellen Schub-Versagensebene) eingeteilt wurden. Schon bei der Entnahme wurde auf eine ausgewogene Verteilung der Jahrringlagen geachtet. Ebenfalls wurde nach dem finalen Zuschnitt über die Dimensionen und das Gewicht die Rohdichte jeder Schubprobe bestimmt. Zusätzlich wurden besondere Merkmale (Äste, Risse) dokumentiert.

Die Tabellen 3-9 und 3-10 fassen die statistischen Kenndaten der aus den Schubproben ermittelten Materialparameter Rohdichte und Holzfeuchte zusammen. Hierbei ist anzumerken, dass nicht aus jedem Biege-Schubversuchskörper Schubproben geprüft wurden. Zur Bestimmung der Materialparameter wurden zusätzlich zu den geprüften Prüfkörpern weitere Prüfkörper und Darrproben entnommen, um die Datenbasis zu erweitern.

Tabelle 3-9: Statistische Auswertung des Materialparameters Rohdichte der Schubproben

Teilprobe	n ¹⁾	$\bar{x}(\rho_{u,TP})$ ¹⁾	$\sigma(\rho_{u,TP})$ ²⁾	$VarK(\rho_{u,TP})$ ³⁾	$\bar{x}(\rho_{u,S})$ ⁴⁾	$(\sigma(\rho_{u,S}))$ ⁵⁾	$(VarK(\rho_{u,S}))$ ⁶⁾
	[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]
Serie K	K-I	10	479	34	7,1		
	K-II	-	-	-	-		
	K-III	-	-	-	-	454	
	K-IV	29	447	32	7,1	(31,3)	
	K-V	-	-	-	-	(6,9)	
	K-VI	20	444	34	7,6		
	K-VII	32	458	23	5,0		
	K-VIII	-	-	-	-		
Serie O	O-I	24	473	22	4,7	470	
	O-II	56	470	37	7,9	(31,6)	(6,7)
Serie R	R-I	9	397	47	11,8		
	R-II	10	436	47	10,7		
	R-III	11	449	58	12,8		
	R-IV	4	397	21	5,4	426	
	R-V	10	424	30	7,1	(40,1)	
	R-VI	9	429	37	8,6	(9,4)	
	R-VII	9	429	26	6,0		
	R-VIII	14	422	35	8,3		
	R-IX	10	432	26	5,9		

¹⁾ n : Anzahl der Ergebnisse

²⁾ $\bar{x}(\rho_{u,TP})$: Arithmetisches Mittel der Rohdichten der Schubproben eines Biege-Schubversuchskörpers (Teilprobe)

³⁾ $\sigma(\rho_{u,TP})$: Standardabweichung der Rohdichten der Schubproben eines Biege-Schubversuchskörpers (Teilprobe)

⁴⁾ $VarK(\rho_{u,TP})$: Variationskoeffizient der Rohdichten der Schubproben eines Biege-Schubversuchskörpers (Teilprobe)

⁵⁾ $\bar{x}(\rho_{u,S})$: Arithmetisches Mittel der Rohdichten aller Schubproben einer Serie

⁶⁾ $\sigma(\rho_{u,S})$: Standardabweichung der Rohdichten aller Schubproben einer Serie

⁷⁾ $VarK(\rho_{u,S})$: Variationskoeffizient der Rohdichten aller Schubproben einer Serie

Verglichen mit den in Abschnitt 3.5.3 gelisteten Rohdichten der Biege-Schubversuchskörper liegen die Mittelwerte der Rohdichten der Schubproben unter Berücksichtigung der Messunsicherheit (Wägung, Längenmessung) auf einem vergleichbaren Niveau, ohne systematischen, einseitigen Ausschlag. Jedoch zeigt sich in Serie R, dass durch die lokal selektive Probennahme (innerhalb der Probe und einzelnen Lamellenlagen), und eine relativ geringe Probenanzahl, die Streuung im Vergleich zu der globalen Messung in Abschnitt 3.5.3 steigt. Die relativ hohe Standardabweichung bei den Proben R-I, R-II und R-III erklärt sich durch die Bestimmung der Rohdichte an Lamellenlagen unterschiedlicher Sortierklasse (T 11 und T 22, vgl. Abschnitt 3.2.3).

Tabelle 3-10: Statistische Auswertung des Materialparameters Holzfeuchte der Schubproben

Teilprobe	n ¹⁾	$\bar{x}(HF_{TP})^{1)}$	$\sigma(HF_{TP})^{2)}$	$VarK(HF_{TP})^{3)}$	$\bar{x}(HF_S)^{4)}$ $(\sigma(HF_S))^{5)}$ $(VarK(HF_S))^{6)}$
	[-]	[%]	[%]	[%]	[%] [%] [%]
Serie K	K-I	10	10,0	0,3	3,5
	K-II	-	-		
	K-III	-	-		10,2
	K-IV	29	10,2	0,2	2,2
	K-V	-	-		(0,3)
	K-VI	16	10,4	0,2	2,1
	K-VII	30	10,2	0,2	1,9
	K-VIII	-	-		(2,5)
Serie O	O-I	24	10,4	0,1	1,4
	O-II	40	10,1	0,3	2,9
Serie R	R-I	5	10,3	0,2	1,8
	R-II	8	10,1	0,6	5,9
	R-III	8	10,4	0,2	1,8
	R-IV	-	-		
	R-V	6	11,2	0,6	5,1
	R-VI	5	11,1	0,5	4,3
	R-VII	-	-		
	R-VIII	4	10,7	0,4	3,4
	R-IX	3	10,6	0,7	6,5

¹⁾ n : Anzahl der Ergebnisse

²⁾ $\bar{x}(\rho_{u,TP})$: Arithmetisches Mittel der Holzfeuchten der Schubproben eines Biege-Schubversuchskörpers (Teilprobe)

³⁾ $\sigma(\rho_{u,TP})$: Standardabweichung der Holzfeuchten der Schubproben eines Biege-Schubversuchskörpers (Teilprobe)

⁴⁾ $VarK(\rho_{u,TP})$: Variationskoeffizient der Holzfeuchten der Schubproben eines Biege-Schubversuchskörpers (Teilprobe)

⁵⁾ $\bar{x}(\rho_{u,S})$: Arithmetisches Mittel der Holzfeuchten aller Schubproben einer Serie

⁶⁾ $\sigma(\rho_{u,S})$: Standardabweichung der Holzfeuchten aller Schubproben einer Serie

⁷⁾ $VarK(\rho_{u,S})$: Variationskoeffizient der Holzfeuchten aller Schubproben einer Serie

Die ermittelten Holzfeuchten in den beiden Versuchsreihen lagen bei den Biege-Schubversuchskörpern generell höher als bei den Schubproben ($\Delta = 2-3 \%$). Hier könnten die Unterschiede durch die verwendete Messmethode (elektrische Widerstandsmessung / Darrversuch) begründet sein. Auf Basis des Laborklimas (22 °C, 55 % rel. LF) und einer resultierenden Holzgleichsfeuchte von ca. 10 % erscheint hier der Darrversuch als die verlässlichere Methode.

Die Ergebnisse der Darrversuche wurden hinsichtlich der Feuchteverteilung über die Querschnittsbreite betrachtet. Hier wurden Unterserien herangezogen, bei denen Schubprüfkörper aus einer horizontalen Querschnittsebene im gleichen Abschnitt entnommen wurden. Eine Gradienten in den Holzfeuchten der Bestandsproben war nicht erkennbar, was aufgrund der langen Lagerzeit der Proben im konstanten Klima auch nicht zu erwarten war. Auch bei den Referenzproben war keine Gradienten ersichtlich, was hier aufgrund der Konditionierung der einzelnen Lamellen im Zuge der Fertigung zu erwarten war. Die Annahme

in Abschnitt 3.2 einer gleichmäßigen Feuchteverteilung wurde bestätigt. Es war davon auszugehen, dass ein zusätzlicher Einfluss von feuchteinduzierten Querspannungen auf die Schubfestigkeit des Probenmaterials vernachlässigbar war, und daher in den Auswertungen nicht weiter betrachtet wurde.

3.6.6 Herstellung der Prüfkörper

Die Schubproben wurden beim Abschnitt der Darrproben auf die normativ geforderte Länge von 300 mm gekürzt. Im Falle einer Maßabweichung der Querschnittsbreite wurde durch eine Anpassung der Probenlänge erreicht, dass der in der Norm vorgeschriebene Winkel von 14° zwischen Prüfkörperachse und Belastungsrichtung eingehalten wurde.

Zur Lasteinleitung in die Schubprüfkörper wurden mit Hilfe einer Pressvorrichtung die normativ vorgeschriebene Stahlplatte mit einer Dicke von 10 mm und einem abgeschrägten Ende auf die Schubproben aufgeklebt. Zur Anwendung kam ein 1-Komponenten PU Klebstoff, der für eine Verklebung von Holz mit Stahl geeignet ist.

Vor der Verklebung wurden die Stahloberflächen blank geschliffen. Bei Prüfungen mit hohen Maximallasten traten Brüche der Klebeverbindung Holz-Stahl auf. In Folge wurden die zu verklebenden Stahloberflächen sandgestrahlt und entfettet, um eine bessere Haftung des Klebers zu erreichen. Nachdem sich wiederum Holz-Stahl-Brüche einstellten, wurden in den Serien O und K ein Teil der Schubproben an der integrierten Klebefuge künstlich durch Fräsen einer Nut verjüngt (siehe Abbildung A- 45), um einen Bruch im Holz / in der Klebefuge zu provozieren.



Abbildung A- 45: Schubprüfkörper mit verjüngter Breite durch Fräsen eine Nut

3.6.7 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden gemäß DIN EN 408 in einer Universalprüfmaschine am MPA BAU, TUM durchgeführt (Abbildung A- 46). Der Lasteintragswinkel von 14° wurde durch Stahlformteile an den Lasteinleitungspunkten sichergestellt. Die weggeregelte Belastungsgeschwindigkeit wurde aus Vorversuchen so gewählt, dass die Maximallast F_{\max} innerhalb von 300 ± 120 s erreicht wurde.



Abbildung A- 46: Versuchsaufbau Schubversuche nach EN 408

3.6.8 Aufnahme der Bruchflächen

Nach erfolgter Prüfung wurden die Scherflächen der Prüfkörper begutachtet. Dabei wurden folgende Parameter aufgenommen:

- Wahre Breite der Scherfläche im Fall, dass die Bruchfläche nicht orthogonal zur Seitenfläche des Prüfkörpers lag
- Anteil des Holzbruchs parallel zur Jahrringlage
- Anteil des Holzbruchs senkrecht zur Jahrringlage
- Anteil des Klebstoffbruchs in einer vorhandenen Klebefuge zwischen zweier Lamellen
- Bruchflächenabzug durch bestehende Risse, Löcher oder bestehende Delaminierungen von Klebefugen
- Anteil der Fläche eines evtl. beobachteten Versagens in der Klebefuge Holz - Lasteinleitungsplatte
- Sonstige Unregelmäßigkeiten

3.6.9 Versuchsergebnisse

Insgesamt wurden 201 Schubversuche nach (DIN EN 408:2012-10) durchgeführt. Die Auswertung der Schubfestigkeiten erfolgte nach der genormten Berechnungsmethodik zu

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

In Abbildung A- 47 sind die aus den Prüfungen ermittelten Schubfestigkeiten dargestellt. Es sind auch solche Prüfkörper enthalten, die den normativen Abmessungen nicht entsprachen.

Nicht mit einbezogen sind Prüfkörper, bei denen ein Schubbruch in der Klebefuge der aufgeklebten Lasteinleitungsplatten, mit einem Anteil von mehr als 20% an der gesamten Bruchfläche, auftrat.

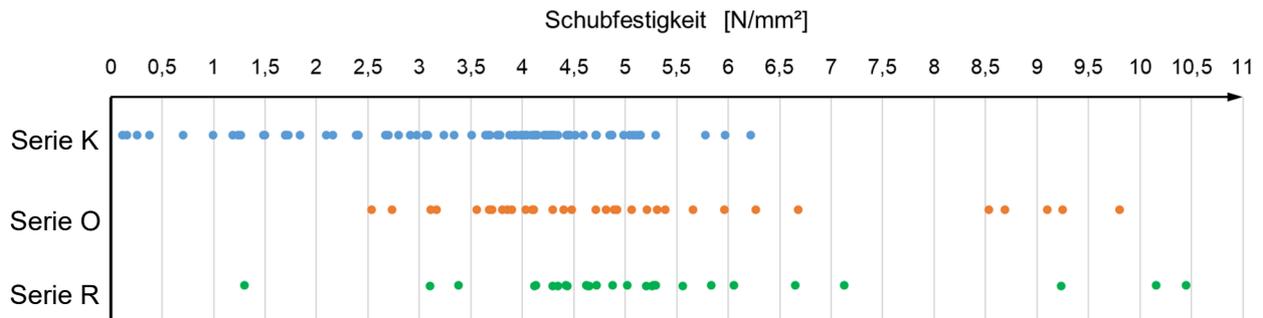


Abbildung A- 47: Schubfestigkeiten der nach EN 408 geprüften Schubprüfkörper

Bei den weiteren Auswertungen wurden die Prüfergebnisse nach bestimmten Gesichtspunkten gefiltert.

Um den Einfluss der Materialparameter Rohdichte und Holzfeuchte auf die Schubfestigkeit der untersuchten Proben abschätzen zu können, wurden die Bestimmtheitsmaße auf Basis einer linearen Regression betrachtet. Für diese Betrachtung wurden Prüfergebnisse herangezogen, die an Prüfkörpern ohne Abweichung von den normativen Vorgaben ermittelt wurden. In Abbildung A- 48 sind die Schubfestigkeiten jeweils über die Rohdichte und Holzfeuchte der Proben aufgetragen, und das Bestimmtheitsmaß angegeben.

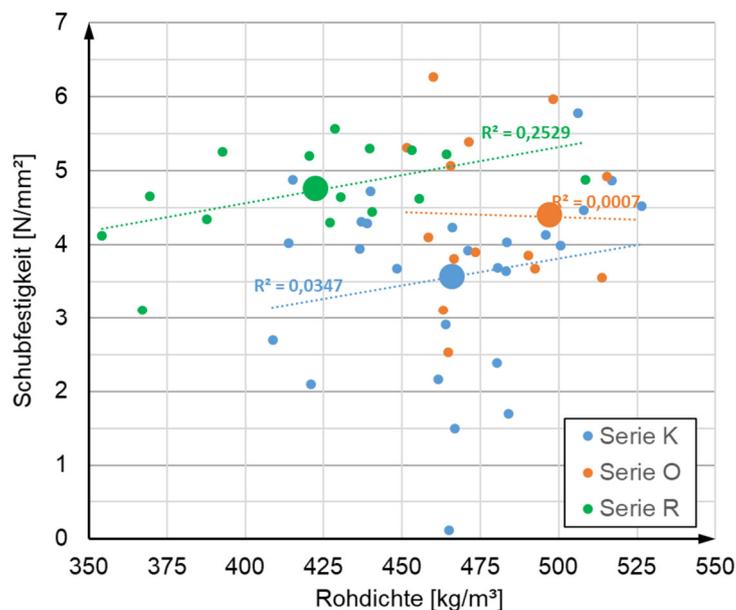


Abbildung A- 48: Zusammenhang zwischen Schubfestigkeit und Rohdichte des untersuchten Probenmaterials

Eine Korrelation von Scherfestigkeit und Rohdichte ist bei den Serien K und O, mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 unter 5%, nicht gegeben. Lediglich die Rohdichteniveaus der Schubproben in Serie R scheinen einen Einfluss auf die Schubfestigkeiten zu haben, jedoch liegt das Bestimmtheitsmaß mit 25,3 % relativ niedrig. Die Literatur beschreibt einen positiven Zusammenhang der beiden Materialparameter (Niemz/Sonderegger 2017; Kollmann 1951). Gründe für die nicht ersichtliche Korrelation könnten die geringe Stichprobenanzahl, und/oder eine dominantere Ausprägung einer nebenstehenden Materialeigenschaft sein. Im Hinblick auf die Bestimmtheitsmaße ist zu beachten, dass in dieser Auswahl die Schubfestigkeiten in Serie R weniger streuen als in den anderen beiden Serien ($s_R = 0,60 < s_O = 1,06 < s_K = 1,27$).

Wie in Abbildung A- 48 ersichtlich, lagen die Werte der Rohdichten bei den Schubproben der Serie R auf einem etwas niedrigeren Niveau als bei den Serien K und O. Zur Veranschaulichung ist der gebildete Mittelwert dargestellt.

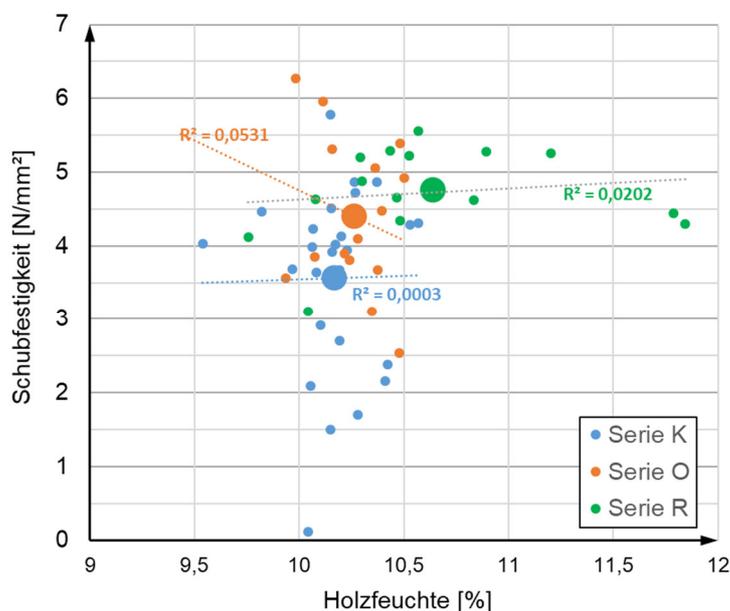


Abbildung A- 49: Zusammenhang zwischen Schubfestigkeit und Holzfeuchte des untersuchten Probenmaterials

Eine Abhängigkeit der Schubfestigkeiten von den Holzfeuchten ist in keiner der drei Serien ersichtlich. Im Hinblick auf die geringe Bandbreite der Werte der Holzfeuchten war dies zu erwarten.

In Folge wurden weitere Einflussfaktoren auf die Prüfergebnisse abgeschätzt. In allen weiteren Auswertungen wurden Prüfkörper, bei denen die Schubbruchfläche mehr als 20 % in der Grenzschicht von Schubprobe zu einer Lasteinleitungsplatte lag, nicht berücksichtigt.

So wurde untersucht, in wieweit sich die Verjüngung der Prüfkörperbreite durch Fräsen einer Nut auf die erreichte Schubfestigkeit auswirkte. Hier wurden Prüfkörper ausgewählt, in denen eine vorhandene Klebefuge nicht, bzw. nur gering, am Schubversagen beteiligt war. Ebenso wurde ein Vergleich der Schubfestigkeiten aus Schubbrüchen zum Teil in einer Klebefuge,

bzw. ausserhalb einer Klebefuge, angestellt. In Abbildung A- 50 sind die statistischen Kennwerte dargestellt.

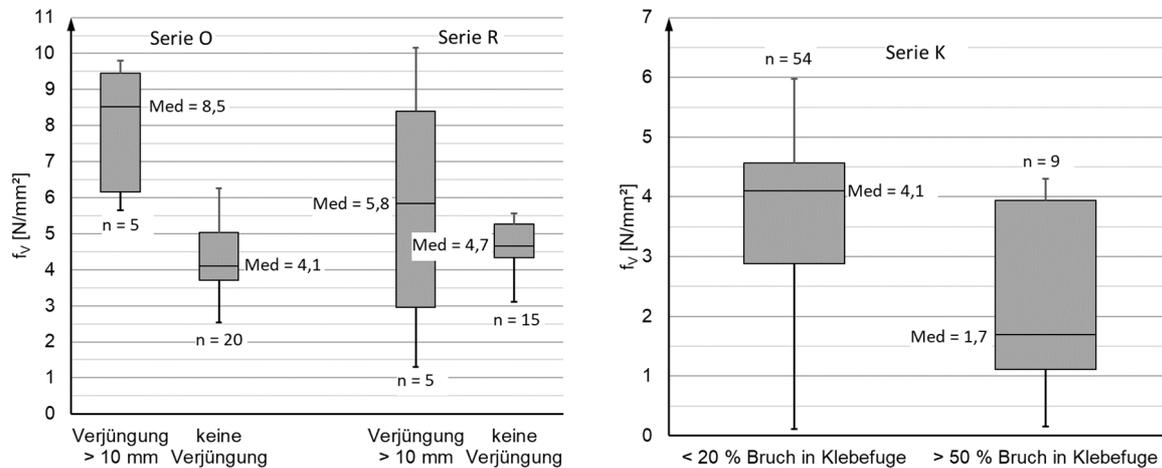


Abbildung A- 50: Statistischer Vergleich der Einflussfaktoren „Querschnittsverjüngung“ und „Klebefugenbruch“ auf die Ergebnisse der Schubprüfungen nach EN 408

Es zeigt sich, dass die ermittelten Schubfestigkeiten bei einer Verjüngung des Prüfkörperquerschnitts, und damit der wirksamen Schubfläche, tendenziell höher liegen. Durch die künstliche Auswahl der Schubbruchfläche, und die kleinere, wirksame Querschnittsbreite, verringert sich die Wahrscheinlichkeit eines Einflusses von Fehlstellen. Der Effekt ist bei Serie O deutlicher ausgeprägt als bei Serie R. An dieser Stelle sei angemerkt, dass im Fall eines Bruches ohne Beteiligung der Einfräsung bei der Berechnung nicht die verringerte, sondern die ursprüngliche Querschnittsbreite angesetzt wurde.

Der Einfluss eines Klebstoffbruchs auf die Schubfestigkeit ist ebenfalls klar erkennbar. Der Median der Schubfestigkeiten liegt bei Schubbrüchen zum Teil in der Klebefuge am Bruch deutlich niedriger, zudem steigt die Streuung an. Da hier Ergebnisse der Serie K ausgewertet wurden, ist dies ein deutliches Indiz dafür, dass bei diesem Probenmaterial die Schubfestigkeit der Klebefuge unter der Schubfestigkeit des Holzes lag.

Da es bei den Biege-Schubversuchskörpern aufgrund der Lamellenstärke von 30 mm und den vorhandenen Entlastungsnuten nicht konsequent möglich war, Schubproben mit normativen Maßen herauszuarbeiten, waren bei einigen Proben die Querschnittsmaße verringert. So wurde ein Vergleich zwischen normgerechten Prüfkörpern und Prüfkörpern mit Untermaß angestellt. Abbildung A- 54 lässt einen geringen Einfluss durch einen evtl. auftretenden Größeneffekt vermuten, jedoch weniger stark als bei einer Verjüngung der Prüfkörperbreite durch Einfräsen einer Nut.

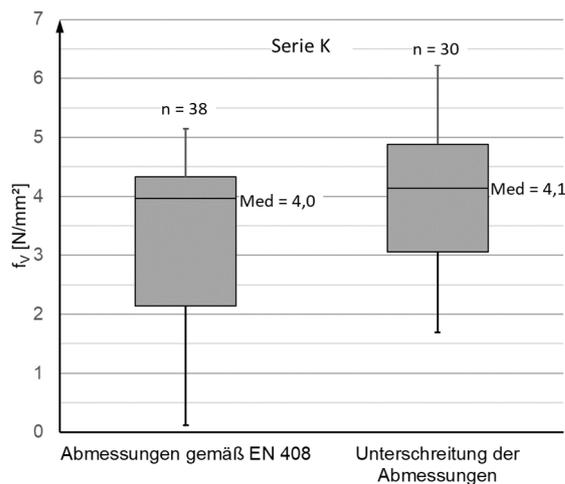


Abbildung A- 51: Statistischer Vergleich des Einflussfaktors „von EN 408 abweichende Querschnittsmaße“

Zur Bestimmung der Schubfestigkeit des Probenmaterials nach EN 408 wurden demnach Prüfergebnisse ausgewählt, auf die weder eine Verjüngung des Querschnitts, noch eine im Prüfkörper vorhandenen Klebefuge, einen Einfluss hatte. Auch die normativen Prüfkörperabmessungen wurden eingehalten. Abbildung A- 52 zeigt die statistische Auswertung der Prüfergebnisse.

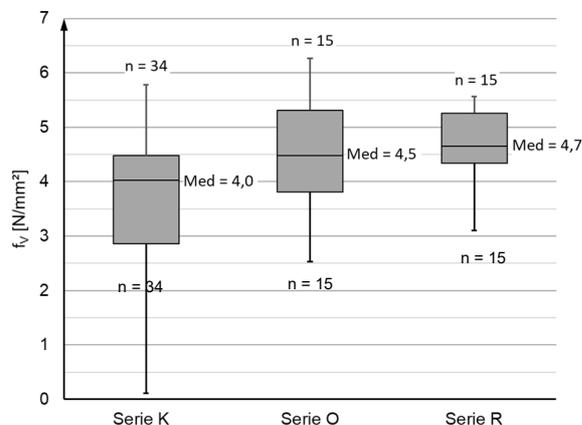


Abbildung A- 52: Statistischer Vergleich Auswertung der aus den Schubprüfungen nach EN 408 ermittelten Schubfestigkeiten des Probenmaterials

Das Gefälle der Mediane der Schubfestigkeiten zwischen den Serien K, O und R korreliert scheinbar mit dem Alter des Materials. Jedoch liegen die Mediane der Serie O geringfügig niedriger im Vergleich zur Serie R und somit konträr zu den Mittelwerten der errechneten Schubfestigkeiten bei den Biege-Schubversuchen. Hier lagen der Mittelwert der Schubfestigkeiten aus Serie O auf einem etwas höherem Niveau. Allerdings war die Anzahl der auswertbaren Ergebnisse der Schubprüfungen (15 Werte) relativ gering, somit sind die statistischen Werte der Schubprüfungen relativ instabil.

3.7 Scherversuche nach DIN EN 14080, Anhang D

3.7.1 Allgemeines

Die Scherprüfungen am vorhandenen Probenmaterial wurden gemäß DIN EN 14080, Anhang D an entnommenen Bohrkernen von 35 mm Durchmesser durchgeführt. Dabei wurden die Bohrkernproben in einer Schervorrichtung parallel zur nominellen Scherfläche bis zum Bruch belastet und die Maximalkräfte aufgezeichnet.

3.7.2 Herausarbeitung der Prüfkörper

Vergleichbar mit den Angaben in Kapitel 3.6.4 wurden die Bohrkernproben nach erfolgten Biege-Schubversuchen für die Serien K und O aus Teilen der versagten Versuchskörpern, und bei der Serie R aus Teilen der versagten Versuchskörpern bzw. aus vorher abgetrennten Abschnitten, herausgearbeitet. Dabei wurden, soweit möglich, aus beiden Teilprobenseiten gegenüberliegende Bohrkernproben entnommen.

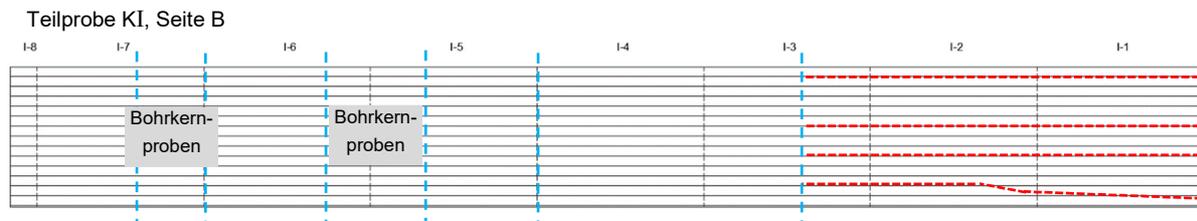


Abbildung A- 53: Entnahmestellen der Bohrkern-Scherproben aus den Biege-Schub-Versuchskörpern, beispielhaft Träger I; blau: Teilungsschnitte; rot: Schubbrüche

Die Entnahmestellen wurden nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewählt:

- Korrespondierende Klebefugen der angrenzend entnommenen Schubproben
- Lage (Höhe) eines Schubbruchs während der Biege-Schubversuche
- Durchgehende, ungestörte Lamellen ohne Keilzinkung bzw. Schubversagen in den Biege-Schubversuchskörpern
- Lokale Randdelaminierung in den Klebefugen
- Vermeidung von Ästen in der Scherprobe

Unter Laborbedingungen konnten die Bohrkernproben mit einer Ständerbohrmaschine aus dem Probenmaterial entnommen werden. Dadurch lagen die Klebefugen annähernd mittig in den Bohrkernen. Weiterhin konnten Bohrkernlängen bis zu 95 mm realisiert werden, was bei beidseitiger Entnahme mehr als 80% der Trägerbreite abdeckte. Ein geeigneter Stopfenbohrer stellte einen einheitlichen Durchmesser von 35 mm sicher.

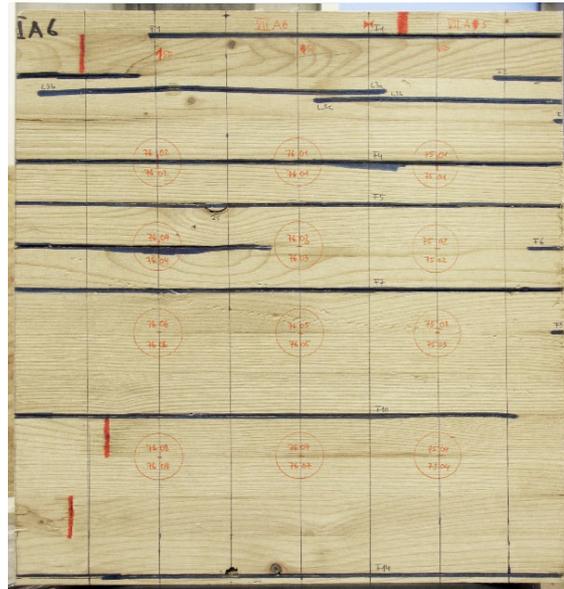


Abbildung A- 54: Entnahmestellen von Scherprüfkörpern (beispielhaft für Abschnitt KVII-A6)



Abbildung A- 55: Ausbohren der Bohrkerne auf einer Ständerbohrmaschine

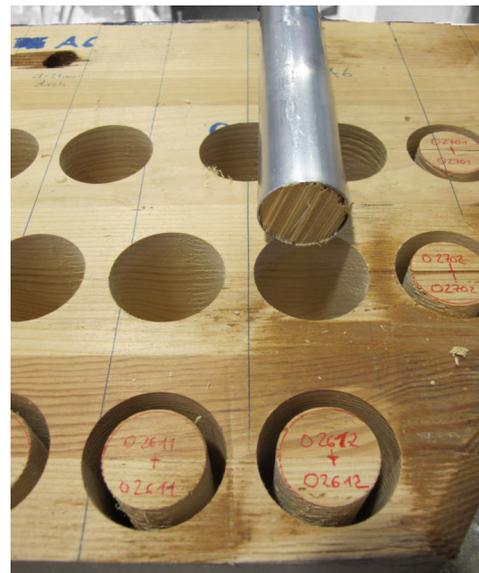


Abbildung A- 56: Ausbrechen der Bohrkerne mit einem Rohr $d = 35,2$ mm

Die Benennung der Scherproben erlaubte es, im Nachhinein, zusammen mit der Aufzeichnung der horizontalen Lage im Abschnitt (von ... bis mm), den genauen Entnahmeort im jeweiligen Träger nachzuvollziehen.

[Serie] [Träger] [Abschnittnr.] [laufende Bohrkernnr.]
 (wobei Bohrkern von Seite A mit laufender Nr. 01-19, Bohrkern von Seite B mit laufender Nr. 20-39 bezeichnet wurden)

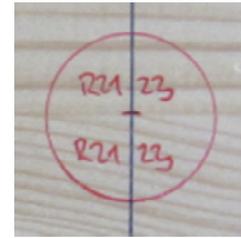


Abbildung A- 57: Benennungssystematik der Bohrkern-Scherproben, rechts: Beispiel

Zur Prüfungsvorbereitung wurde an jedem entnommenen Bohrkern die innere Abbruchfläche per Sägeschnitt begradigt. Zudem wurden gemäß DIN EN 14080, Anhang D senkrecht zur Klebefuge zwei Zylindersegmente abgeschnitten, um plane Flächen zur Lasteinleitung herzustellen. Vorab delaminierte Fugen im Randbereich der Bohrkernproben wurden nicht abgekappt. Bei der Belastung der Prüfkörper wurden diese Bohrkernabschnitte mit belastet. Der Belastungsschwerpunkt lag jedoch immer mittig der intakten Klebefuge.

Die Norm gibt Maße für den Bohrkernzuschnitt an. Bei einem planmäßig mit einem Durchmesser von (35 ± 5) mm entnommenen Bohrkern sind dies:

- $a = (23 \pm 5)$ mm
- $l = 50$ mm bis 120 mm
- $t = (26 \pm 3)$ mm

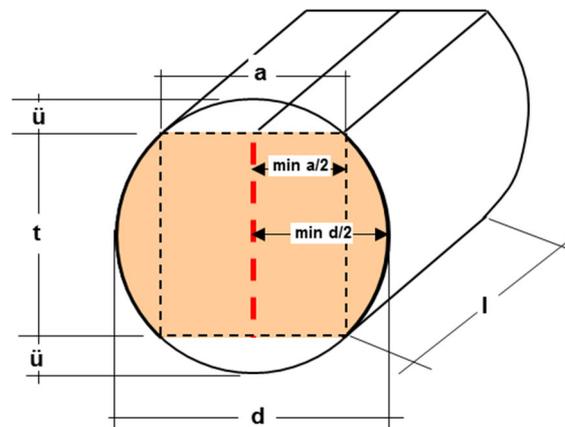


Abbildung A- 58: Bohrkern-Scherkörpergeometrie

Unter Laborbedingungen konnten das Maß t mit einer Toleranz von ± 1 mm eingehalten werden.

3.7.3 Materialparameter

Jeder Scherprüfkörper wurde nach dem Zuschnitt mit einem Messschieber vermessen und gewogen, um die Rohdichte festzustellen. Die Tabelle 3-11 fasst die statistischen Kenndaten des aus den Scherprüfkörpern ermittelten Materialparameters Rohdichte zusammen.

Tabelle 3-11: Statistische Auswertung des Materialparameters Rohdichte der Scherprüfkörper

Teilprobe	n ¹⁾	$\bar{x}(\rho_{u,TP})$ ¹⁾	$\sigma(\rho_{u,TP})$ ²⁾	$VarK(\rho_{u,TP})$ ³⁾	$\bar{x}(\rho_{u,S})$ ⁴⁾	$(\sigma(\rho_{u,S}))$ ⁵⁾	$(VarK(\rho_{u,S}))$ ⁶⁾
	[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]
Serie K	K-I	24	508	38	7,6		
	K-II	-					
	K-III	-				464	
	K-IV	29	459	41	8,8	(38,7)	
	K-V	12	431	16		(8,3)	
	K-VI	31	440	20	4,5		
	K-VII	47	469	26	5,5		
	K-VIII	12	464	50	7,6		
Serie O	O-I	46	480	19	4,0	483	
	O-II	52	485	24	4,9	(21,7)	(4,5)
Serie R	R-I	10	390	42	10,7		
	R-II	8	516	72	13,9		
	R-III	12	513	16	3,0		
	R-IV	9	403	15	3,7	441	
	R-V	10	414	10	2,4	(52,1)	
	R-VI	10	436	40	9,1	(11,8)	
	R-VII	10	402	11	2,8		
	R-VIII	6	442	12	2,7		
	R-IX	16	447	7	1,5		

¹⁾ n : Anzahl der Ergebnisse

²⁾ $\bar{x}(\rho_{u,TP})$: Arithmetisches Mittel der Rohdichten der Scherprüfkörper eines Biege-Schubversuchskörpers (Teilprobe)

³⁾ $\sigma(\rho_{u,TP})$: Standardabweichung der Rohdichten der Scherprüfkörper eines Biege-Schubversuchskörpers (Teilprobe)

⁴⁾ $VarK(\rho_{u,TP})$: Variationskoeffizient der Rohdichten der Scherprüfkörper eines Biege-Schubversuchskörpers (Teilprobe)

⁵⁾ $\bar{x}(\rho_{u,S})$: Arithmetisches Mittel der Rohdichten aller Scherprüfkörper einer Serie

⁶⁾ $\sigma(\rho_{u,S})$: Standardabweichung der Rohdichten aller Scherprüfkörper einer Serie

⁷⁾ $VarK(\rho_{u,S})$: Variationskoeffizient der Rohdichten aller Scherprüfkörper einer Serie

Eine Bestimmung der Holzfeuchte mittels Darrversuch erfolgte nicht, da die Holzfeuchten der in unmittelbarer Nähe herausgearbeiteten Schubprüfkörper bestimmt wurden, und von einer entsprechenden Feuchte im Probenmaterial ausgegangen werden konnte. Eine weitere Konditionierung der Scherprüfkörper im Normklima vor der Prüfung erfolgte nicht.

3.7.4 Versuchsdurchführung

Die Versuche fanden in einer Universalprüfmaschine am MPA BAU, TUM statt. Die verwendete Schervorrichtung (siehe Abbildung A- 59) war in der Lage, Scherprüfkörper bis zu einer Länge von 100 mm mit gleichmäßigem Lasteintrag auf die Anschnitte der Bohrkerne zu belasten. Zu diesem Zweck war die untere Lasteinleitungsplatte in einer Halbschale beweglich gelagert. Prinzipiell liefen die Kanten der Lasteinleitungsplatten bündig aneinander vorbei, durch die minimal variierende Lage der Scherfuge (=Klebefuge) in den Scherprüfkörpern ergaben sich bei der Belastung Abstände einer Belastungskante zur Scherfuge von maximal 0,5 mm. Die weggeregelt Belastungsgeschwindigkeit wurde aus Vorversuchen so gewählt,

dass die Maximallast F_{\max} in nicht weniger als 20 s erreicht wurde, was der normativen Vorgabe entsprach. Diese Zeit wurde bei wenigen Scher-Prüfkörpern aufgrund einer geringen Scherfestigkeit unterschritten und vermerkt, dies wurde für die Auswertung jedoch als unkritisch angesehen.

Während des Versuches wurden die Kraft und die Relativverformung der Lasteinleitungsplatten kontinuierlich aufgezeichnet. Das Versagen war definiert als der Zeitpunkt, bei dem ein Lastabfall von mehr als 80% der Höchstlast aufgezeichnet wurde.

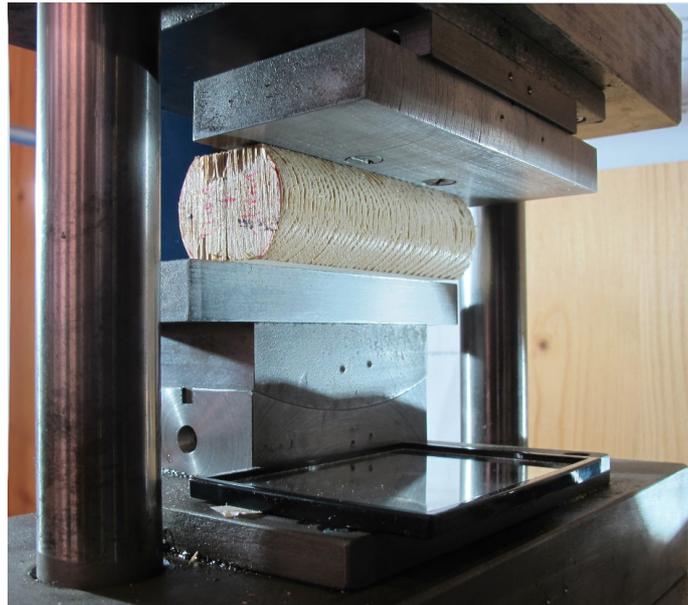


Abbildung A- 59: Versuchsaufbau der Scherprüfungen

3.7.5 Aufnahme der Bruchflächen

Direkt nach erfolgter Prüfung wurden die nun freiliegenden Scherflächen der Prüfkörperhälften begutachtet. Dabei wurden folgende Parameter aufgenommen:

- Anteil des Holzfaserbruchs, bestimmt durch zwei unabhängige Personen
- Bruchflächenabzug durch Entlastungsnuten
- Bruchflächenabzug durch vorab delaminierte Randbereiche der Klebefugen
- Merkmale wie Äste oder Harzgallen in der Scherfläche

Bei den Scherprüfkörpern der Serie K konnten die unterschiedlichen Bereiche „Holzfaserbruch“, „Klebstoffbruch“ und „Bestehende Delaminierung der Klebefuge“ durch die Farbe des Klebstoffes und die dunkle Färbung der Vorab-Delaminierung visuell gut unterschieden werden (Abbildung A- 60). Bei Serie O war eine Vorab-Delaminierung ebenfalls erkennbar (Abbildung A- 61). Die Holzfaserbruchanteile der Serie O und R waren farblich nicht zu unterscheiden. Hier zeigte sich bereits die im Vorfeld beschriebene Problematik der Abgrenzung der verschiedenen Arten der Bruchflächen.

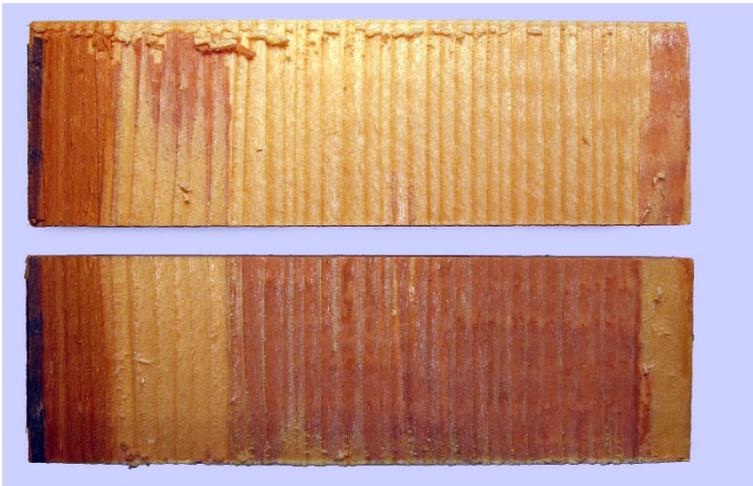


Abbildung A- 60: Scherflächen des Scherprüfkörpers K1703; links: Vorab-Delaminierung



Abbildung A- 61: Scherflächen des Scherprüfkörpers O2622; links: Vorab-Delaminierung

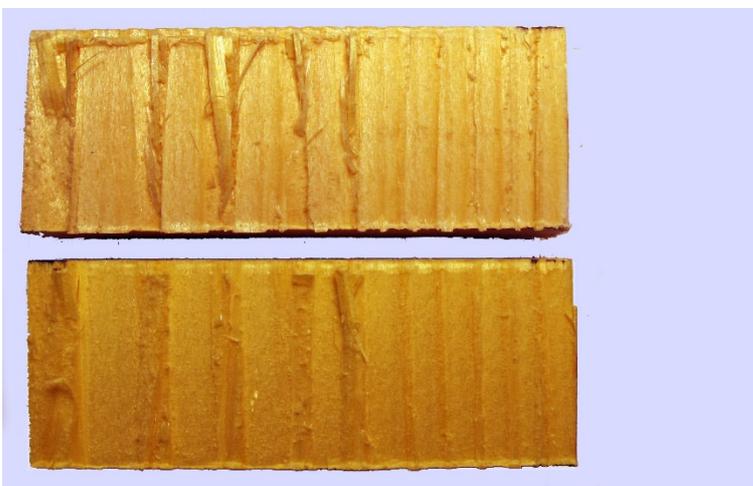


Abbildung A- 62: Scherflächen des Scherprüfkörpers R9025

3.7.6 Versuchsergebnisse

Die Scherfestigkeit der belasteten Bohrkern-Scherprüfkörper wurde berechnet zu

$$f_v = k_v \cdot \frac{F_u}{A}$$

mit

F_u : Bruchlast

A : Scherfläche mit $A = l_{PK} \cdot t_{PK}$

k_v : Faktor zur Berücksichtigung einer Dicke der Scherfläche in Faserrichtung weniger als 50 mm

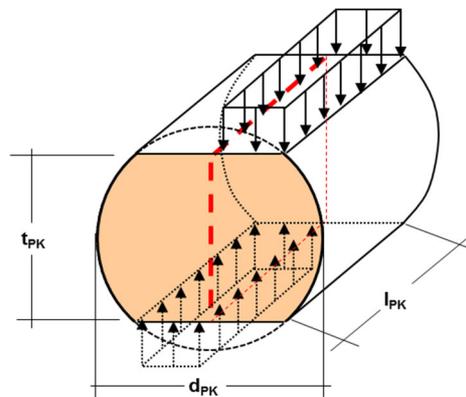


Abbildung A- 63: Belastung eines Bohrkern-Scherprüfkörper (schematisch)

Bei Prüfkörpern, die eine vorab teilweise delaminierte Klebefuge aufwiesen, wurde bei der Berechnung der Scherfläche die Tiefe der Delaminierung von der Länge des Prüfkörpers abgezogen.

Der Faktor k_v gemäß (DIN EN 14080:2013-09) normiert die Höhe der Scherfläche t_{PK} auf ein Maß von 50 mm. Da die Höhe der Scherfläche aller Prüfkörper im Bereich von (26 ± 1) mm lag, war der Einfluss auf die Ergebnisse gering. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit weiteren Versuchsreihen zu ermöglichen, wurde er jedoch in den folgenden Auswertungen mitberücksichtigt.

Eine Übersicht der gewonnenen Messdaten „Scherfestigkeit“ und „Holzfaserbruchanteil“ kann Abbildung A- 64 entnommen werden. In der Grafik sind zudem die Grenzlinien für die Bewertung der Ergebnisse nach EN 14080 eingetragen.

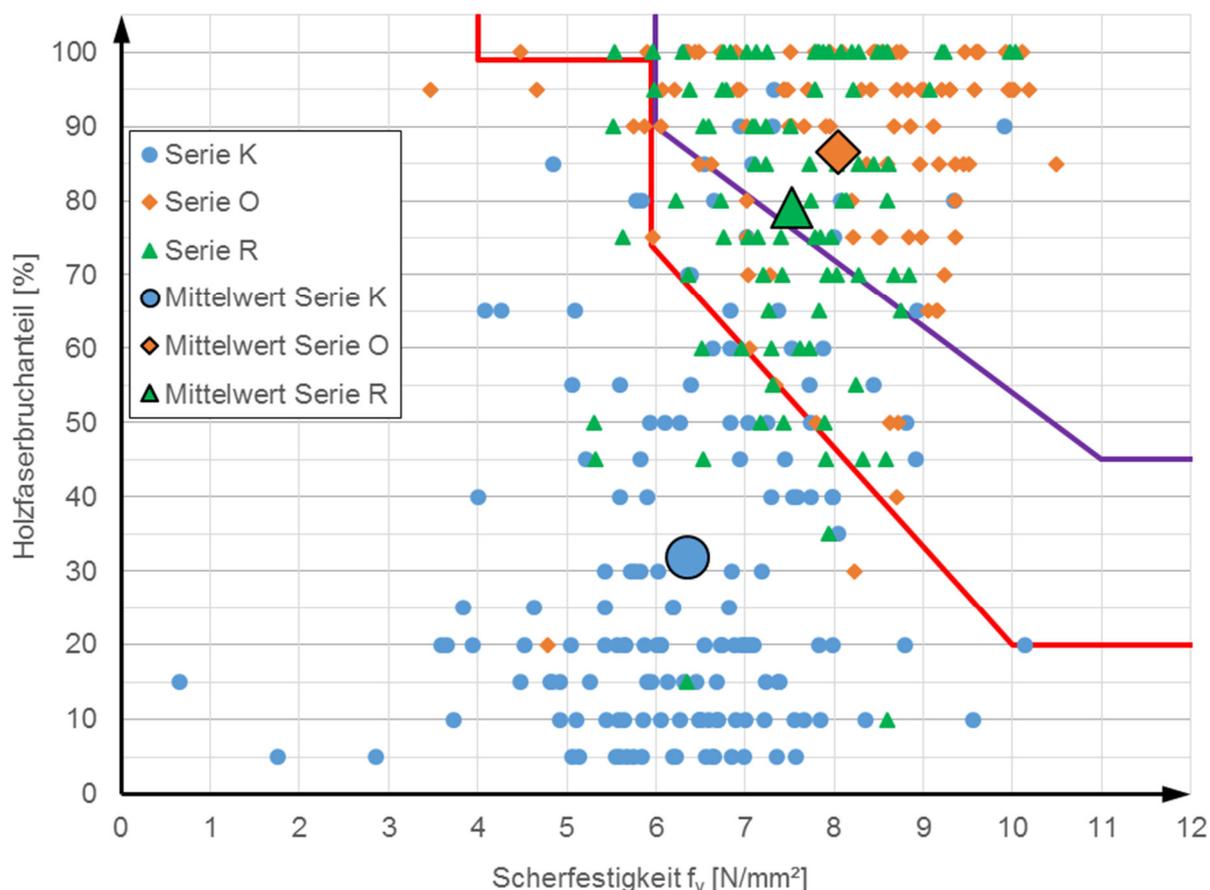


Abbildung A- 64: Übersicht der Ergebnisse der Bohrkern-Scherprüfungen; graphische Darstellung der Grenzlinien des Annahmekriteriums für Bohrkern-Scherprüfkörper aus der Relation der Bohrkern-Scherfestigkeit zum Holzfaserbruchanteil gemäß EN 14080 (rot: Grenzlinie für Einzelwerte; violett: Grenzlinie für Mittelwerte)

Bei allen Einzelwerten aus den Bohrkern-Scherprüfungen, die rechts von der roten Linie liegen, gilt die Anforderung hinsichtlich der Scherfestigkeit und des prozentualen Holzfaserbruchanteils als erfüllt, Wertepaare links der roten Linie erfüllen die Anforderung nicht. Unabhängig vom Holzfaserbruchanteil werden alle Scherprüfkörper mit Einzelwerten unter 4 N/mm² als nicht bestanden bewertet.

Man sieht, dass die Einzelergebnisse der Serien O und R überwiegend rechts, die Ergebnisse der Serie K überwiegend links der roten Grenzlinie liegen. In Bezug auf die Grenzwerte in EN 14080 erfüllen einzelne Bohrkern aus allen drei Serien die Anforderungen an die Einzelwerte nicht, selbst in Serie R mit Proben aus neu produziertem Brettschichtholz liegen einige Werte links von der roten Linie.

Die violette Linie stellt die Grenzlinie gemäß den Anforderungen in EN 14080 an die Mittelwertpaare dar. Mittelwerte der Scherfestigkeit aller Bohrkern einer Serie < 6 N/mm² gelten, unabhängig vom Holzfaserbruchanteil, als nicht bestanden. Hier erfüllen die Mittelwerte der Bohrkern-Scherfestigkeiten der Serien O und R die Anforderung, sie liegen rechts der

Grenzlinie. Bei Serie R ist der Abstand zur Grenzlinie relativ gering. Der Mittelwert der Scherfestigkeit der Serie K erfüllt die Anforderung nicht.

Nun lässt sich abwägen, in wieweit das Bewertungsschema eine definitive Aussage über den Zustand der Klebefugen zulässt. Im Fall der Serie K erscheint das Ergebnis eindeutig, es entspricht auch der allgemeinen Beurteilung des Probenmaterials vorab und der Erfahrung eines kritischen Zustandes der Tragfähigkeit der Konstruktion beim Rückbau. In Serie O liegt der Mittelwert in gutem Abstand zur Grenzlinie, auch wenn wenige Einzelwerte die Anforderung nicht erfüllen. Insbesondere die Ergebnisse der Serie R öffnen Raum zur Diskussion. Das Probenmaterial wurde, in einem zur Herstellung von Brettschichtholz zertifizierten Betrieb, neu produziert, dennoch erfüllt der Mittelwert die Anforderung nur knapp. Mehrere Einzelwerte erfüllen die entsprechende Anforderung nicht, wobei alle Einzelwerte der Scherfestigkeit über der Mindestgrenze von 4 N/mm^2 liegen. Hier entscheidet also die Aufnahme des Holzfaserbruchanteils, ob die Anforderung nach EN 14080 erfüllt wird. Der Holzfaserbruchanteil wurde bei allen Scherprüfkörpern durch zwei unabhängige Mitarbeiter (Person A und Person B) durch visuelle Begutachtung der beiden Scherflächen bestimmt (im Folgenden Bestimmungsreihen genannt). Durch den geringen Farbunterschied von Holzbruchflächen und Klebstoffbruchflächen (ohne weitere Einfärbung), und die ungenügende Präzisierung der Methode zur Bestimmung, streuten die Ergebnisse der beiden Bestimmungsreihen mitunter stark (Abbildung A- 65).

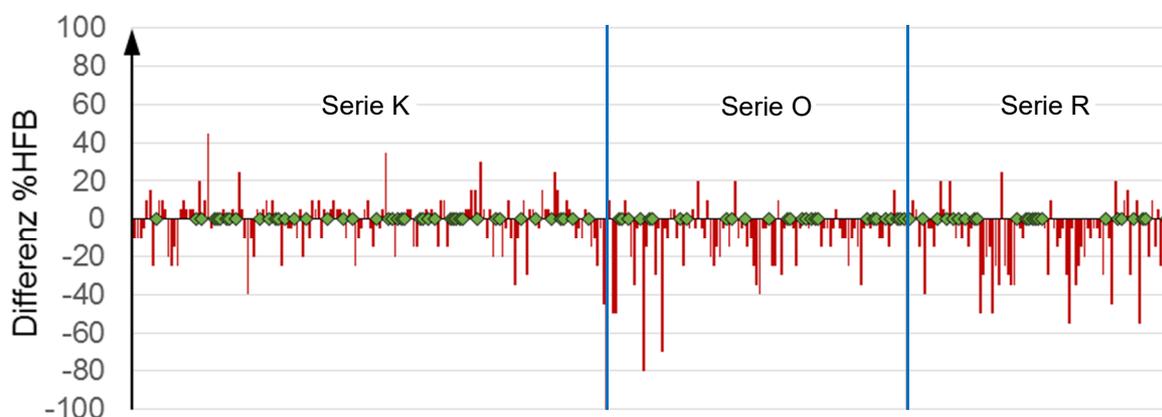


Abbildung A- 65: Differenzen der Werte bei der Bestimmung des Holzfaserbruchanteils an den Bohrkern-Scherproben der Serien K,O, und R; grüne Markierungen: keine Differenz

Zu bemerken ist, dass bei den Holzfaserbruchflächen der Serie K die Unterschiede in den Bestimmungsreihen weniger streuen, und sich die Ausschläge in etwa gleichermaßen in beide Richtungen bewegen. Dies zeigt sich auch in den sehr nahe beieinanderliegenden, statistischen Kenndaten der Serie K (siehe Tabelle 3-12). Bei den Serien O und K ist erkennbar, dass die Differenz der Werte aus zwei Bestimmungsreihen in eine Richtung tendiert. Somit wurde von Person A tendenziell ein höherer Wert des Holzfaserbruchanteils aufgenommen als von Person B. Jedoch kann hier unter Beachtung der Ausschläge in die

andere Richtung nicht von einem systematischen, unter Umständen korrigierbaren Fehler ausgegangen werden.

Tabelle 3-12: Statistische Auswertung der Bestimmung des Holzfaserbruchanteils durch zwei unabhängige Personen

	$n^{1)}$		$\bar{x}(HFB)^{2)}$		$\sigma(HFB)^{3)}$		$d_{\bar{x}}(HFB)^{4)}$	
	Person A	Person B	Person A	Person B	Person A	Person B	Person A	Person B
Serie K	155	155	31,8	31,6	25,4	24,9	21,0	20,9
Serie O	98	98	97,0	86,6	10,3	16,1	5,3	11,9
Serie R	91	91	88,2	79,1	19,4	20,5	15,0	16,6

¹⁾ n : Anzahl der Ergebnisse

²⁾ $\bar{x}(HFB)$: Arithmetisches Mittel der bestimmten Holzfaserbruchanteile einer Serie

³⁾ $\sigma(HFB)$: Standardabweichung der bestimmten Holzfaserbruchanteile einer Serie

⁴⁾ $d_{\bar{x}}(HFB)$: Mittlere, absolute Abweichung der bestimmten Holzfaserbruchanteile einer Serie

Um den Einfluss der Aufnahme des Holzfaserbruchanteils genauer zu beleuchten, wurde die Auswirkung auf die Beurteilung der durch zwei Personen durchgeführten Aufnahme für die Referenzserie R graphisch dargestellt (Abbildung A- 66).

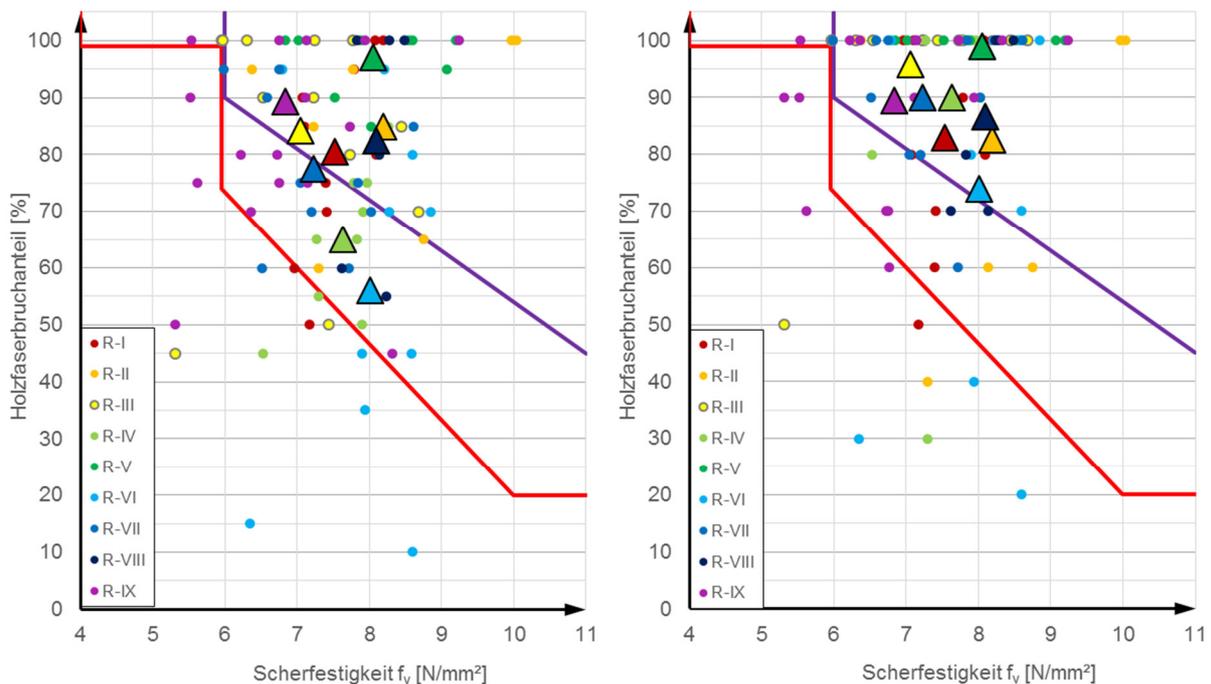


Abbildung A- 66: Prüfergebnisse der Serie R getrennt nach Teilproben (Einzelwerte und Mittelwerte); links: Aufnahme des Holzfaserbruchanteils durch Person A, links: Aufnahme des Holzfaserbruchanteils durch Person B

Zum einen ist ersichtlich, dass, unabhängig von der unterschiedlichen Aufnahme, die Einzelwerte mehrerer Teilproben die normativen Anforderungen nicht erfüllen. Innerhalb zweier Teilproben tauchen Werte für die Scherfestigkeit auf, die zur Erfüllung der Anforderungen mit einem Holzfaserbruch von 100 % einhergehen müssten. Da es sich bei dem Probenmaterial um neu produziertes Brettschichtholz handelte, bei welchem dann ausgegangen werden muss, dass es die erwarteten Anforderungen an die Verklebung der Lamellen erfüllt, wird hier erneut die Anfälligkeit des genormten Bewertungsschemas für die Einzelwerte aus der Scherprüfung und der Aufnahme des Holzfaserbruchanteils deutlich. Bei einer strikten Anwendung des Bewertungsschemas müsste das neu produzierte Probenmaterial der Serie R verworfen werden.

Bei den Mittelwerten zeigt sich erneut der Einfluss unterschiedlich aufgenommener Holzfaserbruchanteile. Aus der Aufnahme von Person B resultieren drei Mittelwerte, die die normativen Anforderungen nicht erfüllen. Person A nahm Werte auf, die bzgl. der Mittelwerte zu einer positiven Beurteilung des gesamten Probenmaterials führen.

Vergleichbar mit der Auswertung der Schubprüfungen wurde der Materialparameter Rohdichte im Hinblick auf einen Zusammenhang mit der Scherfestigkeit untersucht. Die Messdaten sind graphisch in Abbildung A- 67 aufgetragen.

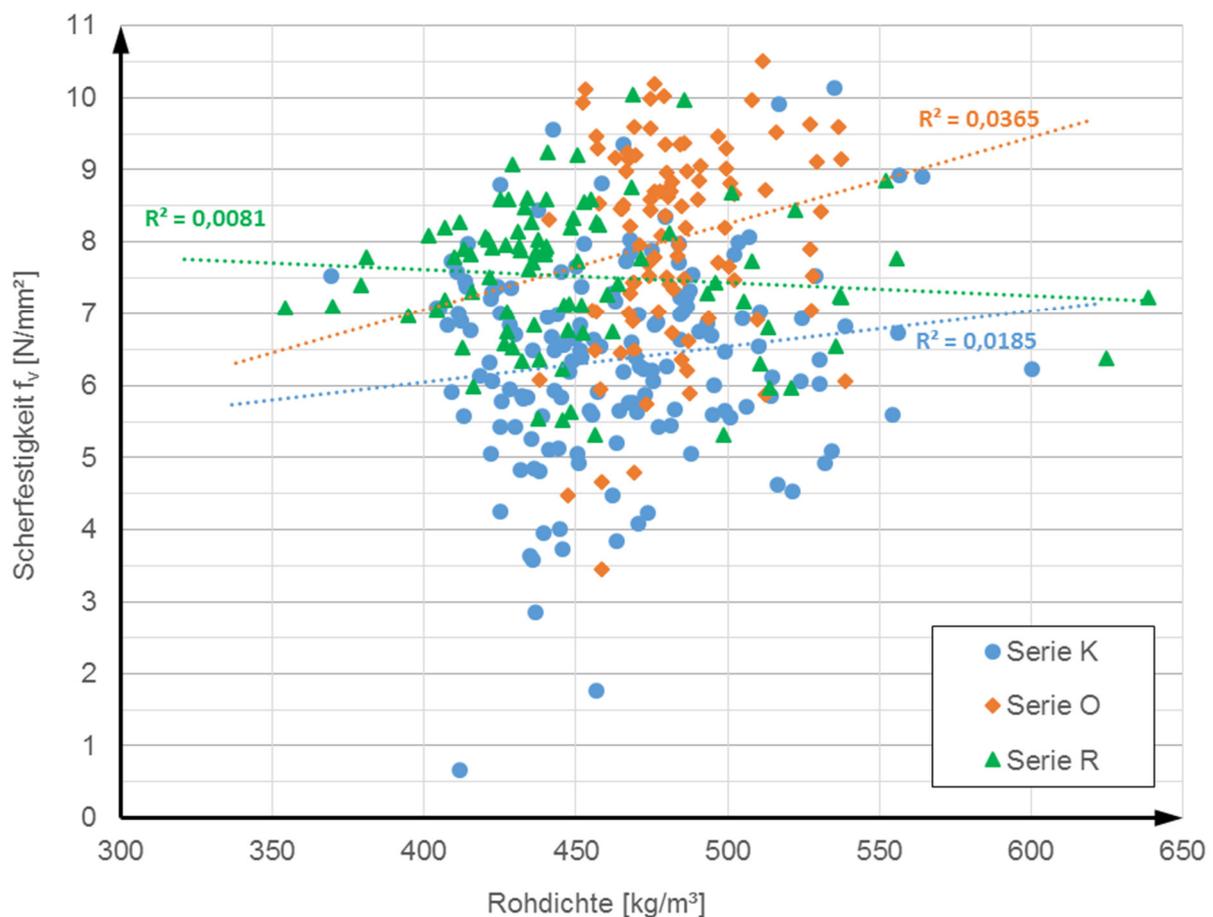


Abbildung A- 67: Zusammenhang der Rohdichte und Scherfestigkeit der Bohrkern-Scherprüfkörper

Die Rohdichte in Serie K lag im Mittel bei 464 kg/m^3 , in Serie O bei 483 kg/m^3 , und in Serie R bei 441 kg/m^3 . Insofern wurden die Ergebnisse der Rohdichtebestimmungen in Abschnitt 3.5.3 und Abschnitt 3.6.5 in ihrer Tendenz bestätigt. Die Rohdichte des Probenmaterials der Serie R lag am niedrigsten, gefolgt vom Material der Serie K. Das Probenmaterial der Serie O wies in allen Versuchsreihen die höchste Rohdichte auf.

Ein Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Scherfestigkeit der Bohrkern-Scherprüfkörper ist aus allen drei Serien nicht ersichtlich. Die Bestimmtheitsmaße liegen jeweils unter 5%. Insbesondere bei den Serien O und R, mit relativ hohen Holzfaserbruchanteilen, kann eine positive Korrelation von Rohdichte und Scherfestigkeit bei der Bohrkern-Scherprüfung nicht bestätigt werden.

Im Zuge der weiteren Datenauswertung wurden die Ergebnisse der einzelnen Bohrkern-Scherprüfkörper zu Vergleichszwecken in eigenschaftsabhängige Gruppe eingeteilt. Für die Vergleiche wurde die Scherfestigkeit als einziger Parameter herangezogen, um Unterschiede zwischen den Gruppen zu betrachten. Die Bewertung zusammen mit dem Holzfaserbruchanteil stand an dieser Stelle nicht im Fokus.

Die Bohrkernproben wurden an verschiedenen Stellen, und somit aus verschiedenen Zonen, der Teilproben entnommen. In Abbildung A- 68 ist ein Überblick über die Entnahmestellen der Bohrkern in den einzelnen Teilproben dargestellt. Die Zoneneinteilung erfolgte nach Lage der Entnahmestellen in einzelnen Abschnitten. Bei der Bestandsprobe K repräsentierten diese Zonen unterschiedliche Stellen in einem Teilsegment von 7,6 m Länge und der vollen Querschnittshöhe von 2,2 m des ursprünglichen Brettschichtholzträgers mit einer Länge von ca. 41 m. Somit war ein Vergleich von Entnahmestellen unterschiedlicher Höhe im Querschnitt und Längslage im ursprünglichen Träger möglich. Bei der Bestandsprobe O konnte eine Aussage zu Entnahmestellen am Trägerende (Bereich der Traufe) und einem Bereich hin zur Mitte des Trägers gezogen werden.

Weiterhin wurde ein Vergleich dahingehend gezogen, ob die Bohrkernproben in einem Fugenbereich entnommen wurden, in dem die Klebefuge vorab eine Delaminierung im oberflächennahen Randbereich aufwies, oder ob die Fuge zum Zeitpunkt der Bohrkernentnahme nicht visuell erkennbar geschädigt war. Dies konnte an den Scherprüfkörpern der Serien K und O untersucht werden.

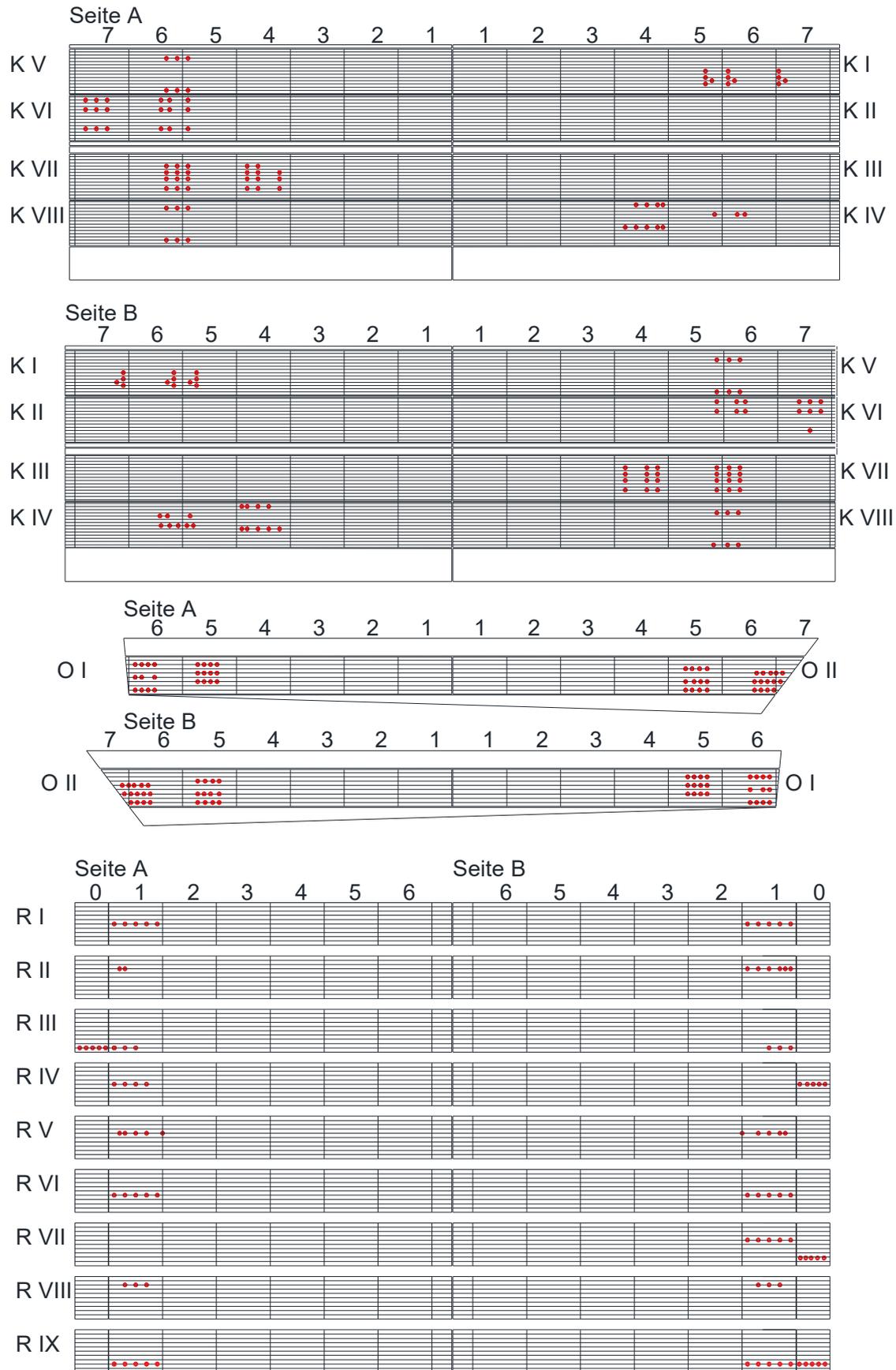


Abbildung A- 68: Entnahmestellen der Bohrkernproben an den Biege-Schubversuchskörpern

Eine der Fragen bei der Bohrkernentnahme ist, ob eine von der Probenoberfläche ausgehende Teil-Delaminierung der Klebefugen berücksichtigt werden sollte. Daher wurden die Ergebnisse der Serien K und O getrennt nach „offener“ oder „geschlossener“ Klebefuge statistisch ausgewertet (Abbildung A- 69).

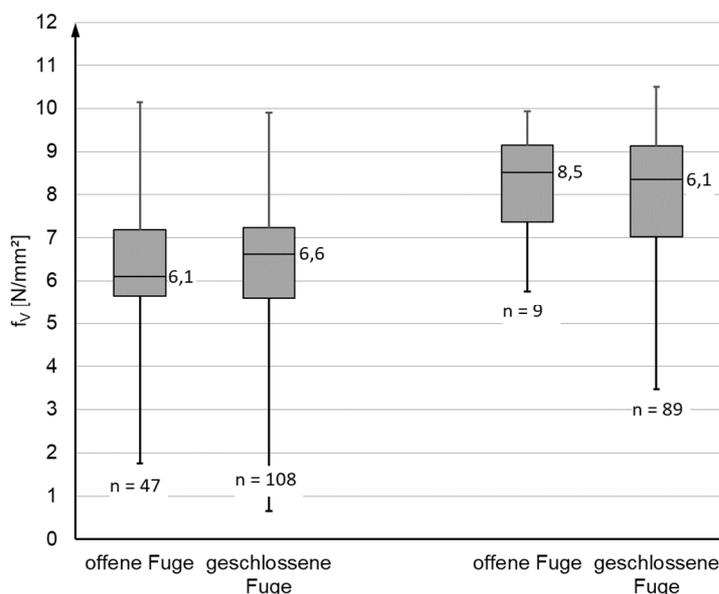


Abbildung A- 69: Statistische Auswertung der Scherfestigkeiten mit Unterscheidung der Entnahmestellen getrennt nach „offener“ und „geschlossener“ Klebefuge

Die Mediane und die Interquartilbereiche liegen hier auf vergleichbaren Niveaus. Die Auswertung zeigt, dass beim vorliegenden Probenmaterial eine teilweise Delaminierung der Klebefuge keinen Einfluss auf die Scherfestigkeit der dahinterliegenden, noch intakten Klebefuge hat.

In Folge wurden die Prüfergebnisse daher nicht in Bezug auf eine Bohrkernentnahme an einer zum Teil delaminierten, bzw. visuell nicht geschädigten Fuge gefiltert.

Eine weitere Frage bei der Entscheidung der Bohrkernentnahme stellt sich bei der Auswahl der Orte verteilt über die Seitenansicht und Querschnittshöhe des zu untersuchenden Brettschichtholzträgers. Dahingehend ist in Abbildung A- 70 eine statistische Auswertung der Prüfergebnisse hinsichtlich unterschiedlicher, lokaler Zonen der Bohrkernentnahme an den Teilproben der Serien K und O dargestellt.

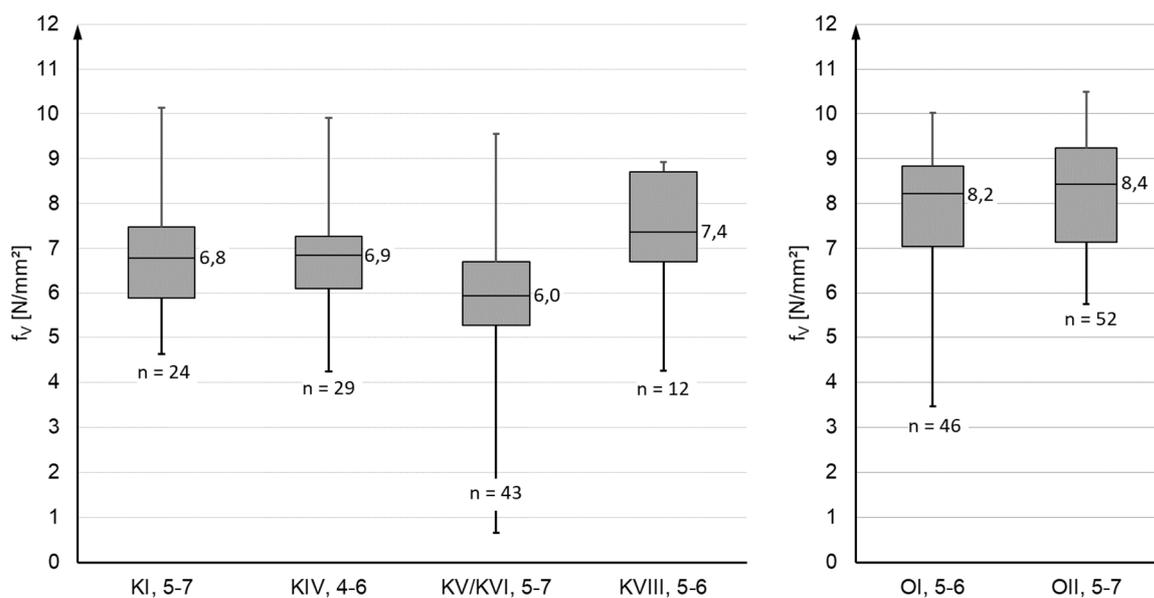


Abbildung A- 70: Statistische Auswertung der Scherfestigkeiten von in unterschiedlichen Zonen des Probenmaterials K und O entnommenen Bohrkern-Scherprüfkörpern

Der Vergleiche in Serien K zeigt nur geringfügige Unterschiede zwischen einzelnen Zonen, in Serie O liegen die statistischen Kennwerte auf sehr ähnlichem Niveau. Beim vorliegenden Probenmaterial wäre demnach eine Entnahme von Bohrkernproben aus verschiedenen Zonen nicht nötig, um stabilere Kennwerte zu erzeugen. Die Spannweiten innerhalb der Zonen sind mitunter sehr hoch, wobei aufgrund der relativ engen Interquartilbereiche von Ausreißern einzelner Messwerte ausgegangen werden kann.

Weiter wurden Ergebnisse von Scherprüfkörpern der Serie K verglichen, die verteilt über die ursprüngliche Höhe der Brettschichtholzprobe von ca. 2,2 m entnommen wurden. Abbildung A- 71 zeigt die statistischen Daten aus zwei Querschnittsebenen entlang der ursprünglichen Probenhöhe.

Hier deutet sich ein Einfluss der Entnahmehöhe auf die Scherfestigkeit mit einem steigenden Niveau von Trägeroberkante nach Trägerunterkante an. Unter der Annahme eines ursprünglich auf Biegung belasteten Brettschichtholzträgers bedeutet dies, dass sich in der ehemaligen Druckzone geringere Bohrkern-Scherfestigkeiten zeigen als in der Zugzone. Im Hinblick auf die Nutzung des Gebäudes könnte das Gefälle auch einen Hinweis auf klimatische Unterschiede in der Umgebung des Trägers darstellen.

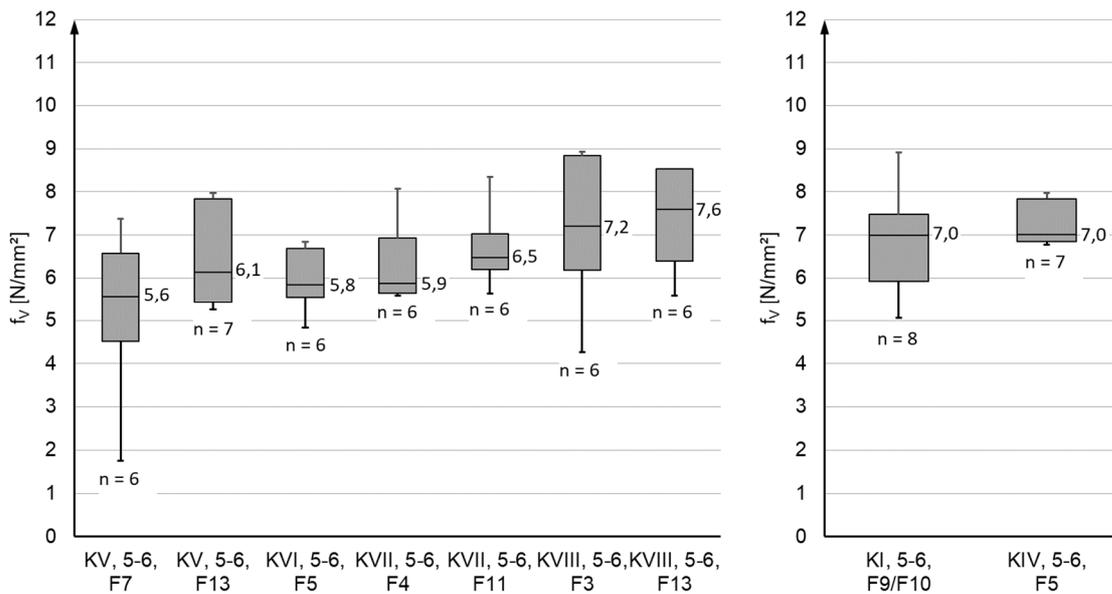


Abbildung A- 71: Statistische Auswertung der Scherfestigkeiten von in unterschiedlichen Höhen am Querschnitt der Brettschichtholzprobe K entnommenen Bohrkern-Scherprüfkörpern

Im nächsten Schritt wurden die Ergebnisse aus allen drei Serien in Bezug auf die Probenseite der Entnahme gruppiert (Abbildung A- 72). Dabei wurden die Bohrkernproben für einen direkten Vergleich weitestgehend paarweise entnommen.

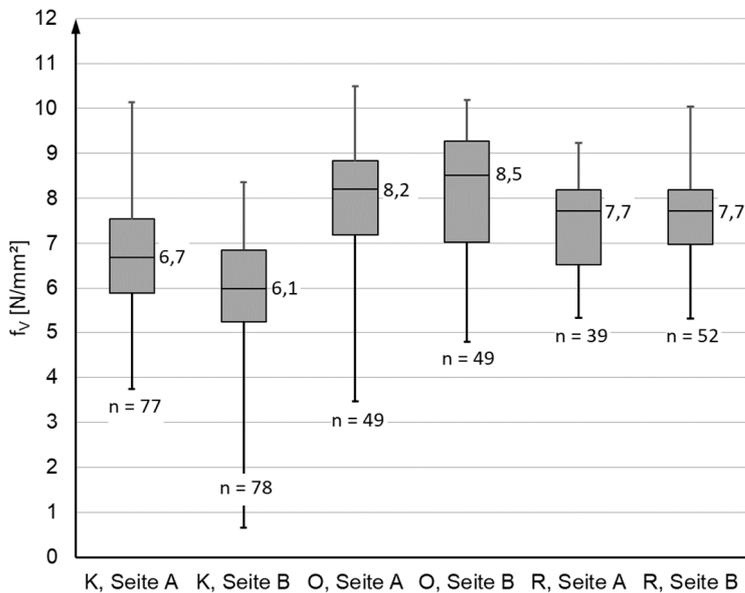


Abbildung A- 72: Statistische Auswertung der Scherfestigkeiten mit Unterscheidung der Entnahmestellen getrennt nach Probenseite A und B

Die Mediane liegen hier auf sehr ähnlichen Niveaus, daher kann davon ausgegangen werden, dass beim vorliegenden Probenmaterial keine merklichen Unterschiede in den Scherfestigkeiten aufgrund der Wahl der Entnahmeseite an der Probe ergeben.

Um die Streuung der Festigkeit über eine kurze Länge entlang der Teilprobe zu untersuchen, wurden die Ergebnisse aus einer Reihe von Bohrkernen innerhalb eines Abschnitts von 500 mm Länge aufgetragen.

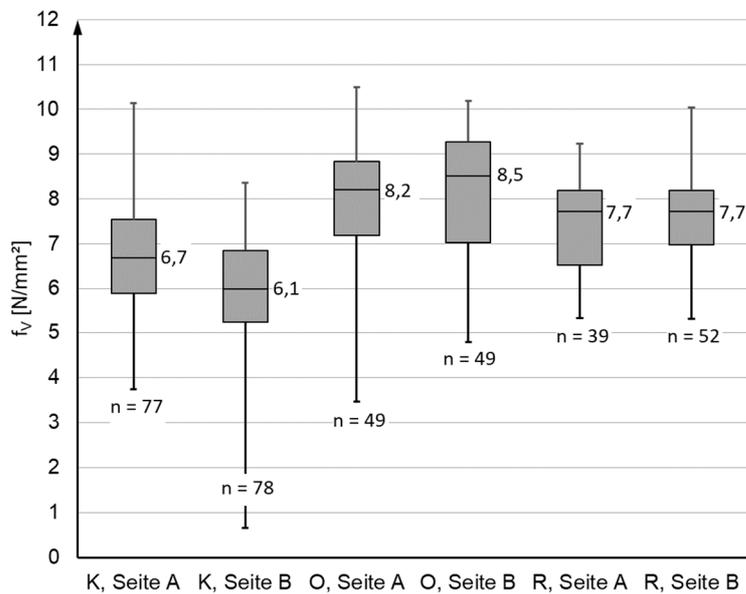


Abbildung A- 73: Statistische Auswertung der Scherfestigkeiten von Bohrkernproben innerhalb eines 500 mm langen Abschnitts und entlang einer Klebefuge

Im Vergleich zu einer Stichprobennahme an verschiedenen Stellen verringerte sich die Streuung der Bohrkern-Festigkeiten nicht merklich durch die Wahl von Entnahmestellen innerhalb einer Fuge in kurzem Abstand zueinander.

Schließlich wurde am Träger O-II eine Auswirkung des Stirnendes der Probe auf die Bohrkern-Scherfestigkeiten untersucht. Dazu wurden Prüfergebnisse von Bohrkernproben verglichen, die im unmittelbaren Randbereich (Abstand zum Stirnholz < 400 mm), bzw. in einem Abstand von durchschnittlich 1000 mm zum Trägerende entnommen wurden (Abbildung A- 74).

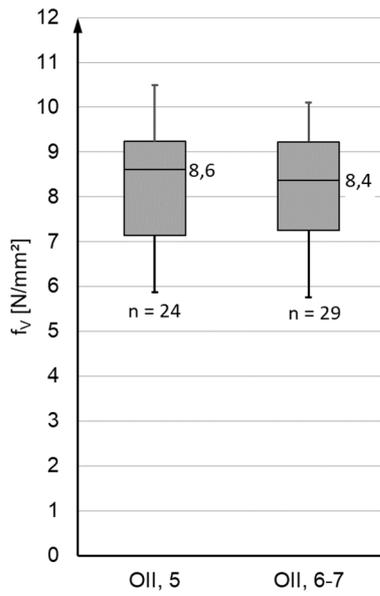


Abbildung A- 74: Statistische Auswertung der Scherfestigkeiten mit Unterscheidung der Entnahmestellen am unmittelbaren und mittelbaren Trägerende

Hier zeigt sich kein merklicher Unterschied in den statistischen Kenndaten bzgl. des Abstands der Entnahmestellen zum Trägerende.

4 Erweiterung der Datengrundlage

4.1 Allgemeines

Um die Datenbasis zusätzlich zu den Ergebnissen aus Kapitel 1 zu erweitern, wurde auf Literaturveröffentlichungen zurückgegriffen, in denen vergleichbare Versuchsprogramme beschrieben wurden. Weiterhin wurden an der Forschungsstelle vorhandene Ergebnisse aus in der Vergangenheit durchgeführten Bohrkern-Scherprüfungen herangezogen.

4.2 Literaturveröffentlichungen

(Scharmacher 2011) beschreibt ein vergleichbares Versuchsprogramm mit neu produziertem Brettschichtholz-Probenmaterial, welches unter Anderem Biege-Schubversuche und Scherprüfungen an Bohrkernen nach EN 392 beinhaltet.

Die Lamellen der Biege-Schubprüfkörper der Festigkeitsklasse GL 28k und GL 24k waren zum einen mit einem Polyurethan (PUR) Klebstoff, zum anderen mit einem Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz (MUF) verklebt. Alle Versuchs- und Prüfkörper der einzelnen Serien wurden aus diesem Probenmaterial herausgearbeitet. Angaben zu den Materialparametern Rohdichte und Holzfeuchte wurden nicht gemacht, es wurde davon ausgegangen, dass das Probenmaterial keine großen Abweichungen zu den üblich anzunehmenden Materialparametern aufwies.

Die Biege-Schubversuchskörper mit einem Querschnitt von $b \times h = 160 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$ (Serie PUR) und $b \times h = 160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ (Serie MUF) wurden zur Provokation eines Schubversagens auf halber Querschnittshöhe und an beiden Seiten durch einen Sägeschnitt um jeweils 40 mm verjüngt. Aus den Beschreibungen im Bericht geht hervor, dass die Spannweite der Serie PUR 1250 mm ($l/h = 3,9$), die der Serie MUF 700 mm ($l/h = 4,4$) betrug. Die Belastung erfolgte mittig im 3-Punkt Biegeversuch. Insgesamt wurden in zwei Serien 21 Versuchskörper bis zum Bruch belastet.

Die Bohrkernproben wurden mit einem Durchmesser von 35 mm aus dem Probenmaterial entnommen, und gemäß EN 392 für die Scherprüfung hergerichtet. Insgesamt wurden 93 Scherprüfungen durchgeführt.

Im den folgenden Kapiteln sind die Ergebnisse dieser beiden Serien mit den Bezeichnungen „PUR“ und „MUF“ versehen.

(Scharmacher 2012) beschreibt ein weiteres Versuchsprogramm, welches zur Erweiterung der Datenbasis herangezogen werden konnte. Hier wurden ebenfalls Versuchs- und Prüfkörper aus neu produziertem Brettschichtholz-Probenmaterial in 3-Punkt Biegeprüfungen, Schubprüfungen nach EN 408, und Bohrkern-Scherprüfungen nach EN 392 untersucht. Die Fichtenlamellen der Proben waren mit einem Phenol-Resorzinharz Klebstoff verklebt. Alle Versuchs- und Prüfkörper wurden vor Versuchsdurchführung durch eine Lagerung im

Normklima (20 °C und 65 % relative Luftfeuchte) zwischen sieben und 68 Tagen konditioniert. Die Rohdichten wurden nicht angegeben.

Aus jeder Probe wurde ein Biege-Schubversuchskörper mit einem Querschnitt von $b \times h = 80 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ gewonnen. Der Querschnitt wurde ebenfalls durch einen Sägeschnitt von 10 mm auf jeder Seite in seiner Breite verjüngt. Die Spannweite der 3-Punkt Biegeversuche betrug 550 mm ($l/h = 4,6$). Insgesamt wurden neun gültige Prüfungen durchgeführt.

Aus jeder Probe wurde ein Schubprüfkörper nach EN 408 herausgearbeitet. Die Abmessungen und die anschließende Prüfung entsprachen den normativen Vorgaben.

Ebenfalls wurde aus jeder Probe eine Bohrkernprobe mit einem Durchmesser von 35 mm herausgearbeitet und gemäß EN 392 geprüft.

Im Folgenden sind Ergebnisse dieser Serie mit der Bezeichnung „RE“ versehen.

4.3 Daten des MPA BAU, TUM

Am Materialprüfungsamt für das Bauwesen an der Technischen Universität München (MPA BAU, TUM) wurde seit dem Jahr 2006 eine Vielzahl an Scherprüfungen im Rahmen von Untersuchungen an Bestands-Brettschichtholztragwerken durchgeführt. Aus dieser für die Forschungsstelle verfügbaren Datenbasis wurden insgesamt 54 Projekte mit zwischen acht und 40 Scherprüfungen für die weitere Auswertung ausgewählt. Die Scherprüfungen waren gemäß EN 392 / EN 14080 durchgeführt worden, der Holzfaserbruchanteil war durch verschiedene Mitarbeiter des MAP BAU visuell bestimmt worden.

5 Zusammenführung der Versuchsergebnisse

5.1 Allgemeines

Ein vorrangiges Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war die Untersuchung einer möglichen Korrelation zwischen den Biege-Schubfestigkeiten von Brettschichtholzträgern unter einer Biegebelastung, und den Schub-/Scherfestigkeiten von Schubprüfkörpern nach EN 408 und Bohrkern-Scherprüfkörper nach EN 14080. Zu diesem Zweck wurden die im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Versuchs- und Prüfergebnisse zusammengeführt und verglichen.

5.2 Berechnungen

Um einen Vergleich mit den Ergebnissen der in Kapitel 1 beschriebenen Versuchsreihen anstellen zu können, wurden die Daten der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Biege-Schubversuche mit der in Abschnitt 3.5.8 dargestellten Methodik (Berechnung der Biege-Schubfestigkeiten) ausgewertet. Eine Abweichung von der in den Literaturquellen beschriebenen Auswertung war insbesondere im Hinblick auf die unterschiedlichen Dimensionen der Versuchskörper notwendig. Da die Abmessungen und Prüflasten in den Literaturquellen genannt waren, konnten vergleichbare Biege-Schubspannungen beim Schubriss bestimmt werden. Durch die Bebilderung in (Scharmacher 2012) konnten die Risshöhen der Schubrisse am Querschnittsende ebenfalls abgeschätzt werden. Die Querschnittsverjüngung wurde entsprechend einer Vorab-Delaminierung der Klebefuge in Form einer effektiven Schubflächenbreite berücksichtigt.

Bei den Ergebnissen der Schubprüfungen nach EN 408 wurde die Schiefstellung des Prüfkörpers von 14° während der Belastung durch Umrechnung der Schubfestigkeit mit dem Faktor $f = (\cos 14^\circ)$ mit einbezogen. Die vorhandene Querschnittsverjüngung wurde ebenfalls berücksichtigt.

5.3 Korrelation der Ergebnisse aus den Prüfreihen

In der graphischen Auswertung in Abbildung A- 75 und der Zusammenstellung der statistischen Kenndaten in sind die Versuchsergebnisse aus den vorangegangenen Abschnitten 3.5.8, 3.6.9, 3.7.6 und 4.2 unter folgenden Gesichtspunkten zusammengefasst dargestellt:

- Werte der Biege-Schubversuche
 - Die Biege-Schubfestigkeiten wurden bzgl. der schubbeanspruchten Fläche auf eine Referenzfläche normiert.
 - Dargestellt sind die Mittelwerte der Biege-Schubspannungen beim ersten Schubriss der Serien K, O, R, PUR, MUF und RE

- Werte der Schubfestigkeiten nach EN 408
 - Prüfungen, bei denen mehr als 20 % der Schubbruchfläche in der Verklebung des Probenmaterials mit einer Lasteinleitungsplatte lag, wurden verworfen.
 - Die Abmessungen der Schubprüfkörper entsprachen den normativen Vorgaben.
 - Brüche in Holz wie auch in einer im Prüfkörper enthaltenen Klebefuge wurden berücksichtigt.
- Werte der Bohrkern-Scherfestigkeiten nach EN 14080
 - Die Ergebnisse wurden keiner weiteren Filterung unterzogen.

Aufgrund der geringen Unterschiede der Holzfeuchten im Probenmaterial wurde in keiner Prüfreihe eine Normierung auf eine Holzfeuchte von 12 % vorgenommen.

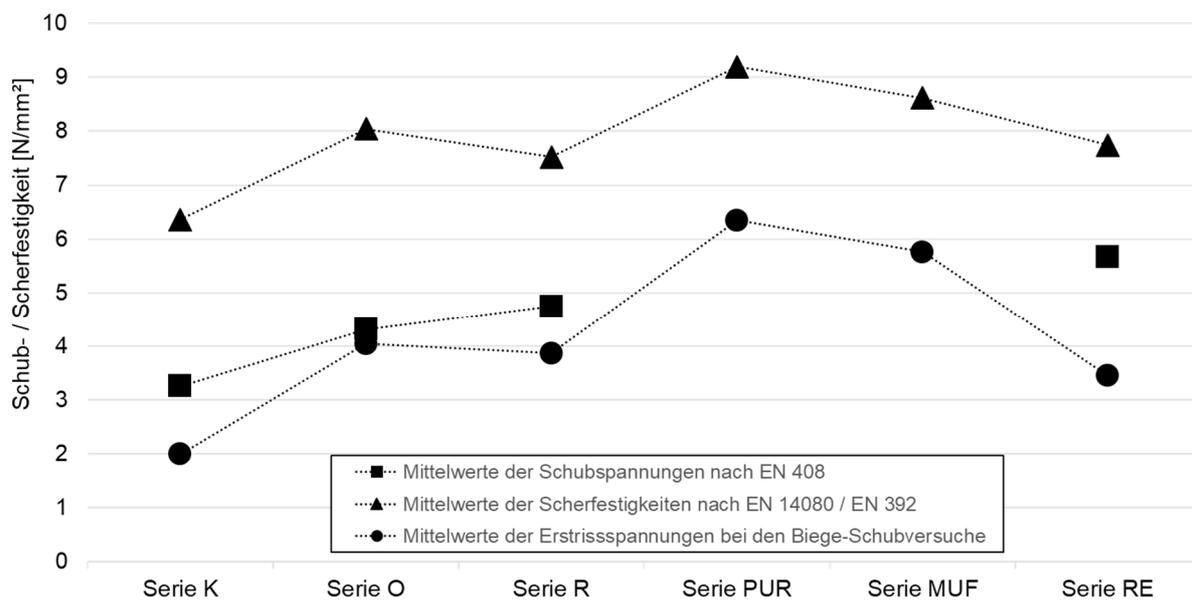


Abbildung A- 75: Mittelwerte der Schub- und Scherfestigkeiten aus den Biege-Schubversuchen, Schubprüfungen nach EN 408 und Scherprüfungen nach EN 14080

Tabelle 5-1: Statistische Auswertung der Schub- und Scherfestigkeiten aus den Biege-Schubversuchen, Schubprüfungen nach EN 408 und Scherprüfungen nach EN 14080

Versuchsreihe			Serie					
			K	O	R	PUR	MUF	RE
Biege-Schubversuche	$n^{1)}$	[-]	8	2	9	17	14	9
	$\bar{x}(\tau_{1R,norm})^{2)}$	[N/mm ²]	2,00	4,04	3,87	6,35	5,77	3,45
	$\sigma(\tau_{1R,norm})^{3)}$	[N/mm ²]	0,53	0,75	1,06	0,72	0,50	0,21
	$VarK(\tau_{1R,norm})^{4)}$	[%]	26,8	18,4	27,4	11,3	8,6	6,0
Schubprüfungen nach EN 408	$n^{1)}$	[-]	56	20	17	-	-	9
	$\bar{x}_{EN\ 408}^{2)}$	[N/mm ²]	3,26	4,32	4,75	-	-	5,67
	$\sigma_{EN\ 408}^{3)}$	[N/mm ²]	1,53	0,96	0,60	-	-	0,64
	$VarK_{EN\ 408}^{4)}$	[%]	46,8	22,2	12,7	-	-	11,2
Scherprüfungen nach EN 14080	$n^{1)}$	[-]	155	98	91	51	42	10
	$\bar{x}_{EN\ 14080}^{2)}$	[N/mm ²]	6,37	8,05	7,53	9,20	8,62	7,75
	$\sigma_{EN\ 14080}^{3)}$	[N/mm ²]	1,40	1,39	0,98	1,00	1,11	1,70
	$VarK_{EN\ 14080}^{4)}$	[%]	22,1	17,2	13,0	10,8	12,9	21,9

¹⁾ n : Anzahl der Ergebnisse

²⁾ \bar{x} : Arithmetisches Mittel der aus der jeweiligen Versuchsreihe berücksichtigten Ergebniswerte

³⁾ σ : Standardabweichung der aus der jeweiligen Versuchsreihe berücksichtigten Ergebniswerte

⁴⁾ $VarK$: Variationskoeffizient der aus der jeweiligen Versuchsreihe berücksichtigten Ergebniswerte

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die ermittelten Biege-Schubfestigkeiten aus den Biege-Schubversuchen auf einem niedrigeren Niveau liegen als die Ergebnisse der Prüfungen nach EN 408 und den Bohrkernprüfungen. Dies war aufgrund des vorab beschriebenen Volumeneffekts zu erwarten.

Ein linearer Zusammenhang der Mittelwerte aus den Versuchs- und Prüfreiheiten mit gleichem Probenmaterial zwischen den Biege-Schubfestigkeiten und den Schubfestigkeiten nach EN 408 ist nur bedingt ersichtlich. Das Niveau der Schubfestigkeiten der Serie K liegt am niedrigsten. Da auch die Bohrkern-Scherfestigkeiten unter denen der anderen Serien liegt, bestätigt dies die mindere Qualität der Verklebung. Jedoch ist der Abstand der Schubfestigkeit zur Biege-Schubfestigkeit in Serie K größer als in den Serien O und R.

Die Schubprüfkörper der Serien O und R versagten mehrheitlich im Holz, selbst wenn eine Klebefuge im Prüfkörper enthalten war. Hier würde man erwarten, dass aufgrund der geringeren Rohdichte des Probenmaterials R im Vergleich zum Material der Serie O auch die Schubfestigkeiten in der Serie R geringer ausfallen als in Serie O. Dies ist nur bei den Ergebnissen der Biege-Schubprüfungen und der Bohrkern-Scherprüfungen der Fall.

Die Ergebnisse der Schubprüfungen in Serie RE liegen bzgl. des Abstandes am weitesten über den Biege-Schubfestigkeiten. Hier könnte die Querschnittsverjüngung durch Sägeschnitte ausschlaggebend sein.

Generell erscheint der Zusammenhang zwischen den Biege-Schubfestigkeiten und den Schubfestigkeiten relativ gering. Die Bestimmung einer Schubfestigkeit für vorwiegend auf Biegung beanspruchtes Holz auf Grundlage von Versuchsergebnissen aus dem in EN 408 beschriebenen Schubversuch wird auch in Fachkreisen als kritisch angesehen. Die Spannungsverteilung im Schubversuch entspricht nicht der Spannungsverteilung am Biegeträger. Die hier vorgestellten Versuchsergebnisse bestätigen in gewisser Weise die Bedenken.

Anders erscheint der Vergleich der Biege-Schubfestigkeiten mit den Bohrkern-Scherfestigkeiten. Aufgrund des annähernd gleichen Niveauunterschieds bei jeder Versuchs- und Prüfreihe mit gleichem Probenmaterial kann hier im Rahmen der durchgeführten Versuche von einem Zusammenhang ausgegangen werden. Zur Veranschaulichung wurden die Ergebnisse in Abbildung A- 76 gegeneinander aufgetragen. Das Bestimmtheitsmaß beträgt 94,7 %.

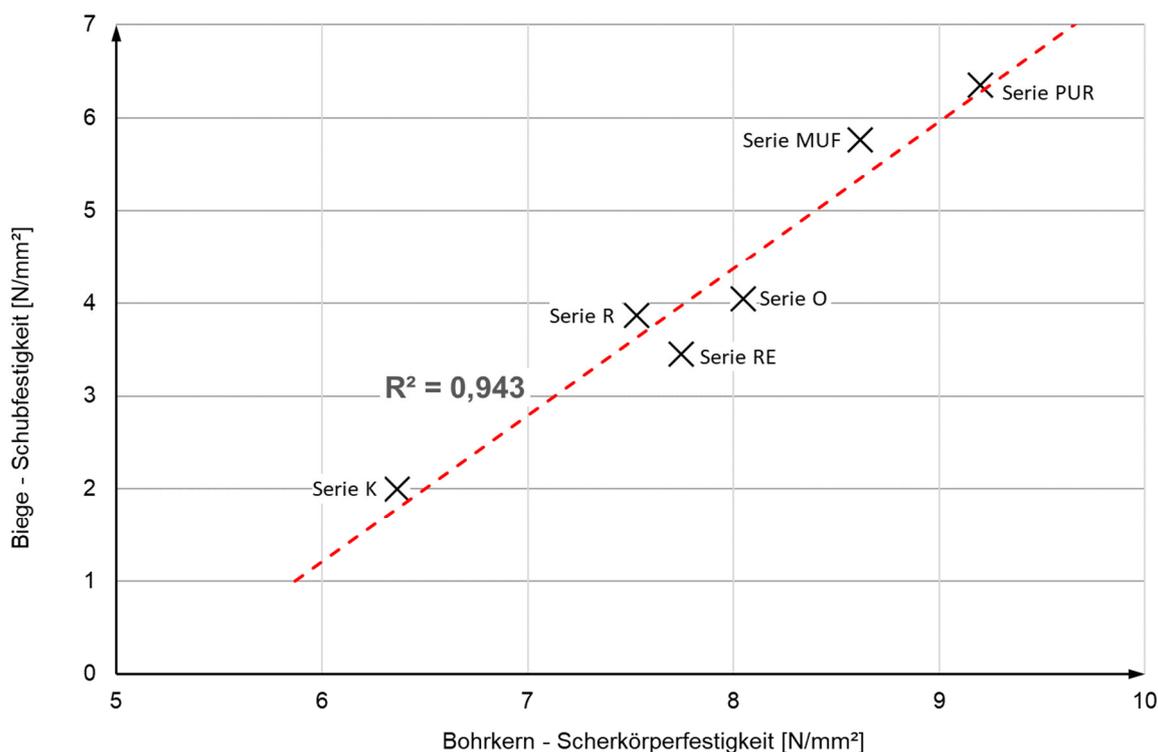


Abbildung A- 76: Zusammenhang der Biege-Schubfestigkeiten und der Bohrkern-Scherfestigkeiten der Versuchs- und Prüfreihe K, O, R, PUR, MUF und RE

Ein weiterer Vergleich der Daten innerhalb der in Serie R ermittelten Biege-Schubfestigkeiten und Bohrkern-Scherfestigkeiten zeigt

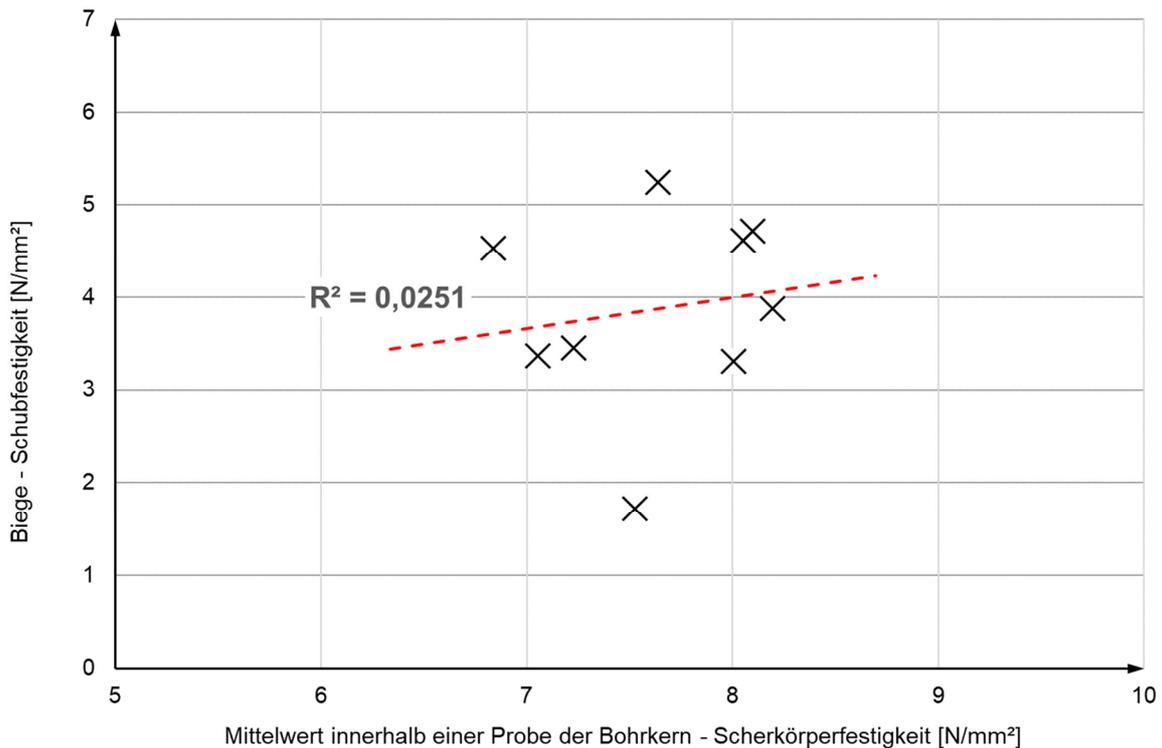


Abbildung A- 77: Zusammenhang der Biege-Schubfestigkeiten und der Bohrkern-Scherfestigkeiten einzelner Probeträger in Serie R

Bei identischer Vorbehandlung bzw. klimatischer Belastung bestand der wesentliche Unterschied der Proben innerhalb der Serie R in der Variation der Lamellensortierungen. Beim Vergleich der einzelnen Proben ist eine Korrelation von Biege-Schubfestigkeiten und den aus den jeweiligen Versuchskörpern gemittelten Bohrkern-Festigkeiten nicht ersichtlich (Bestimmtheitsmaßes $R = 2,5 \%$). Dabei ist die Streuung der Biege-Schubfestigkeitswerte der Proben mit $27,4 \%$ höher als die Streuung der Mittelwerte der Bohrkern-Scherfestigkeiten innerhalb einer Probe ($13,0 \%$). Hier scheint die Entnahme von Bohrkernen aus verschiedenen Bauteilen bezüglich der Mittelwerte eine untergeordnete Rolle zu spielen. Jedoch muss man bei der Bestandsuntersuchung davon ausgehen, dass auch bei visuell vergleichbar erscheinenden Bauteilen im Gebrauch durchaus unterschiedliche statische und klimatische Verhältnissen vorliegen, was eine differenzierte Bohrkernentnahme nahelegt.

5.4 Auswertung der weiteren Prüfdaten des MPA BAU

In Abbildung A- 78 sind die Prüfergebnisse aus insgesamt 54 Prüfserien aus Bohrkern-Scherprüfkörpern mit den statistischen Kennwerten dargestellt. Die Mittelwerte der Bohrkern-Scherfestigkeiten sind durch blaue Punkte, die Mittelwerte der Holzfaserbruchanteile durch grüne Punkte, markiert. Ausreißer bei den Scherfestigkeiten (schwarze Punkte) wurden mit der Methode nach Grubbs und einem Signifikanzniveau von 5% ermittelt. Grenzwerte der Anforderungen an die Verklebung nach EN 14080 (Erläuterung im Abschnitt 3.7.6) sind durch

gestrichelten Linien eingezeichnet. Die rote Linie repräsentiert die Untergrenze des minimal zulässigen Einzelwertes der Bohrkern-Scherfestigkeit, die violette Linie die Untergrenze des minimal zulässigen Mittelwertes.

Auch hier zeigt sich die Anfälligkeit der in EN 14080 verankerten Bewertungsmethodik. Bei einigen Prüfserien liegt der Mittelwert, und weiter das 25%-Quartil, über dem Mindestgrenzwert für Einzelwerte (violette Linie). Zusammen mit einem hohen Mittelwert des Holzfaserbruchanteils sind die Anforderungen bzgl. des Mittelwertes damit erfüllt. Jedoch tauchen in den gleichen Prüfserien einzelne Scherfestigkeitswerte, bzw. einzelne Ausreißer, auf, die unter dem Mindestgrenzwert für Einzelwerte von 4 N/mm^2 (rote Linie) liegen und somit die normativen Anforderungen nicht erfüllen. Streng betrachtet wäre das betreffende Tragwerk also nicht mehr betriebssicher. Zu beachten ist, dass in den betreffenden Prüfserien die Streuungen relativ hoch sind. Zur Gesamtbewertung des Zustands des untersuchten Brettschichtholzes müssen also Aspekte bzgl. der Ursachen dieser hohen Streuung mit einbezogen werden.

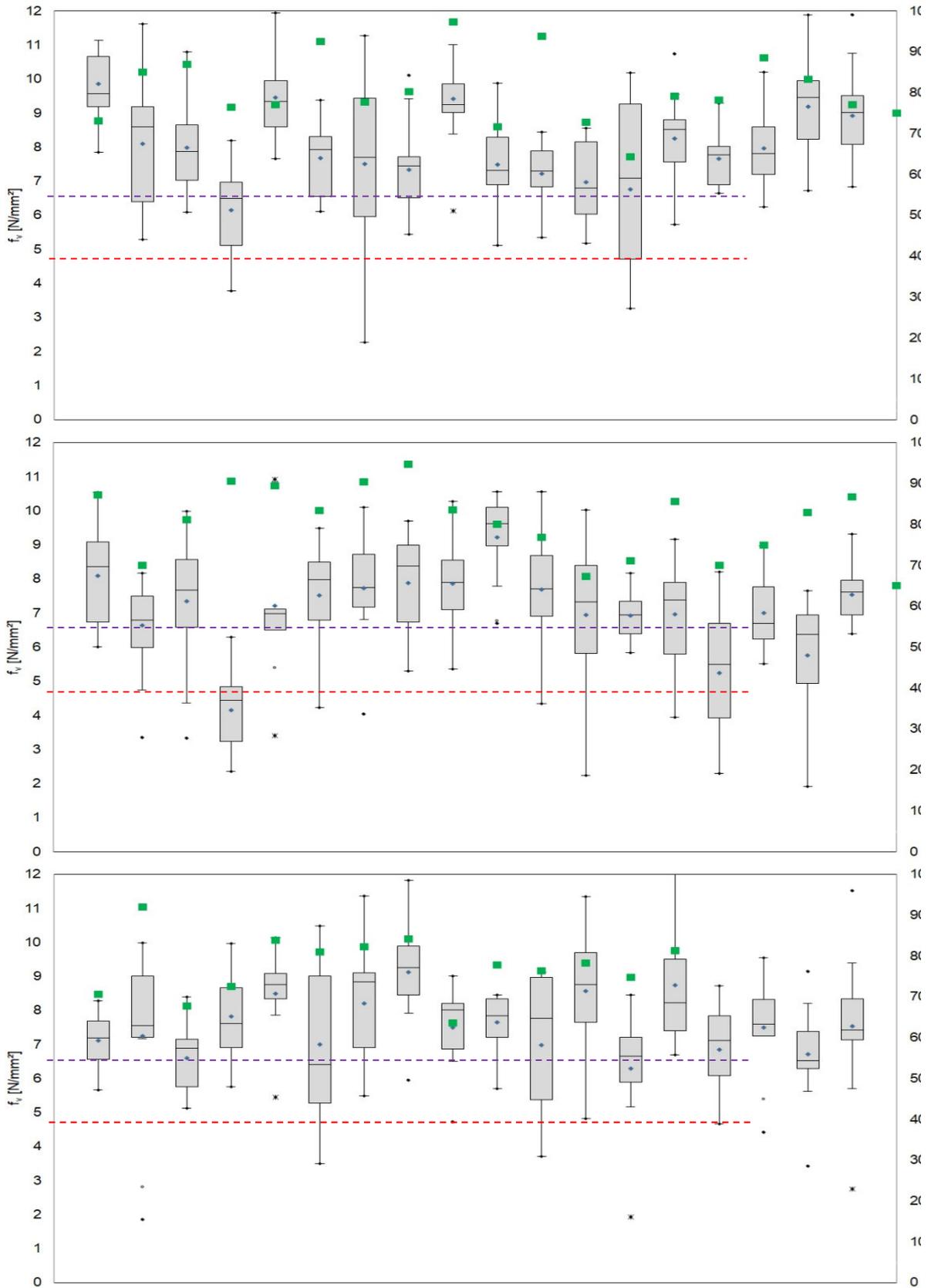


Abbildung A- 78: Statistische Auswertung einer Auswahl der am MPA BAU, TU München geprüften Bohrkern-Scherprüfkörper hinsichtlich der Scherfestigkeit und des Holzfaserverbruchsanteils; blau: arithmetischer Mittelwert, grün: Mittelwert des Holzfaserverbruchsanteils, rote Linie: Grenzwert des Mittelwertes, violette Linie: Grenzwert der Einzelwerte

Des Weiteren wurden die Daten hinsichtlich einer Teilung einer entnommenen Bohrkernprobe in mehrere Abschnitte entlang seiner Achse untersucht. Ziel ist, Erkenntnisse über ein Gefälle der Scherfestigkeit über die Bauteilbreite zu erlangen. Dieses Gefälle, mit niedrigeren Scherfestigkeiten in oberflächennahen Bereichen und einem Anstieg der Festigkeiten hin zum Trägerinneren wird oft auf Grund von Umwelteinflüssen und dadurch einer Beeinflussung bzw. Alterung der Klebefuge erwartet.

Zur Auswertung wurden Scherprüfungsdaten herangezogen, bei denen Scherfestigkeiten an drei bzw. vier Abschnitten aus einer Bohrkernprobe ermittelt wurden. In Abbildung A- 79 sind die Prüfdaten graphisch dargestellt. Die römische Ziffer des Abschnitts bezeichnet die Scherprüfkörper in aufsteigender Reihenfolge von der Bauteiloberfläche hin zum Bauteilinneren.

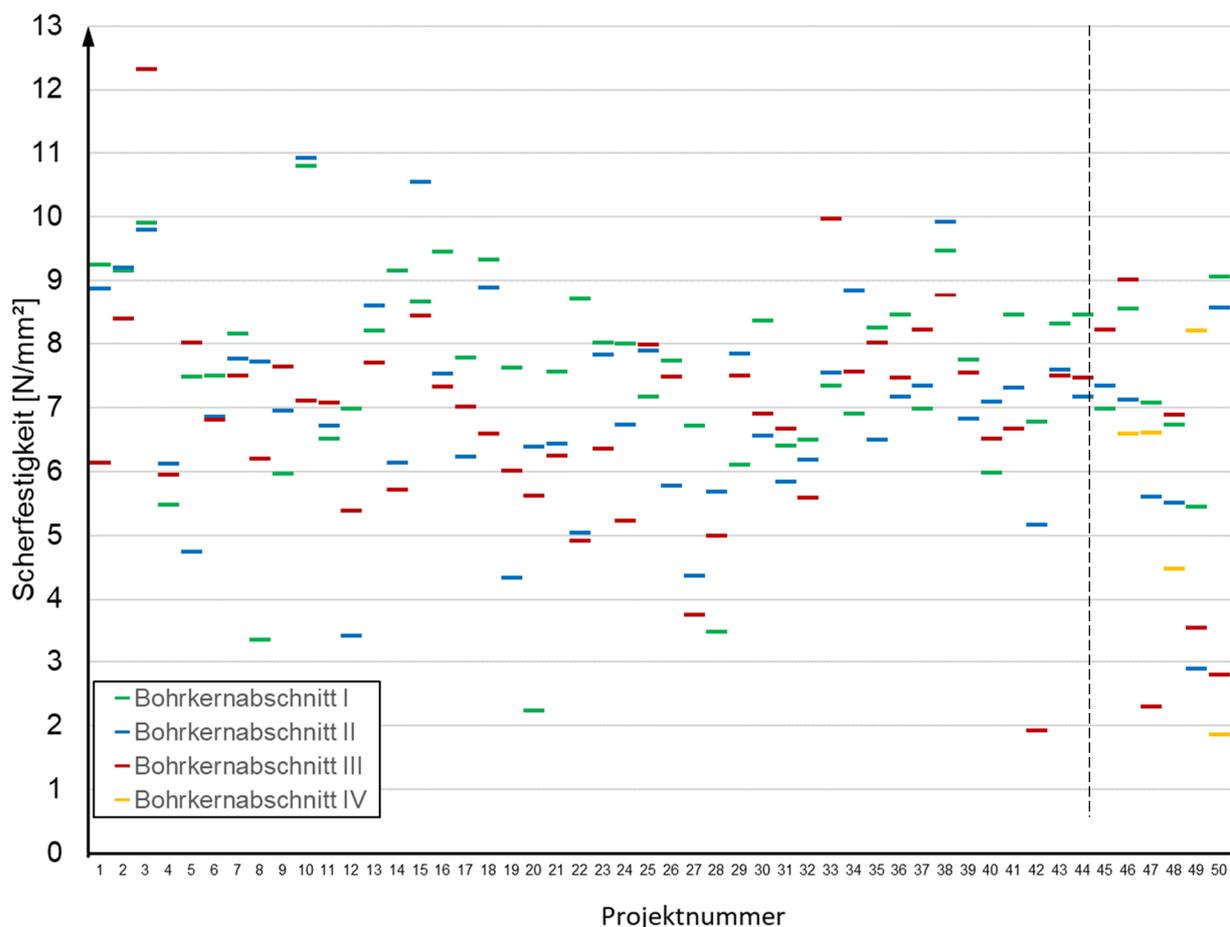


Abbildung A- 79: Vergleich von Prüfkörper-Scherfestigkeiten verschiedener Abschnitte innerhalb eines Bohrkerns

Bei der Mehrzahl der Projekte ist kein Gefälle der Scherfestigkeit über die Querschnittsbreite erkennbar, weder von außen nach innen noch von innen nach außen. Die Scherfestigkeiten zwischen den einzelnen Abschnitten variieren ohne erkennbaren Trend, oftmals hat die Scherfestigkeit im mittleren Abschnitt sein Maximum. Deutlich wird der fehlende

Zusammenhang der Scherfestigkeiten mit der Breite auch bei den rechts dargestellten Serien mit vier Abschnitten pro Bohrkernprobe. Die Bruchbilder der Biege-Schubversuche aus Abschnitt 3.5 (siehe Anhang A) bestätigen diese Vermutung, da auch bei in oberflächennahen, delaminierten Klebefugen initiierte Schubrisse am Rissgrund in die benachbarten Lamellen abwanderten.

Weitere Auswertungen wurden mit dem vorliegenden Datensatz nicht angestrengt, da hierfür weitere Informationen über den Zustand der beprobten Tragwerke nötig gewesen wären, die zum aktuellen Zeitpunkt nicht vorlagen.

6 Empfehlungen und Ausblick

Wie eingangs geschildert, stellt die Norm EN 14080 ein Verfahren zur quantitativen Untersuchung des Zustandes der Klebefugen eines Brettschichtholzbauteils bereit. Das Verfahren ist grundsätzlich auch dazu geeignet, mittels einer minimal-invasiven Probennahme am Bauwerk einen Festigkeitswert des Klebefugenbereichs zu ermitteln. Die qualitative Aufnahme des Holzfaserbruchanteils an den Scherflächen gibt weiterhin Aufschluss über den Zustand des Verbundes von Holz und Klebstoff.

Wie die im Zuge dieses Projektes aus gealterten, wie auch aus neu produziertem, Brettschichtholz erzielten Prüfergebnisse zeigen, kann die absolute Bewertung der Einzelergebnisse gemäß EN 14080 hinterfragt werden. Bei zwei der drei Serien mit Brettschichtholz-Probenmaterial von augenscheinlich guter Qualität bzw. neu produziertem Probenmaterial lagen einzelne Ausreißer unter den normativen Anforderungen, bei gleichzeitig hohen Biege-Schubfestigkeiten des gleichen Probenmaterials. Hier sollte also das Kriterium in EN 14080, dass *alle* Einzelwerte die Anforderungen zu erfüllen haben, kritisch hinterfragt werden. Gerade durch die lokal beschränkte Probennahme kann es durch lokale Einflüsse im Material zu vereinzelt niedrigen Bohrkern-Scherfestigkeiten kommen, welche jedoch nicht den Gesamtzustand des Probenmaterials repräsentieren. In diesem Zusammenhang hat die Mittelwertbetrachtung durch die Relativierung der Extremwerte eine Berechtigung, allerdings wäre eine Betrachtung des Medians als statistische Kenngröße, mit seiner höheren Sicherheit gegenüber Ausreißern, eine Alternative. Die Frage eines fundierten Entscheidungskriteriums einer selektiven Stichprobenauswahl zur Eliminierung einzelner Ausreißer konnte im Rahmen dieses Projektes nicht abschließend geklärt werden.

Selbst Bohrkern-Scherprüfkörper aus neu produziertem Brettschichtholz erfüllten, wenn auch nur vereinzelt, die Anforderungen nicht. Daran hatte der visuell ermittelte Wert des Holzfaserbruchanteils einen entscheidenden Anteil, da keiner der Einzelwerte der Scherfestigkeit unter der Mindestscherfestigkeit von 4 N/mm² lag, jedoch der geforderte Holzfaserbruchanteil von 100 % bei Scherfestigkeiten zwischen 4 N/mm² und 6 N/mm² mitunter nicht ermittelt wurde.

Die Ermittlung des Holzfaserbruchanteils zeigte sich mit einer relativ hohen Unsicherheit behaftet. Wie schon in der Literatur beschrieben, können die prozentualen Werte durch die subjektive, visuelle Aufnahme stark streuen. Dies bestätigte sich im Zuge dieses Projektes. Die Bestimmung eines stabilen Mittelwertes durch mehrere Personen ist aufgrund der Kapazitäten der Labore und des nicht vertretbaren Aufwandes oft nicht möglich. Eine Genauigkeit von 5 % ist bei einer visuellen Bestimmung praktisch nicht erreichbar, eine Genauigkeit von 10 % könnte, unter zusätzlicher Verwendung eines auf die Scherflächen applizierten Ligninindikators, erreichbar sein. Hier besteht Bedarf an der Entwicklung einer standardisierten, wenn möglich personenunabhängigen Methode, und einer klar definierten Abgrenzung von Holzfaser- zu Klebstoffbruch. Jüngste Weiterentwicklungen bei

bildverarbeitenden Systemen bis hin zu Chemical Colour Imaging sollten bei der Entwicklung mit einbezogen werden.

In Abschnitt 3.7.6 wurden die in diesem Projekt ermittelten Bohrkern-Scherfestigkeiten in Bezug auf den Entnahmeort der Bohrkernproben ausgewertet. Es zeigte sich, dass eine im Randbereich des Bauteils delaminierte Fuge die Bohrkern-Scherfestigkeit der nicht delaminierten Bereiche der Prüfkörper, im Vergleich zu Prüfkörpern ohne Randdelaminierung, nicht negativ beeinflusste. Auch die Versagensarten der Biege-Schubprüfkörper legen nahe, dass eine Randdelaminierung keinen erheblichen Einfluss auf die Festigkeit der dahinterliegenden, intakten Klebefuge hat, da in Klebefugen initiierte Risse oftmals direkt vom Rissgrund ab in die benachbarte Lamelle abwanderten. Die Auswertung in Kapitel 5.4 unterstützte die Vermutung, dass, solange eine Klebefuge nicht vollständig geöffnet ist, das umschließende Holz die Klebefuge „schützt“, sodass sich kein Gefälle der Klebefugenfestigkeit über die Querschnittsbreite, bzw. ein oberflächennaher Abfall der Klebefugen-Scherfestigkeit einstellt.

Weiterhin zeigte sich am untersuchten Probenmaterial, dass die Wahl der Entnahmezone entlang der Bauteil-Längsachse keine erheblichen Unterschiede bei den Bohrkern-Scherfestigkeiten nach sich zieht. Auch ein Randeinfluss der Stirnseite eines Brettschichtholzquerschnitts auf die Bohrkern-Festigkeiten konnte nicht festgestellt werden. Schlussendlich hatte auch die Wahl der Bauteilseite für die Probennahme keinen Einfluss auf die Bohrkern-Scherfestigkeiten. Daraus kann gefolgert werden, dass bei der Probennahme im Bestandstragwerk diese lokalen Aspekte nicht berücksichtigt werden müssen.

Eine Aussage zu Unterschieden bei der Entnahme von Bohrkernproben aus verschiedenen Bauteilen eines Bestandstragwerks kann auf Basis der vorliegenden Proben nicht getroffen werden, da in diesem Projekt nur einzelne Trägerabschnitte von Bestandstragwerken untersucht wurden. Einzig in Serie R wurden Bohrkernproben aus mehreren Bauteilen einer Bauteilgruppe entnommen. Innerhalb dieser Serie lässt ein Vergleich der Daten der einzelnen Versuchskörper keine Korrelation von Biege-Schubfestigkeiten und Bohrkern-Scherfestigkeiten vermuten. Zu beachten ist, dass die Serie R nur neu produziertes Brettschichtholz ohne unterschiedliche Vorbehandlung enthielt. Aufgrund der relativ geringen Streuung der Mittelwerte der Bohrkern-Scherfestigkeiten im Vergleich zur Streuung der Biege-Schubfestigkeiten erscheint die Entnahme von Bohrkernen aus mehreren Bauteilen einer Bauteilgruppe, bzw. eines Tragwerks, eine untergeordnete Rolle zu spielen. Sollten jedoch in einem Tragwerk qualitativ erkennbare Unterschiede bei verschiedenen Bauteilen bestehen, oder eine unterschiedliche statische bzw. klimatische Belastung im Gebrauch vermutet werden, so muss dies bei der Auswahl der Bohrkern-Entnahmestellen unter Umständen mitberücksichtigt werden.

Die Wahl der Proben-Entnahmestellen verteilt über die Höhe des Querschnitts könnte einen Einfluss auf die Bohrkern-Scherfestigkeiten von Trägern in Bestandsbauwerken haben. Dies konnte an ausgewählten Bohrkernproben in der Serie K untersucht werden, da die Bestandsprobe K eine zur Untersuchung geeignete Querschnittshöhe von ursprünglich ca. 2,2

m hatte. Hier nahmen die Bohrkern-Scherfestigkeiten tendenziell vom unteren in Richtung oberem Querschnittsrand ab. Auch streuten die Festigkeiten in den beiden Randzonen mehr als im mittleren Querschnittsbereich. Es wird somit empfohlen, die Stellen bei der Bohrkern-Probennahme über die Höhe des Querschnitts zu verteilen.

Auf Basis des in diesem Projekt durchgeführten Versuchsprogramms, und unter Einbezug weiterer Messdaten aus der Literatur, konnte beim Vergleich unterschiedlich vorbelasteter Brettschichtholzproben eine Korrelation der Schubfestigkeiten von auf Biegung belastetem Brettschichtholz, und der Scherfestigkeiten von im Scherversuch belasteten Bohrkernprüfkörpern aus dem gleichen Material, aufgezeigt werden. Hierbei wurde bei der Bestimmung der Biege-Schubfestigkeiten ein Größeneffekt berücksichtigt, welcher in der Literatur empfohlen wurde. Im Gegensatz zur Bestimmung eines Schubwiderstandskennwertes auf Basis der in EN 408 vorgegebenen Schubprüfung bietet die Bohrkern-Scherprüfung den Vorteil, die für Brettschichtholz charakteristischen Klebefugen in die Prüfung mit einzubeziehen. Vor allem bei Bestandsuntersuchungen muss die Verklebung explizit in die Untersuchung mit einbezogen werden. Dabei stellt die Bohrkernentnahme die einzig praktikable, zerstörungsarme Methode dar, quantitative Festigkeitswerte zu ermitteln. Auch wenn die Spannungszustände bei der Bohrkern-Scherprüfung nicht mit den Spannungszuständen im Biegeträger vergleichbar sind, scheint eine Ableitung der wahren Schubfestigkeit von Brettschichtholzelementen aus den Ergebnissen von Bohrkern-Scherprüfungen durch die gezeigte Korrelation beider Prüfergebnisse möglich zu sein. Ausgehend von einer Referenz-Bohrkern-Scherfestigkeit von neuem, qualitativ gesicherten Brettschichtholz, und dem Vergleich mit der im Rahmen einer Bestandsuntersuchung ermittelten Bohrkern-Scherfestigkeit, wäre denkbar, auf eine angepasste Schubfestigkeit als Eingangsgröße zum Nachweis des Bestandstragwerks zu schließen. In diesem Zuge kann die Berücksichtigung einer wirksamen Querschnittsbreite durch den pauschalen Ansatz des Faktors k_{cr} substituiert werden durch eine wirkliche, aus Messungen der vorhandenen Risse ermittelte, Querschnittsbreite, da die Rissbildung im Holz nach der anfänglichen Phase des Gebrauchs im oftmals abgeschlossen ist. Gleichzeitig muss die zeitliche Progression der etwaigen Delaminierung der Klebefugen regelmäßig dokumentiert und berücksichtigt werden.

Es sei darauf hingewiesen, dass das in diesem Projekt betrachtete Probenmaterial eine relativ kleine Stichprobe der Gesamtheit des sich im Gebrauch befindlichen Brettschichtholzmaterials darstellt.

Auf Basis der vorgestellten Ergebnisse, und parallel dazu angestoßener Diskussion zwischen den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses, konnte ein Entwurf einer Leitlinie zur Beurteilung von Brettschichtholzkonstruktionen im Bestand mittels Bohrkern-Scherprüfung erstellt werden. Dieser Entwurf ist im Anlage D dieses Forschungsberichtes dargestellt. Dabei orientiert er sich formell an bereits veröffentlichte Leitlinien der in diesem Projekt mitwirkenden Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. Er kann zum aktuellen Zeitpunkt als Arbeitsdokument für die Fachwelt dienen, da sich in den bereits geführten Diskussionen zu einigen Aspekten ein weiterer, nicht unerheblicher Diskussionsbedarf zeigte.

Insbesondere zur Vorgehensweise unter Ziffer 6 der Leitlinie in Anlage D zur Abschätzung des Rechenwertes einer bestehenden Bauteil-Schubfestigkeit bedarf es weiterer Untersuchungen und Festlegungen, z.B. bzgl. des notwendigen Probenumfangs sowie der Festlegung statistischer Kennwerte. Um die ausgeführten Vorgehensweisen und Empfehlungen auf Ihre Gültigkeit zu prüfen, sollten weitere Versuche nach der in diesem Projekt praktizierten Vorgehensweise durchgeführt, ausgewertet und in die Interpretation der Ergebnisse mit einbezogen werden.

Literaturverzeichnis

Veröffentlichungen

- Aicher, S. (2013). Langzeitbeständigkeit und Sicherheit Harnstoffharz-verklebter tragender Holzbauteile. Abschlussbericht zum DIBt-Forschungsvorhaben. Bauforschung, T 3298. Stuttgart.
- Blaß, H.J.; Frese, M. (2006). Biegefestigkeit von Brettschichtholz-Hybridträgern mit Randlamellen aus Buchenholz und Kernlamellen aus Nadelholz. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Bd. 6.
- Brandner, R.; Gatterrig, W.; Schickhofer, G. (2012). Determination of Shear Strength of Structural and Glued Laminated Timber. Conference Proceedings CIB-W18/45-12-2. Växjö, Schweden.
- Bröker, F.-W.; Blaik, U. (1986) Untersuchungen über die Zug- und Druckscherfestigkeit verklebter Hölzer. Holz als Roh- und Werkstoff, 44. Jg., S. 143–149.
- Clad, W. (1960). Die Beurteilung von Harnstoff-Harzleimen auf Grund ihrer Prüfung. Holz als Roh- und Werkstoff, 18. Jg. (10), S. 391–400.
- Clad, W. (1978): Harnstoffverleimte Träger nach 35 Jahren. Mitteilung aus den Anwendungstechnischen Laboratorien der BASF AG, Ludwigshafen/Rhein. Bauen mit Holz, (1), S. 17–19.
- Deppe, H.-J. (1986). Alterungsuntersuchungen an Brettschichtverleimungen. Bauen mit Holz, (9), S. 595–599.
- Deppe, H.-J. (2000). Vergleichende Untersuchungen an Brettschichtholz(BSH)-Verleimungen mit Natur- und Kunstharzen im Kurzzeitversuch nach internationalen Standards und vergleichende Untersuchungen an Brettschichtholz(BSH)-Verleimungen mit Natur- und Kunstharzen zur Ermittlung der Langzeitbeständigkeit. Abschlussbericht zum DIBt-Forschungsvorhaben. Bauforschung, T 2901. Stuttgart.
- Diamantidis, D. (2001). Probabilistic assessment of existing structures. A publication of the Joint Committee on Structural Safety (JCSS). /RILEM report, Bd. 32. Cachan.
- Dietsch, Ph.; Köhler, J. (2010). Assessment of Timber Structures. COST Action E55 "Modelling of the Performance of Timber Structures".
- Dietsch, Ph.; Wolfrum, A.; Winter, S. (2008). Evaluation of wide-span timber structures - results and recommendations. 10th World Conference on Timber Engineering. Miyazaki, Japan.
- Egner, K.; Kolb, H. (1966). Versuche über das Alterungsverhalten von Leimen für tragende Holzbauteile. Mitteilung aus dem Otto-Graf-Institut der Technischen Hochschule Stuttgart. Holz als Roh- und Werkstoff, 24. Jg. (10), S. 439–442.

- Ehlbeck, J.; Görlacher, R. (1990). Zur Problematik bei der Beurteilung der Tragfähigkeit von altem Konstruktionsholz. *Bauen mit Holz*, (2), S. 117–121.
- Feurerer, M. (2009). Beurteilung von Brettschichtholz im Bestand Beziehungen von Kleinproben und Tragwerk. Diplomarbeit. TU München.
- Gaspar, F.; Cruz, H.; Gomes, A. (2008). Evaluation of glued laminated timber structures - core extraction and shear testing. 10th World Conference on Timber Engineering 2008. Miyazaki, Japan.
- Gatterinig, W. (2012). Prüftechnische Ermittlung der Schubfestigkeit von Vollholz und Analyse des Größeneinflusses. Masterarbeit. TU Graz.
- Glos, P.; Heimeshoff, B.; Kelletshofer, W. (1987). Einfluß der Belastungsdauer auf die Zug- und Druckfestigkeit von Fichten-Brettlamellen. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 45. Jg., S. 243– 49.
- Halasz, R. von (1957). *Holzbau Taschenbuch*. 5. Auflage. Berlin.
- Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. (2016). Leitfaden zu einer ersten Begutachtung von Hallentragwerken aus Holz. Wuppertal.
- Klapp, H.; Brüninghoff, H. (2005). Shear strength of glued laminated timber. Conference Proceedings CIB-W18/38-6-3. Karlsruhe, Germany.
- Klemm, H. (1987). Holzleimbau - die Geschichte seiner Leime. *Bauen mit Holz*, (10), S. 658–662.
- Kolb, H.; Frech, P. (1978). Alterungsbeständigkeit von harnstoffharzverleimtem Brettschichtholz. *Bauen mit Holz*, (3), S. 120–122.
- Koller, A. (2007). Gegenüberstellung und Durchführung von Versuchen zur Ermittlung der Scherfestigkeit von Klebfugen in BSH. Diplomarbeit. TU München.
- Kollmann, F. (1951). *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. 2. Auflage. Berlin.
- Kowaltschuk, L. M. (1979). Verleimte Holzverbindungen - Anforderungen und Prüfverfahren. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 37. Jg., S. 91–95.
- Kránitz, K.; Sonderegger, W.; Bues, C.-T.; Niemz, P. (2016). Effects of aging on wood. A literature review. *Wood Science and Technology*, 50. Jg. (1), S. 7–22.
- Künniger, T. (2007). Automatische Bestimmung des prozentualen Faserbruchanteils bei der industriellen Klebfestigkeitsprüfung. Abschlussbericht. EMPA, Dübendorf.
- Künniger, T. (2008). A semi-automatic method to determine the wood failure percentage on shear test specimens. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 66. Jg. (3), S. 229–232.
- Lackner, H. (2011). Festlegung einer Prüfkfiguration für die Ermittlung der Schubfestigkeit von Vollholz sowie Analyse des Größeneinflusses. Diplomarbeit. TU Graz.

- Lavisci, P.; Berti, S.; Pizzo, B.; Triboulot, P.; Zanuttini, R. (2001). A shear test for structural adhesives used in the consolidation of old timber. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 59. Jg., S. 145–152.
- Möhler, K.; Steck, G. (1980). Untersuchungen über die Rißbildung in Brettschichtholz infolge Klimabeanspruchung. *Bauen mit Holz*, (4), S. 94–100.
- Muliyanto, F. (2007). E-Modellierung und Vergleich von Versuchsaufbauten zur Ermittlung der Scherfestigkeit von Klebefugen in BSH. Diplomarbeit. TU München.
- Niemz, P. (1993). Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. *Holz Anatomie - Chemie - Physik*.
- Niemz, P.; Sonderegger, W. U. (2017). Holzphysik. *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*.
- Özdemir, S. (2009). Alterungsmechanismen von Klebstoffen für tragende Holzbauteile. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur Wien.
- Raknes, E. (1997). Durability of structural wood adhesives after 30 years ageing. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 35. Jg., S. 83–90.
- Rug, W.; Linke, G.; Winter, L. (2013). Untersuchungen zur Festigkeit der Klebefugen von historischem Brettschichtholz. *Bautechnik*, 90. Jg. (10), S. 651–659.
- Rug, W.; Seemann, A. (1989). Festigkeit von Altholz. *Bauen mit Holz*, (10), S. 696–699.
- Scharmacher, F. (2011). Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Klebstofffugenqualität. Zulassungsarbeit zum MSE. Berner Fachhochschule, Bern.
- Scharmacher, F. (2012). Analyse und Beurteilung der Klebstofffugenqualität einer exponiert bewitterten Brettschichtholzkonstruktion am Beispiel des ehem. Olympia-Radstadions (Event-Arena München). Projektarbeit. Berner Fachhochschule, Bern.
- Schickhofer, G. (2001). Determination of shear strength values for GLT using visual and machine graded spruce laminations. *Conference Proceedings CIB-W18/34-12-6*. Venice, Italy.
- Schriever, E.; Roffael, E. (1987). UF-Harze: Alterung und physikalisch-chemische Eigenschaften. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 45. Jg., S. 508.
- Seraphin, M. (2003). Zur Entstehung des Ingenieurholzbaus. Eine Entwicklungsgeschichte. Dissertation. TU München.
- Steiger, R.; Gehri, E. (2007). Quality Control of Glulam: Shear Tests of Glue Lines. *Conference Proceedings CIB-W18/40-12-7*, Bled, Slovenia.
- Steiger, R.; Gehri, E. (2010). Quality control of glulam: Improved method for shear testing of glue lines. *COST Action E53 "The Future of Quality Control for Wood & Wood Products"*.
- Tannert, T.; Vallée, T.; Müller, A. (2012). Critical review on the assessment of glulam structures using shear core samples. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, (2), S. 65–72.

Winter, S.; Kreuzinger, H. (2008). The Bad Reichenhall ice-arena collapse and the necessary consequences for wide span timber structures. 10th World Conference on Timber Engineering. Miyazaki, Japan.

Yang, Y.; Gong, M.; Chui, Y. H. (2008). A new image analysis algorithm for calculating percentage wood failure. Holzforschung, 62. Jg. (2), S. 984.

Normen und Regelwerke

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-838 (2018). Furnierschichtholz aus Buche zur Ausbildung stabförmiger und flächiger Tragwerke "Platte BauBuche S" und "Platte BauBuche Q". Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH. DIBt, Berlin.

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-519 (2014). SPAX®-S Schrauben mit Vollgewinde als Holzverbindungsmittel. SPAX International GmbH & Co. KG. DIBt, Berlin.

Bayerisches Staatsministerium des Innern (2006). Hinweise für die Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen durch den Eigentümer/Verfügungsberechtigten.

DIN EN 314:1993-08. Sperrholz - Qualität der Verklebung Teil 1: Prüfverfahren. DIN, Berlin.

DIN EN 386:2002-04. Brettschichtholz - Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung. DIN, Berlin.

DIN EN 1995-1-1:2010-12. Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008. DIN, Berlin.

DIN EN 408:2012-10. Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften; Deutsche Fassung EN 408:2010+A1:2012. DIN, Berlin.

DIN EN 14080:2013-09. Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen; Deutsche Fassung EN 14080:2013. DIN, Berlin.

DIN EN 301:2013-12. Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile – Klassifizierung und Leistungsanforderungen; Deutsche Fassung EN 301:2013. DIN, Berlin.

DIN EN 302-1:2013-06. Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Prüfverfahren – Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit; Deutsche Fassung EN 302-1:2013. DIN, Berlin.

DIN EN 302-2:2013-06. Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Prüfverfahren – Teil 2: Bestimmung der Delaminierungsbeständigkeit; Deutsche Fassung EN 302-2:2013. DIN, Berlin.

E DIN EN 10025-2:2018-07. Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle; Deutsche und Englische Fassung prEN 10025-2:2018. DIN, Berlin.

Europäische technische Bewertung ETA-12/0062 (2019). SFS Selbstbohrende Schrauben WR. SFS intec AG. DIBt, Berlin.

Fachkommission Bautechnik der Bauministerkonferenz (ARGEBAU) (2013). Hinweise zur Einschätzung von Art und Umfang zu untersuchender harnstoffharzverklebter Holzbauteile auf mögliche Schäden aus Feuchte- oder Temperatureinwirkungen durch den Eigentümer / Verfügungsberechtigten. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.

Anlage A

Messdatenverläufe der Biege-Schubversuche

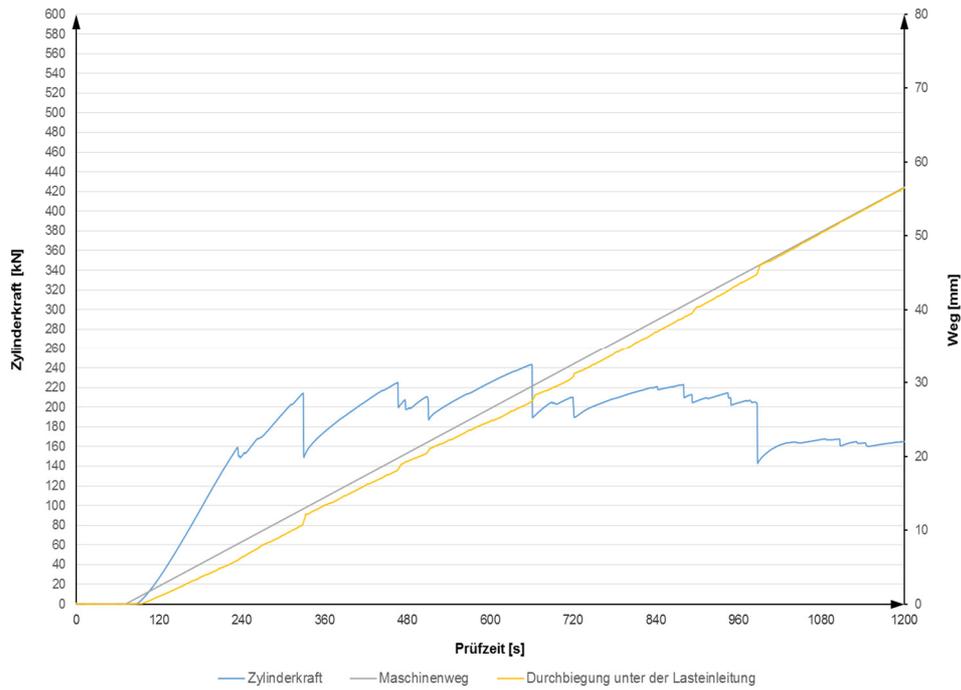


Abbildung A-1: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch K-I; Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

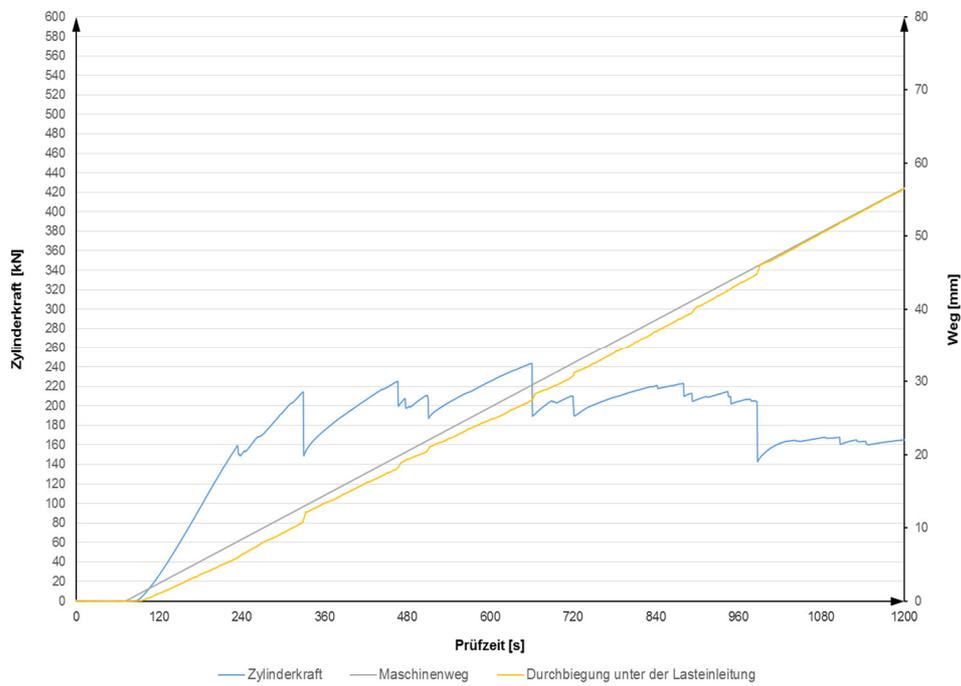


Abbildung A-2: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch K-II; Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

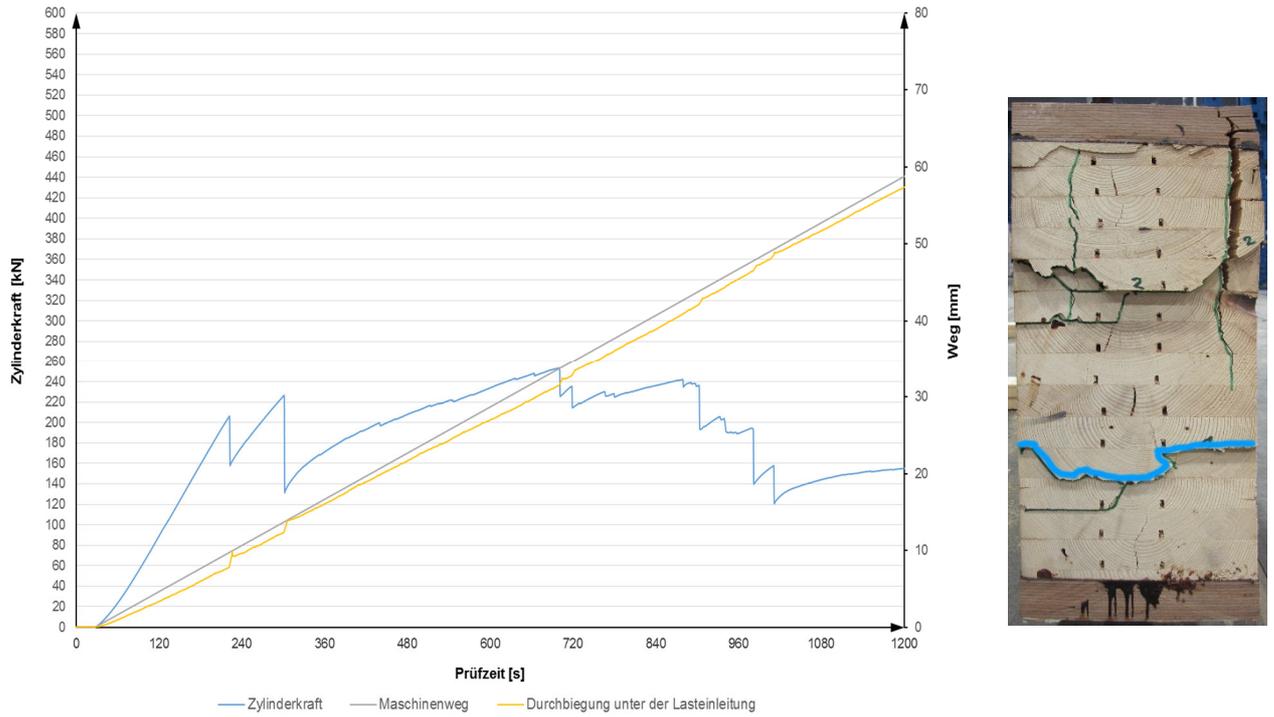


Abbildung A-3: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch K-III; Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

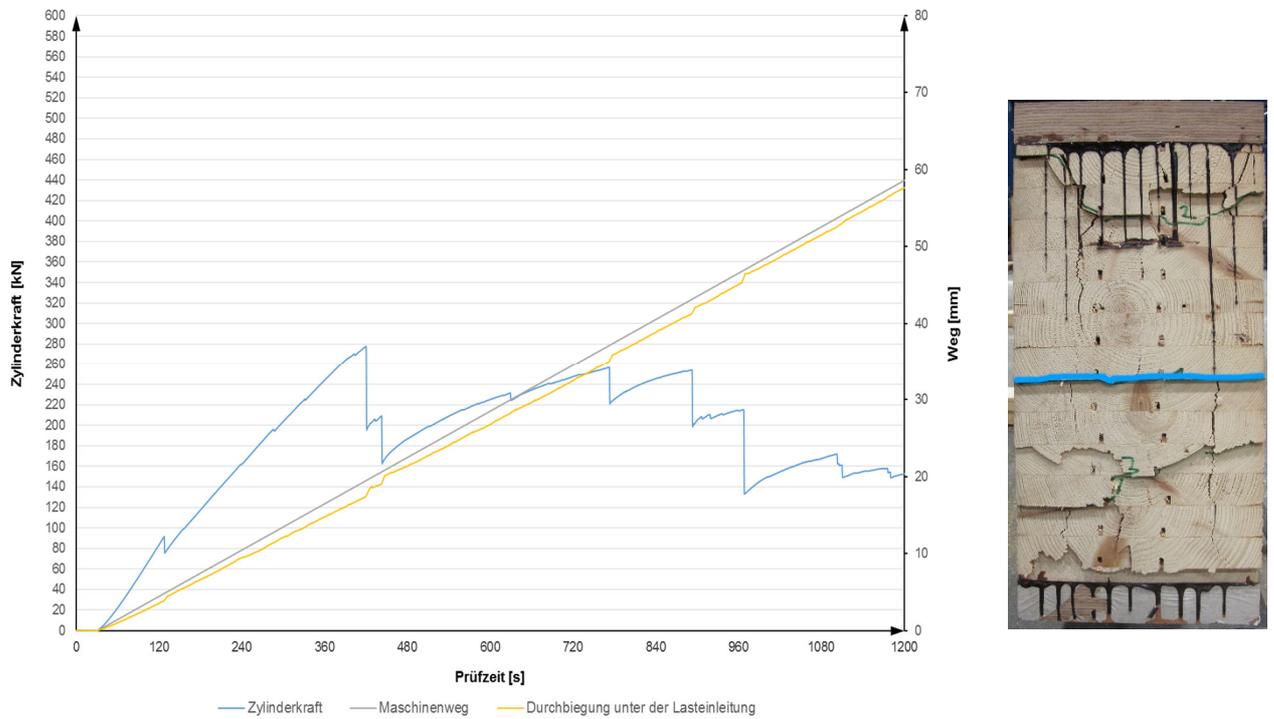


Abbildung A-4: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch K-IV; Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

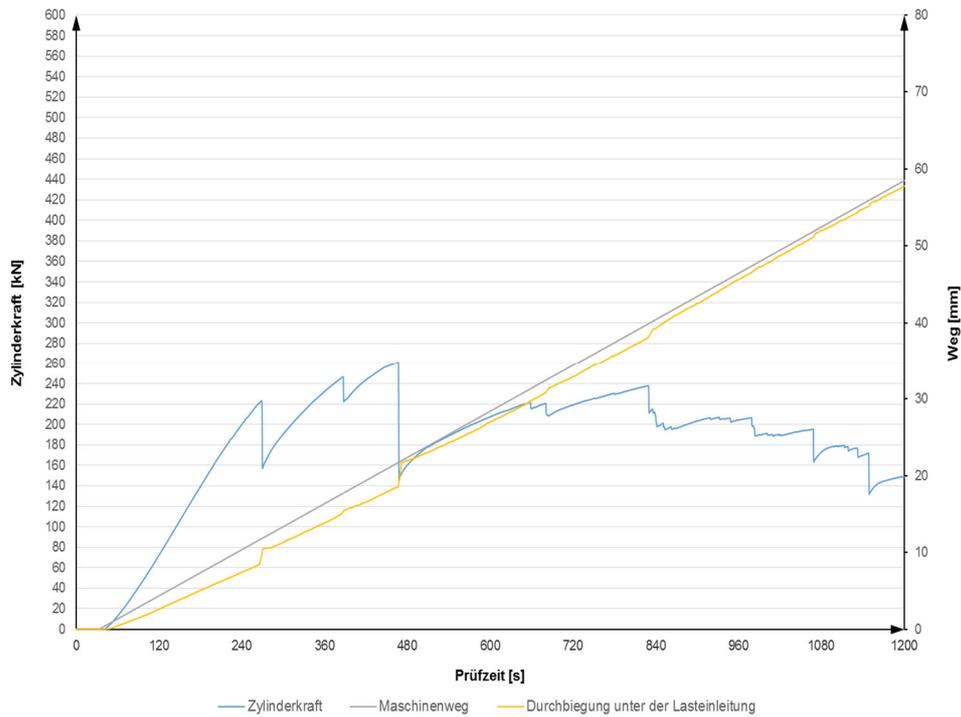


Abbildung A-5: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch K-V;
Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

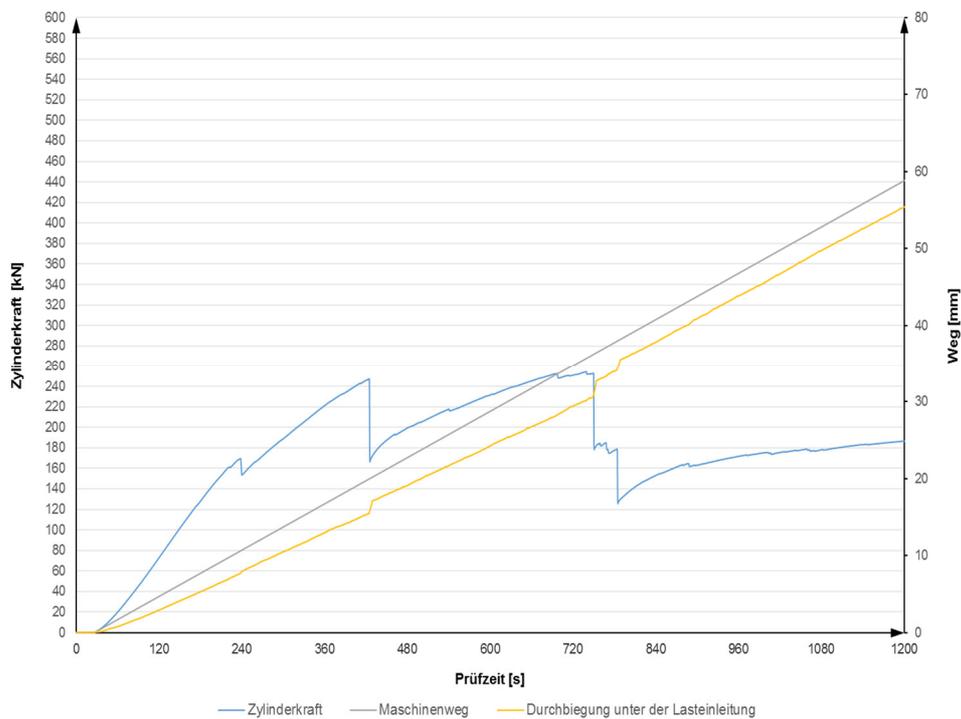


Abbildung A-6: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch K-VI;
Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

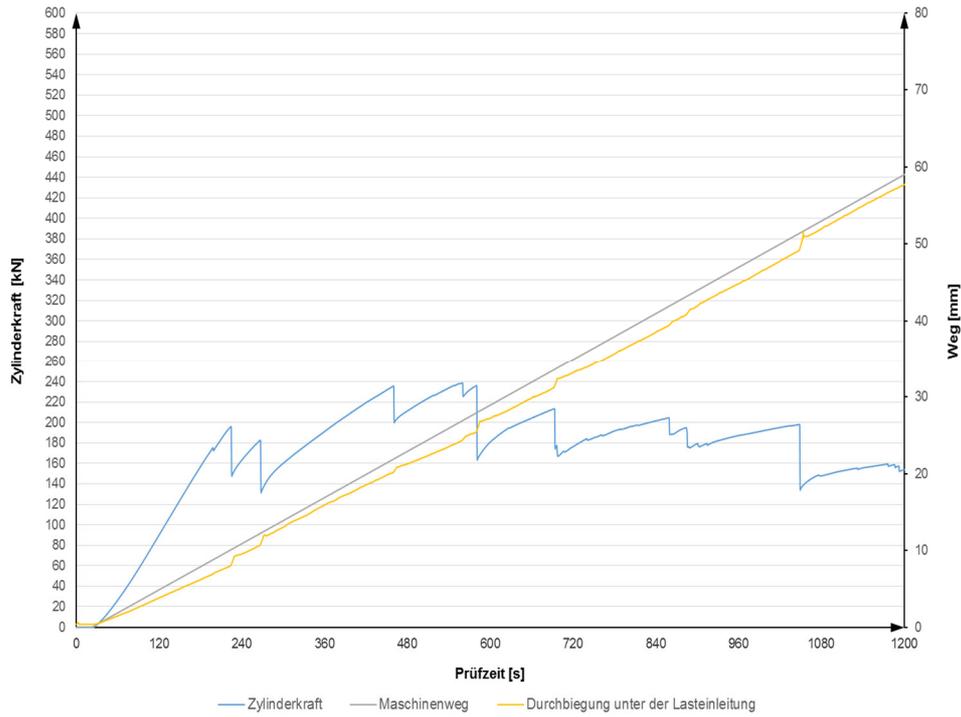


Abbildung A-7: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch K-VII;
Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

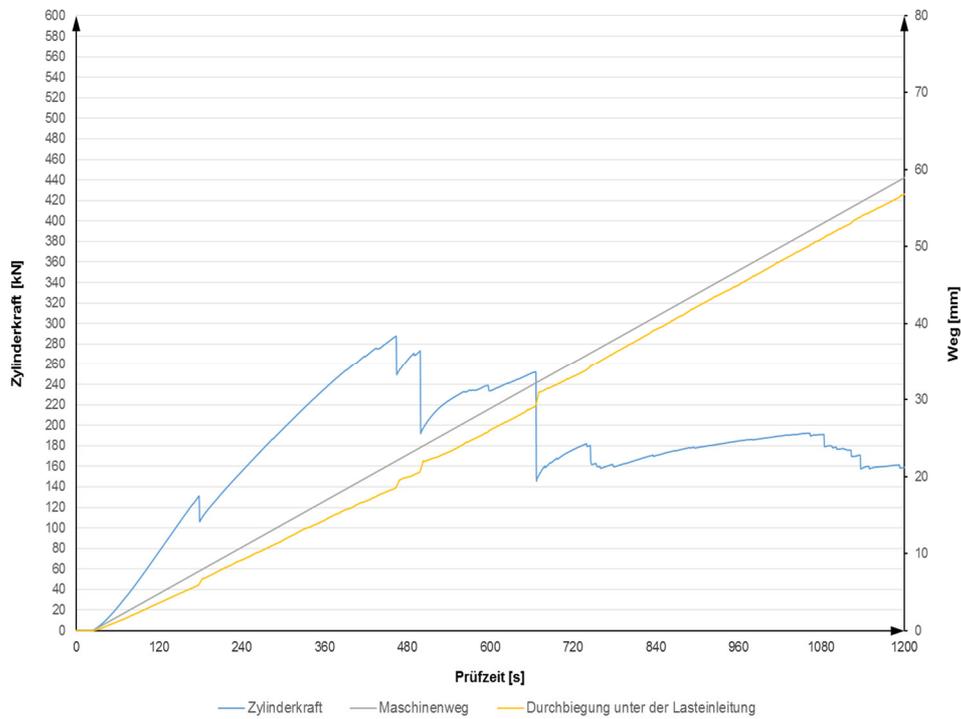


Abbildung A-8: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch K-VIII;
Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

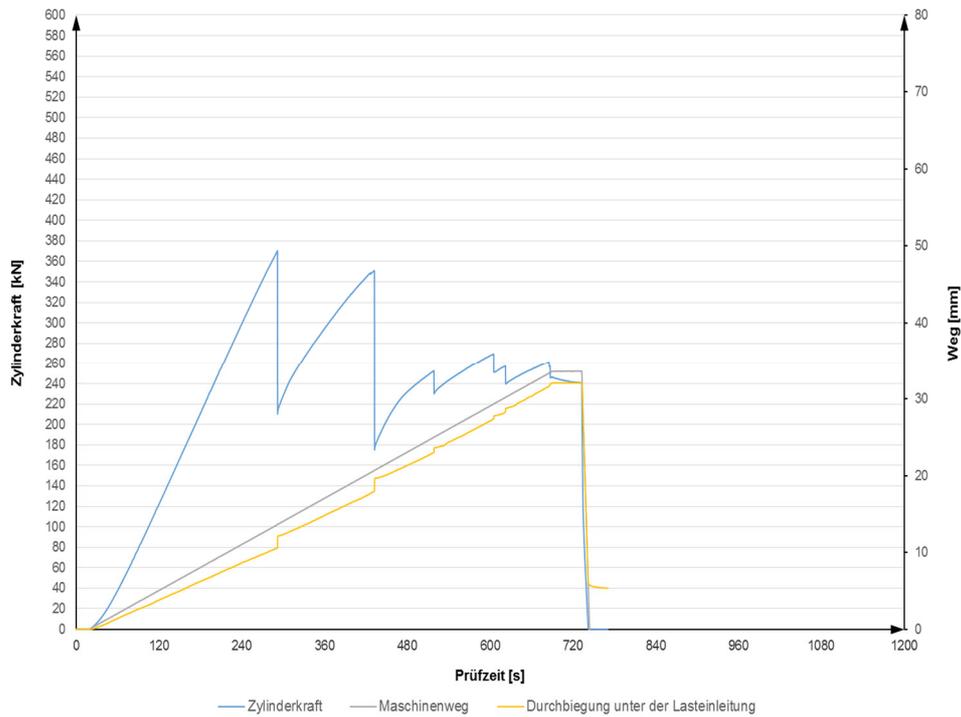


Abbildung A-9: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch O-I; Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

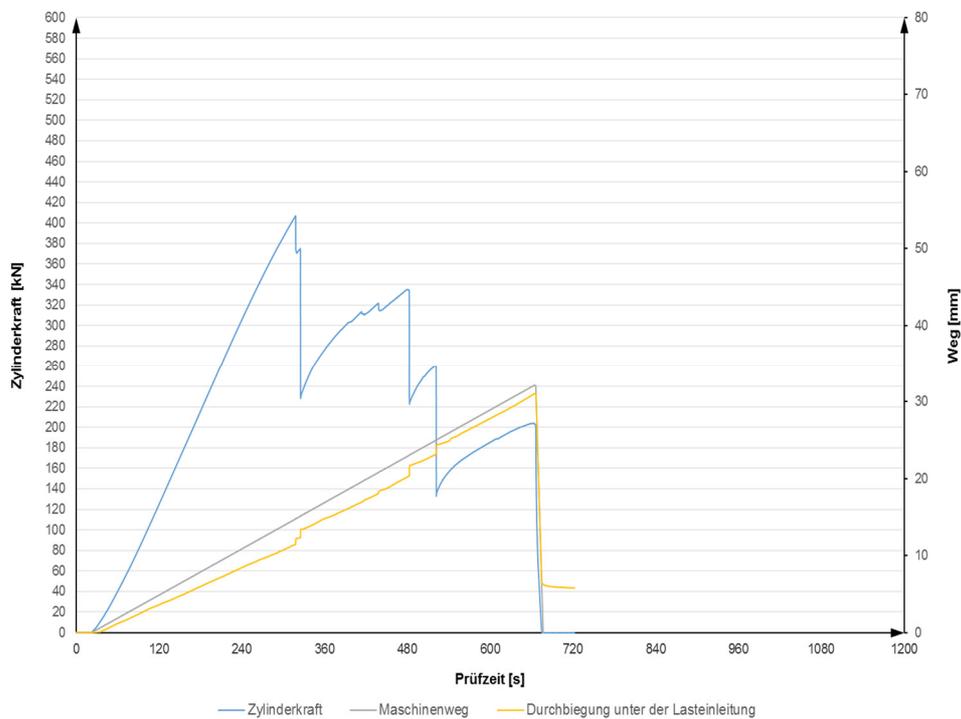


Abbildung A-10: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch O-II; Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

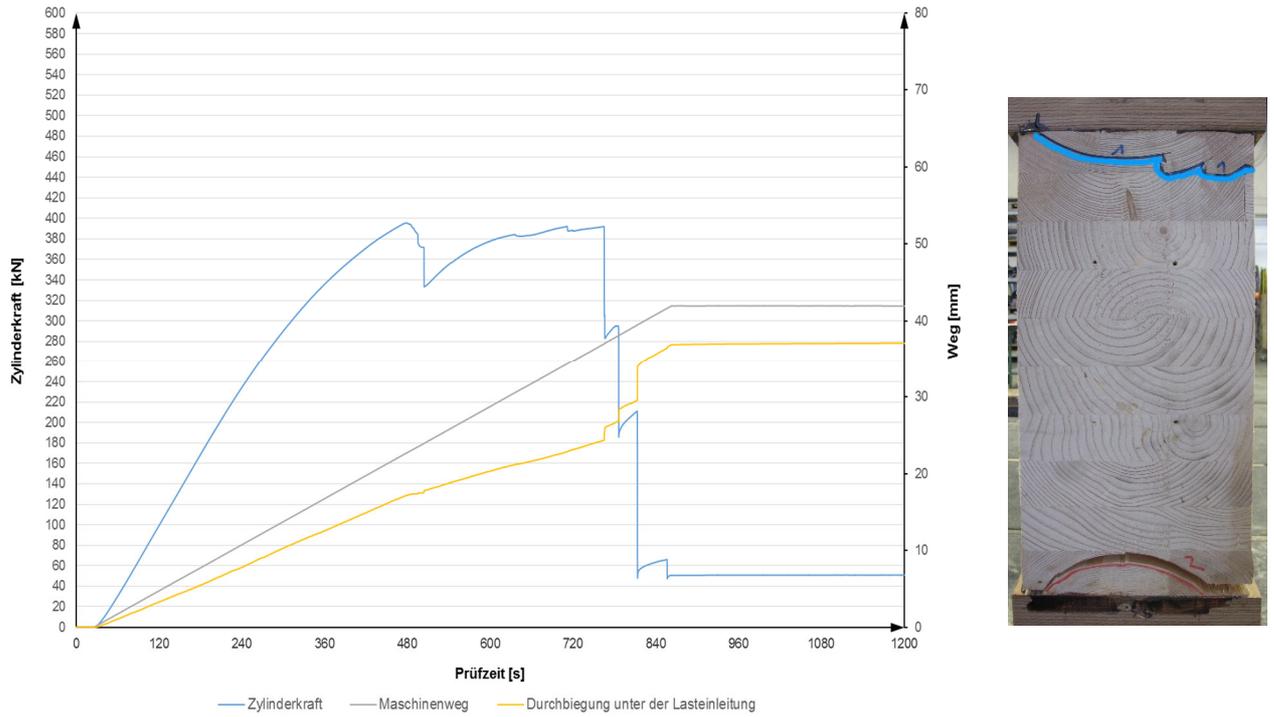


Abbildung A-11: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch R-I; Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

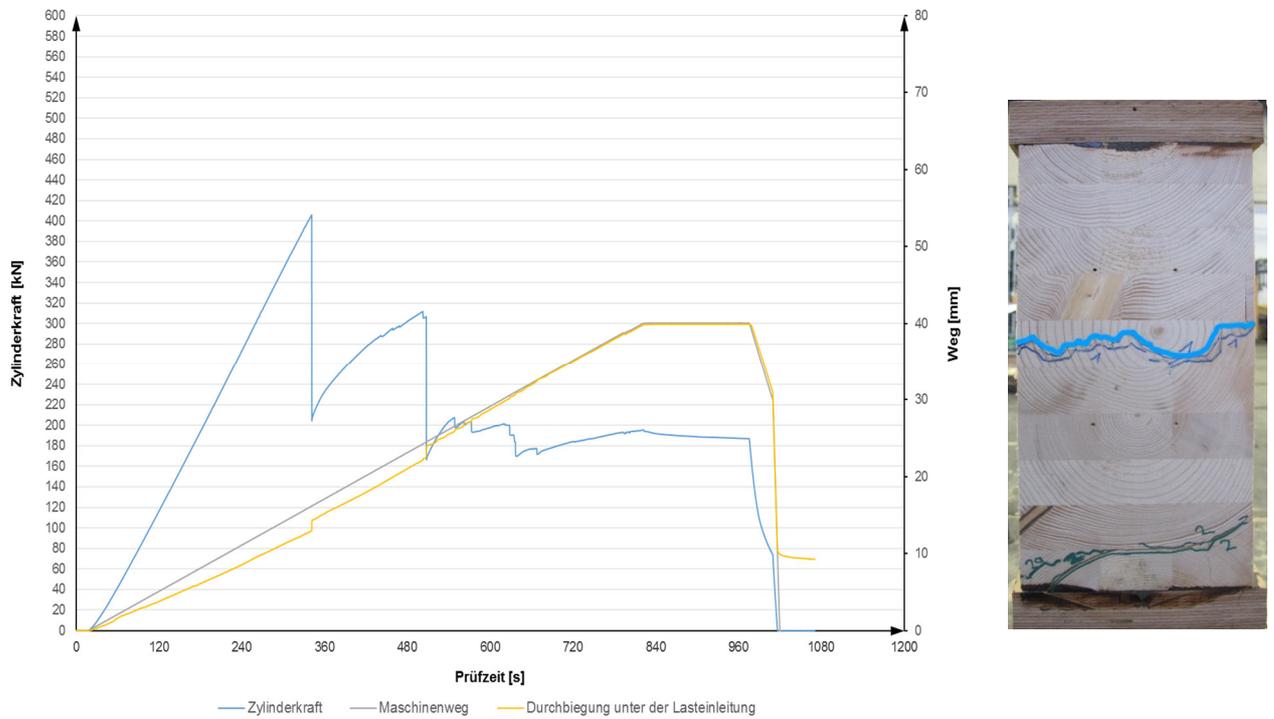


Abbildung A-12: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch R-II; Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

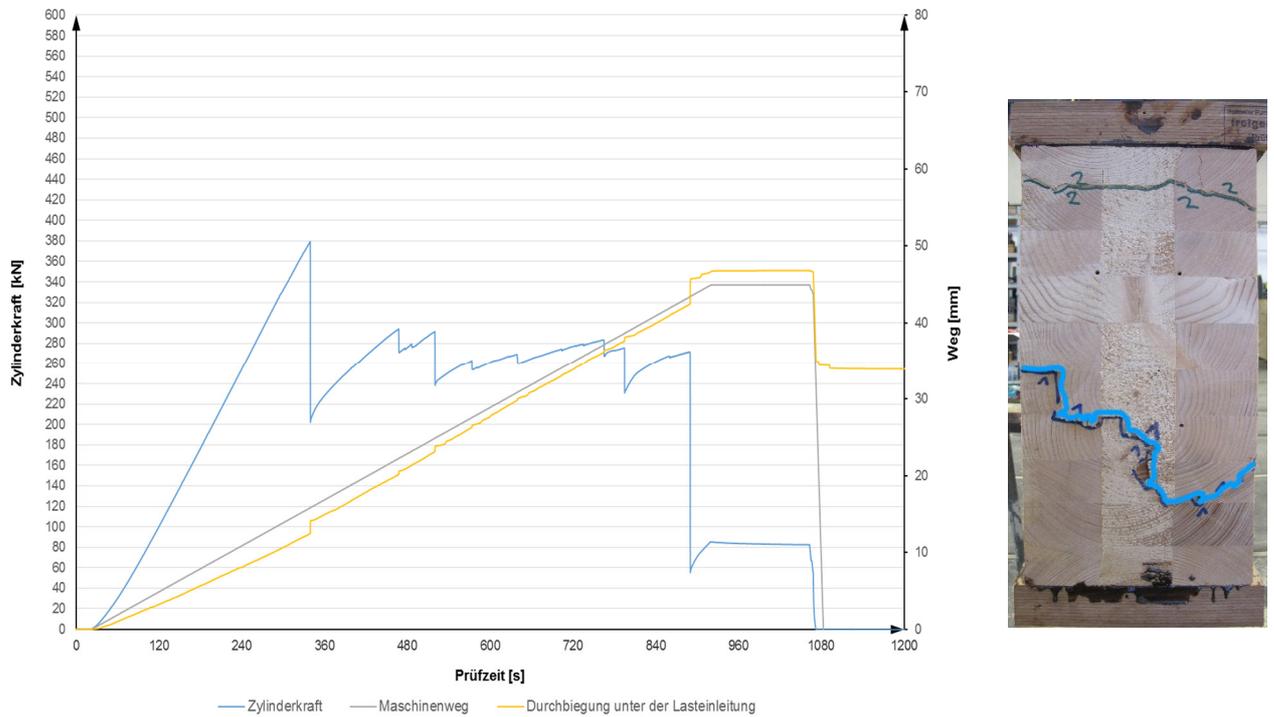


Abbildung A-13: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch R-III; Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

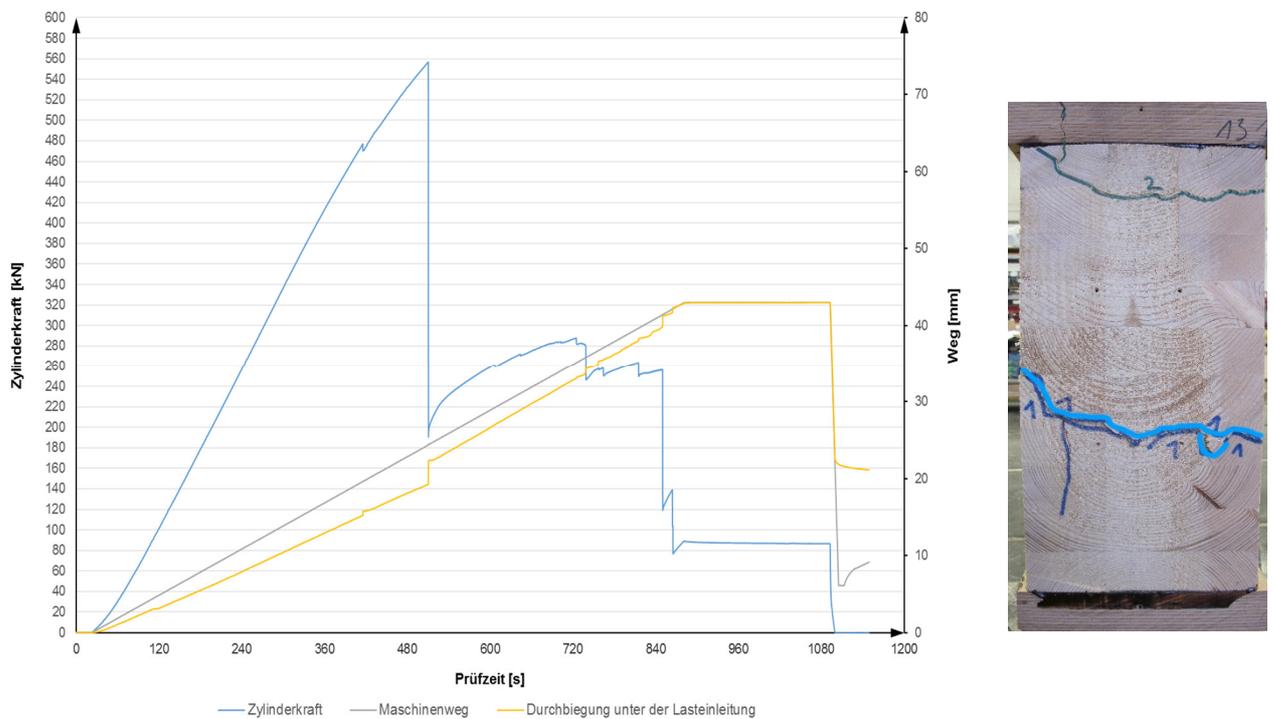


Abbildung A-14: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch R-IV; Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

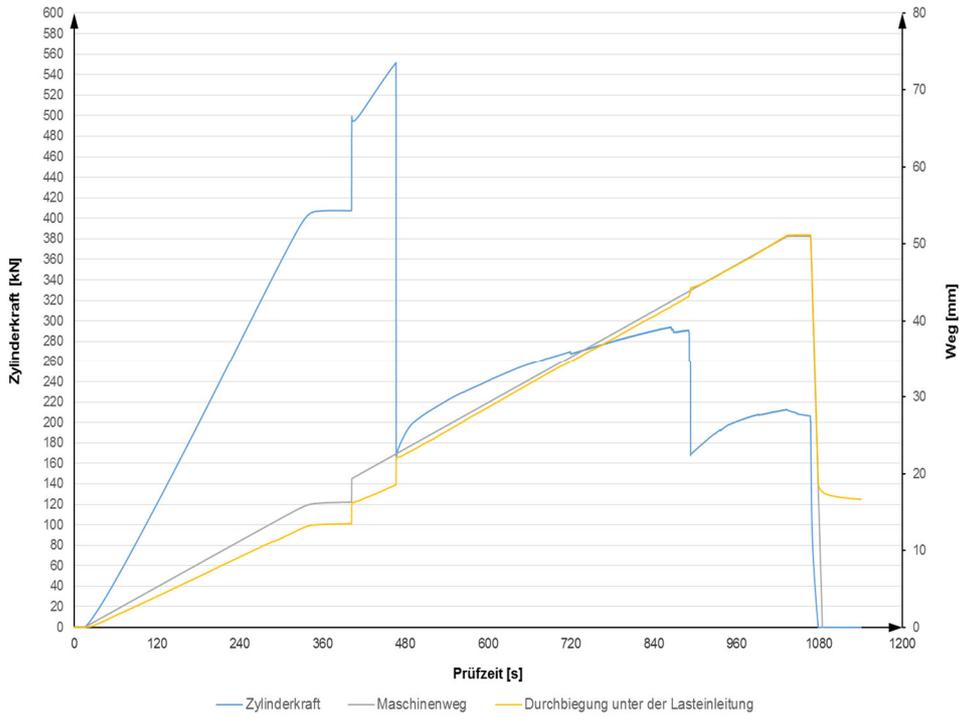


Abbildung A-15: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch R-V; Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

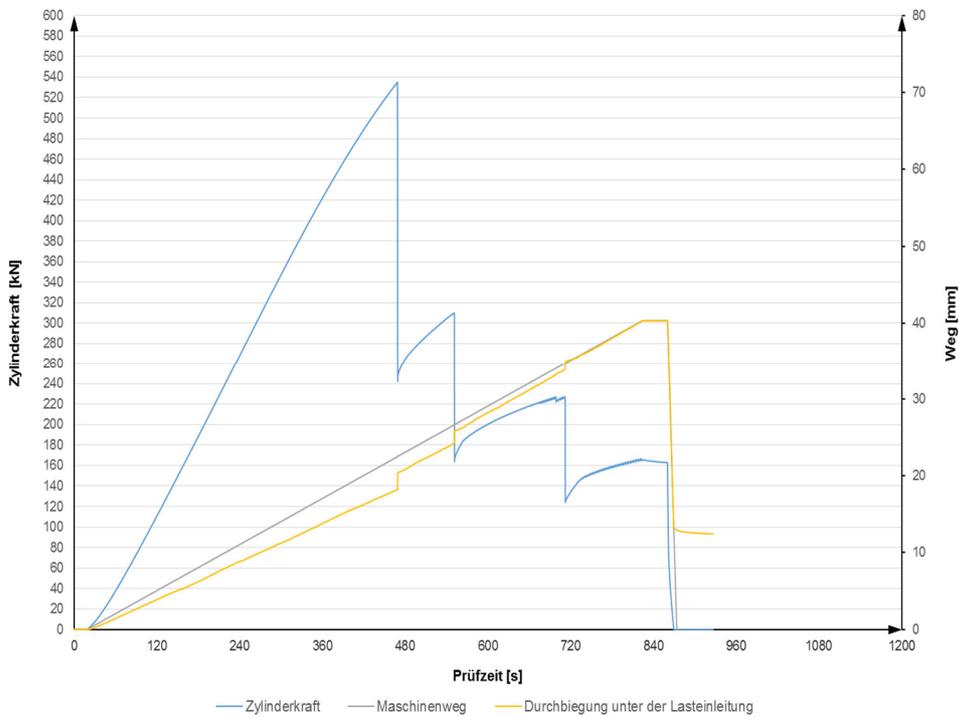


Abbildung A-16: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch R-VI; Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

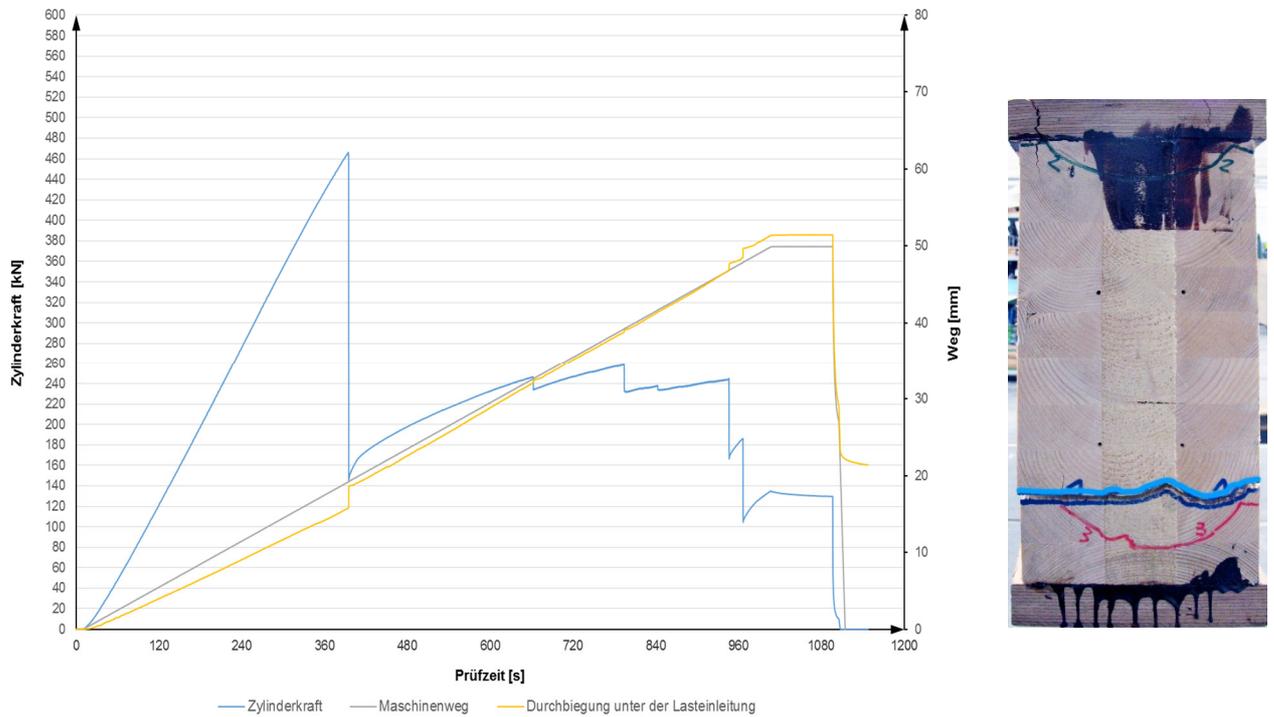


Abbildung A-17: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch R-VII; Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

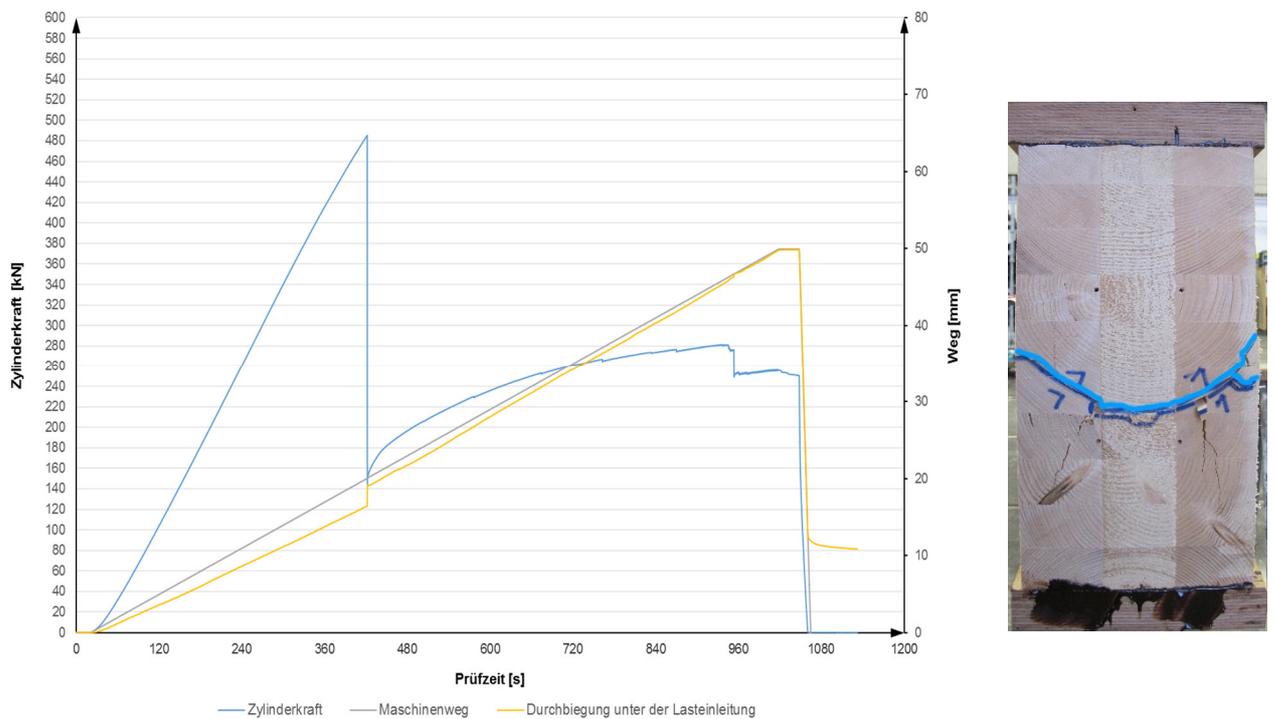


Abbildung A-18: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch R-VIII; Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

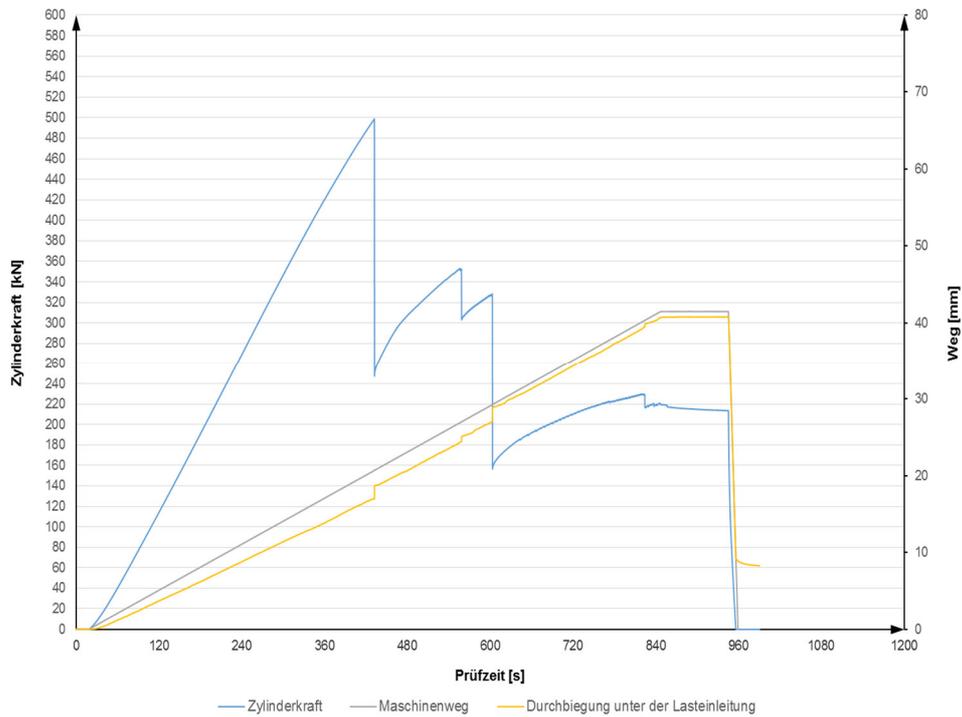


Abbildung A-19: Belastungs- und Verformungshistorie beim Biege-Schubversuch R-IX; Bruchbild am Querschnittsende des Prüffeldes

Anlage B

Parameter der Schubprüfkörper

Tabelle B-1: Parameter der Schubprüfkörper

Träger Abschnittsnr. [-]	Lamelle/ Fuge [-]	Lamellenr. Fugennr. [-]	Längslage im Abschnitt [mm]	Seite A [-]	Abstand von Prüfkörper- länge [mm]	Prüfkörper- höhe [mm]	Prüfkörper- breite [mm]	Masse [g]	Rohdichte [kg/m³]	Holzfeuchte [%]	Schubfestigkeit [N/mm²]
K 7	5	F	0-300	15-50	300	55,4	32,2	251	469	10,1	3,24
K 7	5	F	0-300	80-115	300	55,7	32,0	221	413	10,2	4,58
K 7	5	F	0-300	150-185	300	55,4	32,6	262	484	10,3	1,70
K 7	5	F	0-300	40-75	294	53,7	30,0	206	434	10,1	3,99
K 7	5	F	0-300	95-130	295	54,5	30,7	214	433	10,4	1,70
K 7	5	F	0-300	140-175	297	54,5	32,6	252	477	10,1	2,40
K 7	5	F	0-300	175-210	300	55,1	29,7	229	466	10,3	3,51
K 7	5	F	0-300	20-55	294	54,0	32,6	249	480	10,0	3,69
K 7	5	F	0-300	90-125	300	55,5	32,2	251	467	10,1	1,73
K 7	5	F	0-300	135-170	300	54,9	32,3	247	464	10,2	2,07
K 7	5	F	0-300	175-210	300	54,5	32,5	270	508	9,8	4,47
K 7	5	F	0-300	0-35	293	54,1	32,4	232	452	9,9	3,00
K 7	5	F	0-300	35-70	294	54,1	32,5	232	449	10,4	4,59
K 7	5	F	0-300	90-125	300	55,5	32,5	249	460	10,0	3,06
K 7	5	F	0-300	150-185	300	55,5	29,5	213	434	10,3	4,12
K 7	5	L	0-300	10-70	292	53,8	29,6	207	444	10,3	5,25
K 7	5	L	0-300	75-135	270	48,2	29,4	193	505	10,4	6,07
K 7	5	L	0-300	150-210	300	55,5	29,7	211	426	10,4	4,59
K 6	6	F	250-550	10-45	300	55,5	32,3	236	439	10,2	3,71
K 6	6	F	250-550	135-170	300	55,6	32,3	235	436	10,2	3,94
K 6	6	F	250-550	175-210	300	55,4	32,5	252	466	10,1	4,23
K 6	6	F	250-550	30-65	300	55,6	32,1	222	414	10,2	4,02
K 6	6	F	250-550	130-165	300	54,8	32,4	220	413	10,4	2,55
K 6	6	F	250-550	170-205	300	55,5	32,1	240	448	10,2	3,67
K 6	6	F	250-550	160-195	300	55,4	32,2	230	430	10,2	5,15
K 6	6	L	250-550	75-135	278	50,1	29,3	182	446	10,4	3,08
K 6	6	L	250-550	70-130	279	50,0	28,9	177	438	10,5	6,22
K 6	6	L	250-550	15-70	300	55,4	28,5	251	530	10,1	4,71

Tabelle B-1: Parameter der Schubprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.	Lamelle/ Fuge	Lamellenr. Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Seite A	Abstand von länge	Prüfkörper- höhe	Prüfkörper- breite	Masse	Rohdichte	Holzfeuchte	Schubfestigkeit
[-]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[%]	[N/mm ²]
4	5	F	2	0-300	20-55	300	55,3	32,6	223	412	10,4	4,26
4	5	F	2	0-300	140-175	300	55,7	32,4	221	409	10,2	2,70
4	5	F	2	0-300	180-215	292	53,8	32,4	211	414	10,1	5,15
4	5	F	5	0-300	10-45	300	55,2	32,7	246	455	10,0	3,34
4	5	F	5	0-300	50-85	300	55,4	32,3	223	415	10,4	4,87
4	5	F	5	0-300	145-180	300	55,1	32,4	234	437	10,6	4,31
4	5	F	9	0-300	25-60	300	55,2	32,5	267	496	10,2	4,13
4	5	F	9	0-300	105-140	300	54,6	32,5	246	463	10,3	3,97
4	5	F	9	0-300	150-185	300	55,1	32,6	255	472	10,2	4,30
4	5	F	13	0-300	5-40	294	54,3	32,5	256	494	10,1	5,97
4	5	F	13	0-300	50-85	300	55,3	32,3	257	480	10,4	2,38
4	5	F	13	0-300	100-135	294	53,8	32,7	252	488	10,3	4,98
4	5	F	13	0-300	145-180	300	55,3	32,6	252	466	10,3	4,12
4	5	L	11	0-300	20-75	293	53,7	29,1	201	440	10,4	4,22
4	5	L	11	0-300	85-140	278	50,1	29,6	170	412	10,3	4,59
4	5	L	11	0-300	150-205	300	55,2	28,8	205	429	10,4	3,40
7	3	F	3	210-510	80-115	300	55,1	32,0	233	440	10,3	4,72
7	3	F	3	210-510	135-170	282	51,3	31,7	209	456	10,3	2,80
7	3	F	6	210-510	0-35	300	55,0	31,9	242	460	9,7	1,23
7	3	F	6	210-510	40-75	300	55,1	31,8	232	441	9,9	1,84
7	3	F	6	210-510	160-195	300	54,9	32,0	238	452	10,3	0,26
7	3	F	8	210-510	20-55	300	55,1	31,9	245	465	10,0	0,12
7	3	F	8	210-510	135-170	300	55,0	32,1	247	467	10,1	1,50
7	3	F	8	210-510	175-210	300	55,2	32,0	265	501	10,1	3,98
7	3	F	11	210-510	165-200	300	55,0	32,1	242	457	10,0	0,16
7	3	L	14	210-510	10-70	300	55,2	28,5	204	431	9,9	3,79
7	3	L	14	210-510	75-130	277	49,9	28,7	180	455	10,2	2,67
7	3	L	14	210-510	145-205	300	55,2	30,2	217	434	10,3	5,04

Tabelle B-1: Parameter der Schubprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.	Lamelle/ Fuge	Lamellenr. Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Abstand von Seite A	Prüfkörper- länge	Prüfkörper- höhe	Prüfkörper- breite	Masse	Rohdichte	Holzfeuchte	Schubfestigkeit
[-]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[%]	[N/mm ²]
K6	5	F	5	0-300	0-35	300	55,0	32,0	232	439	10,5	4,29
K6	5	F	5	0-300	35-70	300	54,6	31,9	219	419	10,6	3,87
K6	5	F	5	0-300	130-165	300	55,0	31,7	217	416	10,7	4,09
K6	5	F	5	0-300	170-205	300	55,1	32,2	234	440	10,5	4,43
K6	5	F	11	0-300	175-210	300	55,2	31,9	242	457	10,3	3,76
K6	5	L	10	0-300	10-70	300	55,1	30,1	267	537	10,8	5,30
K4	3	F	2	210-510	5-40	300	55,1	31,9	219	416	10,2	0,38
K4	3	F	2	210-510	45-80	289	52,7	32,0	213	436	10,4	4,15
K4	3	F	2	210-510	95-130	300	55,4	31,9	213	403	10,1	1,49
K4	3	F	2	210-510	145-180	300	55,2	32,4	223	416	10,2	1,26
K4	3	F	2	210-510	185-215	300	55,1	32,5	221	412	9,6	4,45
K4	3	F	5	210-510	40-75	300	55,2	31,9	222	421	10,1	2,10
K4	3	F	5	210-510	150-185	296	54,2	31,8	226	443	10,0	1,00
K4	3	F	9	210-510	10-45	300	55,2	31,7	270	515	9,9	4,34
K4	3	F	9	210-510	50-85	300	55	31,9	248	471	10,2	3,92
K4	3	F	9	210-510	100-135	295	53,9	32,2	248	484	9,6	4,12
K4	3	F	9	210-510	160-195	300	54,9	32,2	246	464	10,1	2,91
K4	3	F	13	210-510	45-80	300	55,0	32,2	239	449	10,5	1,18
K4	3	F	13	210-510	170-205	300	55,2	32,3	245	457	9,8	0,70
K1	5	F	3	10-310	10-45	287	51,8	31,8	211	446	9,8	4,85
K1	5	F	3	10-310	50-85	287	51,8	31,8	208	440	9,3	2,41
K1	5	F	3	10-310	170-205	300	54,9	32,0	243	462	10,4	2,16
K1	5	F	7	10-310	10-45	300	55,0	31,9	266	506	10,1	5,78
K1	5	F	7	10-310	180-215	300	55,0	32,0	278	526	10,2	4,51
K1	5	F	11	10-310	10-45	300	55,0	31,8	253	483	10,1	3,64
K1	5	F	11	10-310	50-85	300	55,0	31,9	254	483	9,5	4,04
K1	5	F	11	10-310	160-195	300	54,1	31,8	258	500	9,9	4,10
K1	5	L	2	10-310	10-70	300	54,9	32,0	272	517	10,3	4,87

Tabelle B-1: Parameter der Schubprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.	Lamelle/ Fuge	Lamellenr. Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Abstand von Seite A	Prüfkörper- länge	Prüfkörper- höhe	Prüfkörper- breite	Masse			Schubfestigkeit
									[mm]	[mm]	[mm]	
K1	5	L	9	10-310	150-205	278	50,0	27,7	165	429	10,2	2,45
K1	6	F	3	205-505	5-40	300	54,4	29,9	235	482	4,1	4,26
K1	6	F	3	205-505	50-85	298	54,4	31,3	247	486	4,7	4,71
K1	6	F	3	205-505	160-195	300	54,5	30,3	232	469	4,1	4,21
K1	6	F	7	205-505	5-40	298	54,3	30,2	249	509	3,7	5,09
K1	6	F	7	205-505	45-80	290	53,2	31,1	241	502	4,1	3,77
K1	6	F	7	205-505	150-185	296	54,4	31,2	267	531	4,0	4,05
K1	6	F	11	205-505	10-45	300	54,3	31,2	238	468	3,8	4,12
K1	6	F	11	205-505	50-85	297	54,4	31,2	258	512	4,0	5,11
K1	6	F	11	205-505	95-130	299	54,5	30,9	244	485	4,3	5,08
K1	6	F	11	205-505	175-210	296	54,3	31,0	239	480	3,9	4,28
K1	6	L	2	205-505	90-150	278	49,8	30,0	215	518	4,1	6,71
K1	6	L	5	205-505	85-145	278	49,3	28,3	189	487	4,1	2,97
O1	4	F	2	300-600	10-45	300	55,0	31,8	247	471	10,5	5,39
O1	4	F	2	300-600	120-155	300	54,9	31,8	252	481	10,5	3,17
O1	4	F	2	300-600	160-195	300	55,0	31,9	252	478	10,5	5,11
O1	4	L	2	300-600	50-110	300	55,0	32,0	268	507	10,5	4,88
O1	4	F	4	300-600	10-45	300	55,0	31,7	260	498	10,4	4,48
O1	4	F	4	300-600	50-85	300	55,0	31,8	259	494	10,6	4,41
O1	4	F	4	300-600	160-195	300	54,9	31,9	251	478	10,2	4,42
O1	4	L	4	300-600	95-150	300	54,9	31,9	254	484	10,4	5,49
O1	4	F	6	300-600	30-65	300	55,0	32,0	250	473	10,2	3,90
O1	4	F	6	300-600	135-170	300	55,0	31,8	245	466	10,2	4,16
O1	4	L	8	300-600	10-70	300	55,0	31,9	222	422	10,2	3,98
O1	4	L	8	300-600	120-180	300	55,0	31,8	244	465	10,5	2,53
O1	5	F	2	400-700	15-50	300	54,9	31,9	248	472	10,4	4,20
O1	5	F	2	400-700	55-90	300	55,2	31,8	271	515	10,5	4,92
O1	5	F	2	400-700	160-195	300	55,0	32,0	246	466	10,4	5,06

Tabelle B-1: Parameter der Schubprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.	Lamelle/ Fuge	Lamellenr. Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Abstand von Seite A	Prüfkörper- länge	Prüfkörper- höhe	Prüfkörper- breite	Masse	Rohdichte	Holzfeuchte	Schubfestigkeit
O 1	5	L	3	400-700	95-155	300	55,0	31,8	247	471	10,3	4,11
O 1	5	L	4	400-700	65-125	300	55,0	31,7	261	498	10,1	5,96
O 1	5	F	5	400-700	10-45	300	55,0	31,8	250	476	10,3	4,18
O 1	5	F	5	400-700	50-85	300	55,0	31,8	240	458	10,4	4,71
O 1	5	F	5	400-700	105-140	300	55,0	31,9	239	454	10,3	4,05
O 1	5	F	5	400-700	150-185	300	55,0	31,8	237	451	10,2	5,31
O 1	5	F	7	400-700	145-180	300	55,0	31,7	242	463	10,3	3,11
O 1	5	L	8	400-700	5-65	300	55,0	31,7	223	426	10,1	3,08
O 1	5	L	8	400-700	80-140	300	55,0	31,8	258	492	10,4	3,68
O 2	4	L	2	300-600	75-135	300	55,0	31,8	262	499	10,1	3,96
O 2	4	F	3	300-600	10-45	300	55,0	31,8	257	489	10,4	4,52
O 2	4	F	3	300-600	50-85	300	54,9	31,7	234	448	10,2	3,75
O 2	4	F	3	300-600	120-155	300	55,0	31,8	230	438	10,3	4,67
O 2	4	F	3	300-600	160-195	300	55,0	31,8	252	481	10,1	4,47
O 2	4	L	5	300-600	10-70	300	55,0	31,8	253	481	10,2	4,49
O 2	4	F	6	300-600	5-40	300	55,0	31,8	242	461	10,0	4,08
O 2	4	F	6	300-600	50-85	300	55,0	31,8	265	504	10,5	4,00
O 2	4	F	6	300-600	90-125	300	55,0	31,6	258	494	10,3	3,65
O 2	4	F	6	300-600	135-170	300	55,0	31,9	266	506	10,0	4,81
O 2	4	F	8	300-600	0-35	300	55,0	31,9	222	421	10,0	4,89
O 2	4	F	8	300-600	40-75	300	54,9	31,7	232	445	10,0	3,70
O 2	4	F	8	300-600	100-135	300	55,0	31,8	242	461	9,9	6,68
O 2	4	F	8	300-600	150-185	300	54,9	31,8	250	477	10,0	8,53
O 2	4	L	0	300-600	0-60	300	55,0	31,7	253	483	10,0	3,37
O 2	4	L	-1	200-500	0-60	300	55,0	31,8	241	460	10,0	6,27
O 2	4	F	10	200-500	0-35	300	55,0	31,7	212	405	10,0	4,30
O 2	4	F	10	200-500	40-75	300	55,0	31,8	210	403	10,2	8,69
O 2	4	F	10	200-500	80-115	300	55,0	31,6	213	410	11,3	9,10

Tabelle B-1: Parameter der Schubprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.	Lamelle/ Fuge	Lamellenr. Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Abstand von Seite A	Prüfkörper- länge	Prüfkörper- höhe	Prüfkörper- breite	Masse			Schubfestigkeit
									[g]	[kg/m ³]	[%]	
O 2	4	F	10	200-500	120-155	300	55,1	31,7	208	397	10,4	5,66
O 2	4	L	12	200-500	5-65	300	55,0	31,8	208	396	9,8	5,94
O 2	4	L	12	200-500	70-130	300	54,9	31,8	212	405	9,8	5,73
O 2	5	F	4	400-700	160-195	300	55,0	31,8	257	490	10,0	4,88
O 2	5	L	3	400-700	5-65	300	55,0	31,9	270	514	10,3	4,20
O 2	5	L	3	400-700	115-175	300	55,0	31,8	245	467	10,2	3,81
O 2	5	F	4	400-700	0-35	300	55,0	31,9	271	515	10,2	5,47
O 2	5	F	4	400-700	70-105	300	55,0	31,8	247	471	10,5	5,15
O 2	5	F	4	400-700	115-150	300	55,0	31,8	249	474	10,2	4,64
O 2	5	L	2	400-700	135-195	300	55,0	31,8	245	467	9,3	4,09
O 2	5	F	6	400-700	15-50	300	55,0	31,8	253	483	10,1	4,59
O 2	5	L	6	400-700	140-175	300	55,0	31,9	252	478	10,5	4,44
O 2	5	F	6	400-700	65-125	300	55,0	31,9	241	458	10,3	4,10
O 2	5	F	8	400-700	5-40	300	55,0	31,9	258	490	10,1	3,86
O 2	5	F	8	400-700	45-80	300	55,0	31,8	261	497	10,0	2,87
O 2	5	F	8	400-700	90-125	300	55,0	31,8	278	529	10,2	4,03
O 2	5	F	8	400-700	150-185	300	55,0	31,8	270	514	9,9	3,56
O 2	3	F	4	450-750	0-35	300	55,0	31,7	279	534	9,8	9,81
O 2	3	F	4	450-750	40-75	300	54,9	31,9	261	497	10,3	5,21
O 2	3	F	4	450-750	120-155	300	55,1	31,7	242	462	10,1	9,25
O 2	3	F	4	450-750	160-195	300	55,0	31,6	260	500	9,9	2,73
R 1	0	L	7	0-300	135-195	300	55,2	31,9	200	379	10,3	5,64
R 1	0	L	8	0-300	5-65	300	55,2	31,9	211	399	10,3	4,89
R 1	0	L	8	0-300	75-135	300	55,2	31,8	226	428	10,6	5,56
R 1	0	L	8	0-300	140-200	300	55,1	31,8	193	367	10,0	3,10
R 1	0	L	10	0-300	10-70	300	55,1	31,8	267	508	10,3	4,88
R 2	0	L	1	0-300	5-65	300	55,0	31,7	243	465	10,6	5,10
R 2	0	F	3	0-300	15-50	300	55,0	31,7	251	479	10,0	10,15

Tabelle B-1: Parameter der Schubprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.	Lamelle/ Fuge	Lamellenr. Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Seite A	Prüfkörper- länge	Prüfkörper- höhe	Prüfkörper- breite	Masse	Rohdichte	Holzfeuchte	Schubfestigkeit
[-]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[%]	[N/mm ²]
R 2	0	F	3	0-300	60-95	300	55,1	31,9	227	430	10,0	5,84
R 2	0	F	3	0-300	105-140	300	55,1	31,8	232	441	8,9	1,30
R 2	0	F	3	0-300	155-190	300	55,0	31,8	246	468	10,2	6,06
R 2	0	L	5	0-300	125-185	300	55,0	31,8	197	376	10,5	4,21
R 2	0	L	7	0-300	135-195	300	55,0	31,8	267	508	10,7	4,68
R 2	0	L	8	0-300	130-195	300	55,0	31,8	186	354	9,8	4,12
R 3	0	L	1	0-300	5-65	300	55,2	31,8	244	463	10,4	5,35
R 3	0	L	2	0-300	10-70	300	55,1	31,8	254	484	10,6	3,85
R 3	0	L	2	0-300	130-190	300	55,2	31,8	231	440	10,4	5,29
R 3	0	L	5	0-300	15-75	300	55,1	31,8	198	377	10,1	4,00
R 3	0	L	5	0-300	135-195	300	55,2	31,8	204	388	10,5	4,34
R 3	0	L	6	0-300	15-75	300	55,2	31,9	205	387	10,5	5,06
R 3	0	L	6	0-300	135-195	300	55,2	31,8	202	384	10,1	3,90
R 3	0	L	7	0-300	135-195	300	55,2	31,8	288	547	10,3	2,82
R 4	0	L	7	0-300	135-195	300	55,2	31,8	212	403	11,0	4,55
R 5	0	L	2	0-300	10-70	300	55,1	31,6	237	453	10,9	5,28
R 5	0	L	2	0-300	80-140	300	55,1	31,8	208	395	10,3	3,97
R 5	0	L	3	0-300	75-125	300	55,0	31,7	233	445	11,2	3,62
R 5	0	L	5	0-300	5-65	300	55,2	31,9	226	427	11,8	4,30
R 5	0	L	7	0-300	5-65	300	55,2	31,8	207	393	11,2	5,26
R 5	0	L	8	0-300	10-70	300	55,1	31,8	232	440	11,8	4,44
R 6	0	L	5	0-300	10-70	300	55,2	31,9	195	369	10,5	4,65
R 6	0	F	6	0-300	10-45	300	55,1	31,9	214	405	10,7	4,72
R 6	0	F	6	0-300	60-95	300	55,1	31,8	203	387	11,3	6,65
R 6	0	F	6	0-300	105-140	300	55,1	31,4	224	431	11,4	7,13
R 6	0	F	6	0-300	150-185	300	55,1	31,8	237	450	11,6	5,02
R 8	0	F	5	0-300	20-55	300	55,1	31,7	229	437	11,0	4,14
R 8	0	F	5	0-300	70-105	300	55,2	31,8	217	412	10,8	4,62

Tabelle B-1: Parameter der Schubprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.	Lamelle/ Fuge	Lamellenr. Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Abstand von Seite A	Prüfkörper- länge	Prüfkörper- höhe	Prüfkörper- breite	Masse	Rohdichte	Holzfeuchte	Schubfestigkeit
[-]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[%]	[N/mm ²]
R 8	0	F	5	0-300	115-150	300	55,1	31,8	223	425	10,9	3,38
R 8	0	F	5	0-300	160-195	300	55,2	31,8	233	442	10,2	4,43
R 9	0	L	4	0-300	80-140	300	55,2	31,9	215	406	11,4	3,92
R 9	0	L	6	0-300	20-80	300	55,1	31,8	226	430	10,1	4,64
R 9	0	L	6	0-300	85-145	300	55,2	31,7	221	420	10,3	5,20

Anlage C

Parameter der Scherprüfkörper

Tabelle C-1: Parameter der Scherprüfkörper

Träger	Abschnittsnr.	Seite	Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Prüfkörperlänge	Scherflächenbreite	Masse	Rohdichte	Vorab-Fugendelam	E-Nut	F _{max} /A _e	SHFB A/B
[-]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[mm]	[mm]	[N/mm ²]	[%]
K1	5	A	F7	370	88,2	26,5	36,7	449	9	0	8,84	15/20
K1	5	A	F9	370	85,7	26,5	32,8	449	22	0	8,11	40/30
K1	5	A	F10	430	83,3	26,4	36,4	513	15	0	8,51	50/40
K1	5	A	F11	370	73,8	26,3	29,8	433	0	0	7,62	30/20
K1	5	B	F7	370	66,1	26,4	28,7	471	1	0	7,72	50/45
K1	5	B	F9	370	68,9	26,2	25,2	461	36	0	7,51	70/80
K1	5	B	F10	430	71,3	26,3	31,7	560	0	0	7,71	10/25
K1	5	B	F11	370	70,4	26,3	28,7	488	0	0	7,55	40/15
K1	6	A	F7	80	81,0	26,4	35,5	613	8	0	6,80	30/30
K1	6	A	F9	80	85,3	26,3	32,5	485	29	0	8,24	30/40
K1	6	A	F10	140	82,3	26,4	38,4	546	17	0	10,06	35/45
K1	6	A	F11	80	78,8	26,5	31,6	465	4	0	9,01	15/20
K1	6	B	F7	80	66,0	26,5	28,7	439	0	0	6,84	30/10
K1	6	B	F9	80	68,7	26,8	25,9	473	39	0	5,70	30/5
K1	6	B	F10	140	72,3	26,8	36,3	631	0	0	7,01	20/5
K1	6	B	F11	80	77,4	26,7	32,6	539	0	4	6,60	35/10
K1	7	A	F7	50	89,2	26,6	37,5	591	8	0	7,83	85/90
K1	7	A	F9	50	86,0	26,3	33,1	446	21	0	7,89	30/40
K1	7	A	F10	110	84,6	26,3	37,4	527	11	0	11,45	15/20
K1	7	A	F11	50	77,6	26,4	31,3	448	0	0	5,71	50/55
K1	7	B	F7	50	64,6	26,7	27,8	434	9	0	5,23	20/25
K1	7	B	F9	50	89,8	26,5	34,5	641	25	4	7,88	5/5
K1	7	B	F10	110	65,3	26,7	29,0	396	9	0	5,74	45/65
K1	7	B	F11	50	83,4	26,4	37,7	694	21	4	7,60	20/20
K4	4	A	F2	200	80,9	26,5	27,5	406	0	0	8,55	30/40
K4	4	A	F2	300	81,0	26,5	35,6	531	0	0	7,18	25/70
K4	4	A	F2	400	80,7	26,5	35,6	530	0	0	5,56	20/15
K4	4	A	F2	450	79,1	26,5	27,1	405	0	0	8,33	15/15

Tabelle C-1: Parameter der Scherprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.		Seite	Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Prüfkörper- länge	Scherflächen- breite	Masse	Rohdichte	Vorab- Fugendelam	E-Nut	F _{max} /A _s	SHFB A/B
	[-]	[-]											
K4	4	A	A	F9	100	79,3	26,4	32,4	494	0	0	7,74	5/5
K4	4	A	A	F9	200	75,9	26,2	32,2	491	0	0	11,20	90/90
K4	4	A	A	F9	300	74,6	26,5	30,9	495	3	0	7,29	10/15
K4	4	A	A	F9	400	71,3	26,5	29,5	476	3	0	6,37	10/10
K4	4	A	A	F9	450	75,7	26,4	31,0	525	4	0	6,79	20/20
K4	4	B	B	F2	200	69,9	26,3	23,4	374	8	0	7,99	15/20
K4	4	B	B	F2	300	73,1	26,4	25,5	442	0	0	8,15	10/10
K4	4	B	B	F2	400	71,3	26,3	24,3	402	0	0	8,42	20/45
K4	4	B	B	F2	450	90,6	26,3	30,4	517	0	4	7,80	5/10
K4	4	B	B	F9	100	64,1	26,4	25,2	342	0	0	7,73	70/60
K4	4	B	B	F9	200	63,3	26,5	25,5	481	2	0	7,92	60/20
K4	4	B	B	F9	300	89,4	26,5	34,8	663	3	4	7,77	30/20
K4	4	B	B	F9	400	93,1	26,8	35,9	492	2	4	6,50	50/30
K4	4	B	B	F9	450	93,1	26,5	36,7	478	4	4	6,14	5/10
K4	5	A	A	F5	430	85,6	26,5	28,9	380	0	0	7,73	30/30
K4	5	B	B	F5	430	67,1	26,6	22,8	322	0	0	8,72	45/50
K4	5	B	B	F8	400	65,2	26,4	26,3	471	23	0	8,28	85/95
K4	5	B	B	F8	460	92,6	26,3	35,1	652	11	4	7,00	5/5
K4	6	A	A	F5	140	83,8	26,6	28,8	382	0	0	9,00	30/40
K4	6	A	A	F5	210	84,5	26,4	31,0	445	0	0	7,90	10/10
K4	6	B	B	F5	140	69,7	26,6	24,6	353	2	0	7,91	50/55
K4	6	B	B	F5	210	81,8	26,4	27,6	477	0	4	7,65	15/25
K4	6	B	B	F8	40	92,5	26,5	35,7	537	2	4	7,04	25/25
K4	6	B	B	F8	120	92,2	26,4	35,6	471	2	4	4,79	15/20
K4	6	B	B	F8	200	90,6	26,6	34,9	464	0	4	6,36	10/20
K5	5	A	A	F3	450	82,6	26,5	31,0	418	2	0	8,22	65/65
K5	5	A	A	F13	450	77,7	26,6	29,2	426	3	0	8,65	65/40
K5	5	B	B	F3	450	67,2	26,2	25,2	390	13	0	1,99	5/5

Tabelle C-1: Parameter der Scherprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.	Seite	Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Prüfkörperlänge	Scherflächenbreite	Masse	Rohdichte	Vorab-Fugendelam	E-Nut	F _{max} /A _s	SHFB A/B
K5	5	B	F13	450	76,1	26,3	27,3	494	0	0	5,95	20 / 15
K5	6	A	F3	50	85,4	26,5	29,8	476	4	0	7,13	20 / 15
K5	6	A	F3	150	80,9	26,3	28,6	405	2	0	6,06	30 / 30
K5	6	A	F13	50	76,4	26,5	26,5	398	0	0	6,92	25 / 15
K5	6	A	F13	150	76,4	26,5	26,0	410	0	0	7,91	70 / 75
K5	6	B	F3	50	67,5	26,4	23,0	364	5	0	6,29	40 / 20
K5	6	B	F3	150	60,7	26,6	22,1	397	0	0	6,29	10 / 10
K5	6	B	F13	50	88,8	26,4	30,8	611	0	4	6,12	35 / 25
K5	6	B	F13	150	87,5	26,4	30,1	415	8	4	6,84	10 / 20
K6	5	A	F2	450	82,5	26,5	32,2	453	0	0	7,08	5 / 10
K6	5	A	F5	450	82,9	26,4	31,0	453	3	0	7,71	40 / 50
K6	5	A	F11	450	75,6	26,8	25,8	376	12	0	6,66	50 / 40
K6	5	B	F2	450	92,7	26,4	32,9	521	0	4	4,06	15 / 20
K6	5	B	F5	450	81,1	26,4	28,5	377	11	4	5,46	15 / 15
K6	6	A	F2	120	82,4	26,5	30,2	457	0	0	7,54	5 / 10
K6	6	A	F2	200	83,7	26,3	30,4	446	0	0	7,86	10 / 20
K6	6	A	F5	120	72,4	26,5	29,1	421	0	0	7,49	0 / 5
K6	6	A	F5	200	80,8	26,6	29,0	484	0	0	6,60	0 / 5
K6	6	A	F11	120	46,9	26,5	19,0	282	0	0	8,18	50 / 50
K6	6	A	F11	200	69,5	26,7	27,8	715	20	0	7,07	60 / 50
K6	6	B	F2	120	94,8	26,4	33,6	579	4	4	3,94	15 / 20
K6	6	B	F2	200	93,4	26,2	32,8	425	5	4	6,58	30 / 30
K6	6	B	F5	120	94,7	26,4	33,6	443	18	4	6,58	70 / 45
K6	6	B	F5	200	71,4	26,4	25,1	324	16	0	6,53	90 / 80
K6	7	A	F2	200	58,8	26,4	21,9	372	0	0	7,33	15 / 10
K6	7	A	F2	300	83,2	26,5	30,7	633	45	0	8,55	0 / 5
K6	7	A	F2	400	83,1	26,5	30,5	442	50	0	10,78	0 / 10
K6	7	A	F5	200	79,2	26,7	29,5	428	4	0	6,98	30 / 25

Tabelle C-1: Parameter der Scherprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.		Seite	Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Prüfkörper- länge	Scherflächen- breite	Masse	Rohdichte	Vorab- Fugendelam	E-Nut	F _{max} /A _e	SHFB A/B
	[-]	[-]											
K6	7		A	F5	300	94,3	25,8	32,9	500	0	4	7,35	25/10
K6	7		A	F5	400	80,0	26,5	28,5	377	0	0	7,56	10/10
K6	7		A	F11	200	75,8	26,4	26,9	405	17	0	6,72	20/15
K6	7		A	F11	300	79,0	26,6	26,6	423	14	0	7,99	80/85
K6	7		A	F11	400	80,8	26,6	28,4	432	0	0	8,24	55/90
K6	7		B	F2	200	51,8	26,8	18,9	282	2	0	0,00	5/5
K6	7		B	F2	300	46,6	26,6	17,0	392	1	0	5,31	15/15
K6	7		B	F2	400	49,0	26,7	18,1	467	4	0	6,14	70/50
K6	7		B	F5	200	87,7	26,5	31,3	765	2	4	5,23	85/85
K6	7		B	F5	300	91,4	26,5	32,8	458	0	4	4,29	20/20
K6	7		B	F5	400	72,4	26,6	25,4	340	0	0	5,69	20/20
K6	7		B	F11	300	73,3	26,7	25,2	418	0	0	0,74	10/15
K7	4		A	F4	300	53,1	26,6	22,7	372	12	0	6,89	45/50
K7	4		A	F4	400	41,4	26,5	17,3	392	11	0	9,03	90/75
K7	4		A	F6	100	83,3	26,5	31,2	907	6	0	5,16	25/10
K7	4		A	F6	300	81,9	26,6	31,8	461	11	0	6,49	5/5
K7	4		A	F6	400	82,9	26,7	30,5	448	8	0	5,76	10/10
K7	4		A	F8	100	81,9	26,5	32,8	475	0	0	7,88	15/20
K7	4		A	F8	300	84,7	26,5	34,0	501	0	0	8,71	55/55
K7	4		A	F8	400	84,6	26,4	34,1	486	0	0	8,53	5/10
K7	4		A	F11	100	82,2	26,6	31,1	444	33	0	6,38	20/20
K7	4		A	F11	300	84,6	26,6	32,6	478	16	0	5,88	60/45
K7	4		A	F11	400	82,6	26,6	31,3	445	6	0	5,85	30/40
K7	4		B	F4	100	42,3	26,6	16,6	242	12	0	6,62	10/20
K7	4		B	F4	300	65,0	26,8	28,3	805	18	0	5,11	35/20
K7	4		B	F4	400	82,8	26,4	33,8	623	15	4	6,27	5/5
K7	4		B	F6	100	83,7	26,7	30,7	455	4	4	7,39	5/5
K7	4		B	F6	300	91,5	26,6	33,8	491	6	4	8,64	10/10

Tabelle C-1: Parameter der Scherprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.	Seite	Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Prüfkörperlänge	Scherflächenbreite	Masse	Rohdichte	Vorab-Fugendelam	E-Nut	F _{max} /A _s	SHFB A/B
K7	4	B	F6	400	90,2	26,6	33,3	444	2	4	7,50	5 / 5
K7	4	B	F8	100	67,7	26,7	27,4	371	18	0	8,00	20 / 20
K7	4	B	F8	300	83,4	26,5	32,3	573	16	4	7,00	20 / 25
K7	4	B	F8	400	81,0	26,6	31,6	465	19	4	6,12	15 / 20
K7	4	B	F11	100	38,5	26,4	14,9	225	0	0	9,07	20 / 35
K7	4	B	F11	300	84,4	26,5	32,4	1018	0	4	4,61	50 / 65
K7	4	B	F11	400	61,3	26,5	24,6	358	0	0	8,17	15 / 15
K7	5	A	F4	450	50,4	26,4	21,1	415	8	0	9,12	50 / 80
K7	5	A	F6	450	76,6	26,5	28,3	680	0	0	4,22	5 / 10
K7	5	A	F8	450	94,5	26,6	28,6	451	0	4	8,49	70 / 60
K7	5	A	F11	450	74,0	26,7	28,6	370	2	0	6,37	15 / 20
K7	5	B	F4	450	69,4	26,4	27,7	450	14	0	6,41	25 / 5
K7	5	B	F6	450	70,7	26,4	25,9	451	0	0	7,33	10 / 10
K7	5	B	F8	450	65,4	26,6	24,4	417	3	0	7,14	100 / 100
K7	5	B	F11	450	96,3	26,4	36,9	679	15	4	7,22	90 / 70
K7	6	A	F4	50	83,2	26,5	35,2	448	9	0	7,38	90 / 85
K7	6	A	F4	150	85,2	26,4	35,7	516	10	0	6,45	20 / 30
K7	6	A	F6	50	81,7	26,5	30,1	427	0	0	4,52	50 / 40
K7	6	A	F6	150	78,6	26,6	30,3	447	27	0	3,95	60 / 25
K7	6	A	F8	50	85,4	26,4	33,0	505	0	4	8,90	70 / 60
K7	6	A	F8	150	85,1	26,4	32,8	472	0	0	10,55	80 / 80
K7	6	A	F11	50	76,9	26,4	29,1	414	3	0	7,39	10 / 20
K7	6	A	F11	150	77,2	26,2	28,7	451	0	0	7,22	85 / 55
K7	6	B	F4	50	69,5	26,2	28,3	446	19	0	6,33	0 / 5
K7	6	B	F4	150	70,1	26,4	27,5	482	12	0	6,84	15 / 20
K7	6	B	F6	50	72,2	26,6	26,6	460	3	0	5,80	5 / 5
K7	6	B	F6	150	75,1	26,9	29,1	485	0	0	5,05	20 / 15
K7	6	B	F8	50	95,2	26,4	35,4	561	3	4	7,49	45 / 60

Tabelle C-1: Parameter der Scherprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.	Seite	Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Prüfkörper- länge	Scherflächen- breite	Masse	Rohdichte	Vorab- Fugendelam	E-Nut	F _{max} /A _e	SHFB A/B
K7	6	B	F8	150	91,2	26,6	34,2	440	3	4	6,66	10/15
K7	6	B	F11	50	67,7	26,4	26,9	359	1	0	9,43	5/10
K7	6	B	F11	150	92,9	26,5	35,5	634	0	4	7,80	10/10
K8	5	A	F3	450	80,5	26,6	28,4	375	12	0	4,81	40/65
K8	5	A	F13	450	79,6	26,4	36,5	545	20	0	6,32	40/55
K8	5	B	F3	450	62,5	26,6	26,5	403	4	0	7,42	50/50
K8	5	B	F13	420	89,1	26,2	31,0	597	5	4	8,32	5/5
K8	6	A	F3	50	81,5	26,4	30,9	428	0	0	9,95	40/50
K8	6	A	F3	150	56,2	26,4	25,8	383	0	0	10,08	60/65
K8	6	A	F13	50	93,7	26,5	32,6	702	20	4	9,93	20/20
K8	6	A	F13	150	68,3	26,5	25,4	331	17	0	7,51	90/80
K8	6	B	F3	50	67,6	26,4	23,9	423	3	0	7,37	70/65
K8	6	B	F3	150	60,8	26,7	21,5	385	1	0	8,18	25/15
K8	6	B	F13	50	74,9	26,6	27,2	536	0	0	9,53	50/55
K8	6	B	F13	150	73,6	26,6	28,6	460	2	0	8,85	10/10
O1	5	A	F2	180	90,3	25,9	35,8	585	0	0	10,60	100/85
O1	5	A	F2	240	85,7	26,1	34,0	461	0	0	9,00	100/90
O1	5	A	F2	300	82,8	26,2	32,8	467	8	0	9,99	100/75
O1	5	A	F2	360	84,0	26,0	34,3	504	0	0	10,20	100/95
O1	5	A	F4	180	84,2	25,7	32,9	479	32	0	8,32	100/55
O1	5	A	F4	240	82,3	25,8	32,3	473	16	0	8,84	40/50
O1	5	A	F4	300	86,7	25,9	34,0	508	0	0	9,77	100/50
O1	5	A	F4	360	83,2	26,1	34,9	494	0	0	9,86	100/50
O1	5	A	F6	180	82,9	25,8	31,4	460	0	0	9,57	100/100
O1	5	A	F6	240	84,7	25,9	32,1	476	0	0	9,58	100/100
O1	5	A	F6	300	83,6	26,0	32,9	477	0	0	7,61	90/100
O1	5	A	F6	360	72,0	26,0	26,8	393	0	0	7,34	100/100
O1	5	B	F2	180	86,6	25,9	33,8	575	0	0	10,59	100/80

Tabelle C-1: Parameter der Scherprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.		Seite	Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Prüfkörperlänge	Scherflächenbreite	Masse	Rohdichte	Vorab-Fugendelam	E-Nut	F _{max} /A _e	SHFB A/B
	[-]	[-]											
O1	5	B	F2	240	84,3	24,1	34,9	495	0	0	0	10,43	100/65
O1	5	B	F2	300	90,1	25,9	35,3	543	0	0	0	9,85	100/95
O1	5	B	F2	360	90,4	25,8	34,7	473	0	0	0	9,00	100/100
O1	5	B	F4	180	89,4	26,1	34,4	468	70	0	0	5,41	100/20
O1	5	B	F4	240	82,9	25,9	31,7	432	0	0	0	7,34	100/85
O1	5	B	F4	300	88,1	26,1	33,6	497	0	0	0	7,29	100/100
O1	5	B	F4	360	74,0	26,0	31,9	442	4	0	0	10,89	100/100
O1	5	B	F6	180	82,6	26,2	31,8	525	19	0	0	8,23	100/70
O1	5	B	F6	240	63,4	26,0	24,3	357	19	0	0	8,42	100/95
O1	5	B	F6	300	83,1	25,9	31,7	612	6	0	0	9,31	100/30
O1	5	B	F6	360	73,1	26,0	28,4	419	2	0	0	11,30	100/95
O1	6	A	F2	260	82,9	25,8	33,7	564	0	0	0	8,68	100/90
O1	6	A	F2	320	82,6	25,8	33,3	495	0	0	0	8,73	90/95
O1	6	A	F2	380	82,2	26,0	34,3	511	0	0	0	7,82	90/95
O1	6	A	F2	440	81,8	26,0	32,8	487	14	0	0	10,01	100/90
O1	6	A	F5	260	90,3	25,9	35,2	526	0	0	0	9,85	40/40
O1	6	A	F5	380	87,0	26,0	34,5	468	16	0	0	9,69	100/75
O1	6	A	F5	440	91,8	25,9	36,5	513	0	0	0	7,50	85/85
O1	6	A	F8	260	68,0	25,6	25,2	336	6	0	0	4,83	100/95
O1	6	A	F8	320	87,2	25,6	33,1	602	0	0	0	8,42	90/95
O1	6	A	F8	380	73,8	25,7	27,4	388	5	0	0	3,66	100/95
O1	6	A	F8	440	59,8	25,8	21,7	363	2	0	0	4,91	80/100
O1	6	B	F2	260	84,8	25,9	33,1	682	0	0	0	11,34	100/95
O1	6	B	F2	320	84,2	25,9	33,3	482	0	0	0	8,48	100/90
O1	6	B	F2	380	82,2	26,2	35,6	519	0	0	0	7,96	60/70
O1	6	B	F2	440	82,1	26,0	32,6	483	0	0	0	9,28	100/80
O1	6	B	F5	260	84,7	25,7	32,0	477	7	0	0	9,65	100/75
O1	6	B	F5	380	82,8	25,9	31,3	455	0	0	0	10,38	100/85

Tabelle C-1: Parameter der Scherprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.		Seite	Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Prüfkörper- länge	Scherflächen- breite	Masse	Rohdichte	Vorab- Fugendelam	E-Nut	F _{max} /A _s	SHFB A/B
	[-]	[-]											
O1	6	B	B	F5	440	85,2	26,2	32,0	474	0	0	7,94	100/80
O1	6	B	B	F8	260	79,1	25,9	30,6	437	0	0	10,83	100/95
O1	6	B	B	F8	320	75,4	26,0	29,3	455	17	0	9,84	100/100
O1	6	B	B	F8	380	68,9	25,9	26,6	432	0	0	9,73	100/85
O1	6	B	B	F8	440	77,2	25,9	29,5	526	20	0	11,24	100/100
O2	5	A	A	F3	160	77,9	26,0	32,6	518	3	0	6,64	70/90
O2	5	A	A	F3	220	82,5	25,9	31,9	502	3	0	8,52	100/90
O2	5	A	A	F3	290	82,6	25,9	33,9	503	3	0	8,46	100/95
O2	5	A	A	F3	360	82,6	25,6	32,1	476	0	0	9,91	100/100
O2	5	A	A	F6	160	88,1	26,1	36,9	553	0	0	11,87	100/85
O2	5	A	A	F6	240	81,0	25,8	33,0	458	0	0	9,82	100/90
O2	5	A	A	F6	300	82,7	26,2	33,9	515	3	0	9,28	100/75
O2	5	A	A	F6	360	79,7	25,8	31,8	469	3	0	10,26	100/65
O2	5	A	A	F8	160	83,2	26,0	31,0	478	0	0	7,97	100/60
O2	5	A	A	F8	220	60,3	25,8	21,5	316	2	0	6,88	100/95
O2	5	A	A	F8	290	68,2	26,0	24,6	501	0	0	9,40	100/95
O2	5	A	A	F8	360	85,3	26,0	37,5	673	9	0	10,86	100/100
O2	5	B	B	F3	160	80,0	26,0	31,7	454	0	0	10,58	100/75
O2	5	B	B	F3	220	75,8	26,1	29,0	443	0	0	10,16	100/75
O2	5	B	B	F3	290	76,9	26,0	33,3	534	9	0	10,30	80/90
O2	5	B	B	F3	360	74,7	25,9	28,5	453	0	0	10,46	100/70
O2	5	B	B	F6	160	76,9	26,0	29,6	485	0	0	10,42	100/95
O2	5	B	B	F6	240	77,3	26,1	29,0	460	0	0	10,71	100/100
O2	5	B	B	F6	300	80,0	26,2	30,0	474	0	0	9,65	100/100
O2	5	B	B	F6	360	81,2	26,0	31,6	481	0	0	11,53	100/95
O2	5	B	B	F8	160	83,7	26,1	32,7	493	0	0	7,94	100/75
O2	5	B	B	F8	220	83,8	26,0	32,9	480	2	0	8,40	100/95
O2	5	B	B	F8	290	82,8	26,1	31,9	466	0	0	7,80	100/100

Tabelle C-1: Parameter der Scherprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.	Seite	Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Prüfkörperlänge	Scherflächenbreite	Masse	Rohdichte	Vorab-Fugendelam	E-Nut	F _{max} /A _e	SHFB A/B
O2	5	B	F8	360	82,7	26,0	32,8	482	0	0	7,19	100/100
O2	6	A	F4	320	82,5	25,9	33,2	491	3	0	7,86	100/95
O2	6	A	F4	380	83,9	26,0	32,8	488	0	0	9,16	100/100
O2	6	A	F4	450	83,6	25,7	32,5	474	0	0	8,50	100/100
O2	6	A	F4	500	77,9	25,9	30,9	457	0	0	6,67	100/100
O2	6	A	F6	300	80,3	25,9	33,8	532	0	0	10,77	100/85
O2	6	A	F6	360	84,7	25,8	34,5	527	0	0	9,98	100/95
O2	6	A	F6	420	85,8	26,0	34,2	496	0	0	10,15	100/95
O2	6	A	F6	480	86,6	25,8	35,0	499	0	0	10,70	100/85
O2	6	A	F8	300	85,1	25,8	35,0	496	0	0	9,53	100/95
O2	6	A	F8	360	84,6	26,0	34,5	499	0	0	10,52	90/95
O2	6	A	F8	420	85,4	25,7	35,2	510	0	0	11,28	100/95
O2	6	A	F8	480	85,6	25,7	36,6	528	0	0	8,52	100/90
O2	6	B	F4	320	87,1	25,8	33,5	484	12	0	6,51	100/90
O2	6	B	F4	380	88,8	26,2	33,5	472	8	0	6,73	100/75
O2	6	B	F4	450	86,3	26,0	33,0	451	4	0	7,93	100/90
O2	6	B	F4	500	61,8	26,0	24,6	349	0	0	7,03	100/95
O2	6	B	F6	300	75,1	26,0	29,4	582	0	0	9,46	100/85
O2	6	B	F6	360	78,0	25,2	29,2	476	0	0	10,39	100/65
O2	6	B	F6	420	81,7	26,1	30,6	491	0	0	10,52	100/95
O2	6	B	F6	480	55,3	26,0	20,5	305	0	0	11,44	100/100
O2	6	B	F8	300	86,0	25,8	33,1	733	0	0	8,72	100/95
O2	6	B	F8	360	69,6	25,8	26,8	384	0	0	9,56	100/100
O2	6	B	F8	420	64,0	26,0	24,9	440	0	0	8,81	100/100
O2	6	B	F8	480	57,6	25,6	25,1	479	0	0	6,87	100/90
O2	7	A	F4	60	84,8	26,0	36,5	784	3	0	8,94	100/90
O2	7	A	F6	40	61,7	26,0	24,7	357	0	0	9,72	100/100
O2	7	B	F4	60	89,2	25,8	34,8	689	0	0	10,15	100/85

Tabelle C-1: Parameter der Scherprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.	Seite	Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Prüfkörperlänge	Scherflächenbreite	Masse	Rohdichte	Vorab-Fugendelam	E-Nut	F _{max} /A _s	SHFB A/B
O2	7	B	F6	40	54,8	25,8	20,1	277	2	0	11,25	100/100
R1	1	A	F5	50	78,4	26,0	23,1	520	0	0	8,37	60/75
R1	1	A	F5	150	82,8	25,9	26,2	408	0	0	9,27	100/100
R1	1	A	F5	250	66,6	25,8	21,6	320	0	0	9,14	100/100
R1	1	A	F5	350	75,9	25,9	29,8	550	0	0	8,12	50/50
R1	1	A	F5	450	63,6	26,0	19,9	322	0	0	9,16	80/80
R1	1	B	F5	50	84,2	25,5	24,1	462	0	0	8,02	80/90
R1	1	B	F5	150	64,1	25,7	18,9	278	0	0	8,82	90/95
R1	1	B	F5	250	79,9	25,8	22,9	439	0	0	8,05	100/85
R1	1	B	F5	350	81,2	25,9	29,2	450	0	0	8,39	70/70
R1	1	B	F5	450	72,7	25,7	22,2	335	0	0	7,89	100/60
R2	1	A	F3	100	70,9	26,2	36,4	617	10	0	6,18	100/95
R2	1	A	F3	150	70,0	26,0	27,0	463	0	0	8,80	100/95
R2	1	B	F3	50	77,4	26,0	40,4	706	0	0	8,18	100/85
R2	1	B	F3	100	79,5	26,2	30,6	484	0	0	11,34	100/100
R2	1	B	F3	150	77,0	26,5	30,7	469	0	0	9,18	60/80
R2	1	B	F3	250	81,8	26,2	31,5	494	0	0	9,89	60/65
R2	1	B	F3	350	81,3	26,3	32,6	484	0	0	11,26	100/100
R2	1	B	F3	450	82,1	26,2	33,3	496	0	0	8,25	40/60
R3	0	A	F9	40	73,1	26,1	30,6	454	0	0	7,13	100/100
R3	0	A	F9	100	75,3	26,2	31,5	526	0	0	7,39	100/90
R3	0	A	F9	160	70,6	26,2	29,7	480	0	0	8,19	100/100
R3	0	A	F9	220	72,8	26,2	30,7	529	0	0	8,17	100/90
R3	0	A	F9	280	69,7	26,2	29,9	498	0	0	6,74	100/100
R3	1	A	F9	50	31,9	27,0	14,0	244	0	0	9,50	100/85
R3	1	A	F9	50	42,4	26,4	17,5	652	0	0	6,01	50/45
R3	1	A	F9	150	81,8	26,4	34,7	989	0	0	6,74	100/100
R3	1	A	F9	250	84,2	26,4	38,7	572	0	0	8,79	100/100

Tabelle C-1: Parameter der Scherprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.	Seite	Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Prüfkörperlänge	Scherflächenbreite	Masse	Rohdichte	Vorab-Fugendelam	E-Nut	F_{mx}/A_s	SHFB A/B
[-]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[mm]	[mm]	[N/mm ²]	[%]
R3	1	B	F9	50	83,1	25,6	33,3	478	0	0	8,43	100/50
R3	1	B	F9	150	83,0	26,4	34,4	513	0	0	9,80	100/70
R3	1	B	F9	250	79,5	26,1	33,1	482	0	0	8,75	100/80
R4	1	A	F5	50	68,9	26,4	23,1	355	0	0	8,99	100/75
R4	1	A	F5	150	82,4	26,1	27,2	478	0	0	8,95	100/70
R4	1	A	F5	250	72,7	26,2	26,2	388	0	0	8,21	100/65
R4	1	A	F5	350	79,9	26,4	27,0	451	0	0	7,37	80/45
R4	0	B	F5	40	61,0	25,9	19,5	295	5	0	9,36	100/85
R4	0	B	F5	95	59,8	26,1	19,3	388	0	0	8,93	100/50
R4	0	B	F5	150	62,9	26,1	20,1	410	0	0	8,80	100/75
R4	0	B	F5	205	60,3	26,2	19,6	380	0	0	8,85	100/65
R4	0	B	F5	275	65,5	26,1	21,2	429	0	0	8,26	30/55
R5	1	A	F4	100	81,2	26,2	27,2	507	0	0	7,93	100/100
R5	1	A	F4	150	80,4	26,3	27,0	405	0	0	10,25	100/95
R5	1	A	F4	250	75,8	25,8	24,7	374	0	0	8,51	100/90
R5	1	A	F4	350	76,2	26,3	27,0	439	0	0	9,66	100/100
R5	1	A	F4	500	70,8	26,2	25,0	398	0	0	10,40	100/100
R5	1	B	F4	100	82,3	26,1	28,1	482	0	0	7,74	100/100
R5	1	B	F4	150	62,7	25,9	21,3	315	0	0	8,85	100/100
R5	1	B	F4	250	77,4	26,4	25,9	507	0	0	9,71	100/100
R5	1	B	F4	350	80,2	26,1	27,1	423	0	0	8,91	100/100
R5	1	B	F4	500	65,7	26,1	22,4	341	0	0	9,08	90/85
R6	1	A	F6	50	58,8	26,1	20,0	370	0	0	9,35	100/70
R6	1	A	F6	150	77,4	26,2	26,6	553	0	0	9,72	70/80
R6	1	A	F6	250	80,0	26,1	26,9	424	0	0	8,98	40/35
R6	1	A	F6	350	82,2	26,1	27,8	423	0	0	7,17	30/15
R6	1	A	F6	450	79,5	25,9	26,4	392	0	0	9,72	20/10
R6	1	B	F6	50	76,0	26,2	30,6	472	0	0	7,68	100/95

Tabelle C-1: Parameter der Scherprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.	Seite	Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Prüfkörperlänge	Scherflächenbreite	Masse	Rohdichte	Vorab-Fugendelam	E-Nut	F _{max} /A _s	SHFB A/B
R6	1	B	F6	150	80,7	26,3	35,0	559	0	0	9,99	100 / 70
R6	1	B	F6	250	73,9	26,2	26,3	396	0	0	9,70	100 / 45
R6	1	B	F6	350	77,3	26,3	27,2	448	0	0	9,27	100 / 95
R6	1	B	F6	450	80,5	26,2	27,8	436	0	0	8,93	80 / 45
R7	0	B	F8	50	78,9	26,2	27,0	407	0	0	8,87	100 / 75
R7	0	B	F8	110	81,3	26,1	27,5	425	0	0	9,73	100 / 85
R7	0	B	F8	170	78,1	26,0	25,6	383	0	0	9,08	90 / 70
R7	0	B	F8	220	91,1	26,1	29,6	464	0	0	6,77	100 / 95
R7	0	B	F8	270	86,5	25,3	28,1	377	0	0	7,47	100 / 90
R7	1	B	F4	50	78,1	26,1	24,6	355	0	0	7,96	80 / 75
R7	1	B	F4	150	84,1	26,1	28,0	438	0	0	7,63	100 / 95
R7	1	B	F4	250	84,3	25,7	26,5	384	0	0	8,15	80 / 70
R7	1	B	F4	350	80,4	26,0	25,9	378	0	0	7,37	90 / 60
R7	1	B	F4	450	82,9	26,3	28,3	431	0	0	8,72	60 / 60
R8	1	A	F2	150	72,6	26,3	26,0	381	0	0	8,61	70 / 60
R8	1	A	F2	250	66,7	26,3	25,1	420	0	0	9,30	100 / 55
R8	1	A	F2	350	83,6	26,3	30,3	551	0	0	8,84	80 / 100
R8	1	B	F2	150	82,6	25,9	30,7	447	0	0	9,37	100 / 100
R8	1	B	F2	250	79,2	25,9	27,9	415	0	0	9,60	100 / 100
R8	1	B	F2	350	80,7	26,0	28,4	441	0	0	9,21	70 / 80
R9	0	B	F8	40	74,8	26,0	27,4	415	0	0	7,64	60 / 75
R9	0	B	F8	100	72,6	26,0	26,0	424	0	0	7,19	100 / 70
R9	0	B	F8	160	74,7	26,1	27,3	460	0	0	8,05	90 / 90
R9	0	B	F8	220	74,0	26,0	27,4	447	0	0	7,60	70 / 80
R9	0	B	F8	280	67,5	26,0	24,8	410	0	0	9,42	100 / 45
R9	1	A	F8	50	36,9	26,1	13,3	242	0	0	10,44	100 / 100
R9	1	A	F8	50	39,7	26,2	14,3	472	0	0	6,26	100 / 100
R9	1	A	F8	150	83,7	26,4	30,8	943	0	0	7,03	100 / 80

Tabelle C-1: Parameter der Scherprüfkörper (Fortsetzung)

Träger	Abschnittsnr.	Seite	Fugennr.	Längslage im Abschnitt	Prüfkörperlänge	Scherflächenbreite	Masse	Rohdichte	Vorab-Fugendelam	E-Nut	F_{max}/A_s	SHFB A/B
[-]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[mm]	[mm]	[N/mm ²]	[%]
R9	1	A	F8	250	84,2	26,2	30,5	440	0	0	8,97	90 / 100
R9	1	A	F8	350	74,1	25,9	27,2	393	0	0	8,74	100 / 85
R9	1	A	F8	450	83,4	26,2	30,7	509	0	0	6,36	70 / 75
R9	1	B	F8	50	83,4	26,1	30,6	447	0	0	8,07	100 / 75
R9	1	B	F8	150	83,3	26,4	31,8	465	0	0	7,63	70 / 100
R9	1	B	F8	250	85,1	26,3	31,3	454	0	0	6,24	90 / 90
R9	1	B	F8	350	84,2	26,2	31,6	450	0	0	6,00	90 / 50
R9	1	B	F8	450	81,6	26,2	30,3	438	0	0	8,05	100 / 100

Anlage D

Entwurf einer Leitlinie zur Beurteilung von Brettschichtholzkonstruktionen im Bestand mittels Bohrkern-Scherprüfung

<p>Leitlinie zur Beurteilung von Brettschicht- holzkonstruktionen im Bestand mittels Bohrkern-Scherprüfung [Monat] [Jahr]</p>	

Stand [Monat] [Jahr]

Leitfaden zur Beurteilung von
Brettschichtholzkonstruktionen im Bestand
mittels Bohrkern-Scherprüfung

Seite 2/4

Herausgeber:XXX
XXX
XXX**Bearbeiter:**XXX
XXX
XXX
XXX
XXX

Dieser Leitfaden bietet eine Übersicht über relevante Punkte einer Bohrkernuntersuchung an Bauteilen in Brettschichtholztragwerken. Er dient als Unterstützung bei der Beurteilung der Tragfähigkeit von derartigen Konstruktionen, und richtet sich informativ an alle bei der Begutachtung beteiligten Personen.

Im Zuge der wiederkehrenden Bauwerksuntersuchung von Brettschichtholzkonstruktionen besteht die Möglichkeit, durch die Prüfung von lokal entnommenen Bohrkernproben Rückschlüsse auf die vorhandene Qualität der Lamellenverklebung zu ziehen. Mittels einer Scherprüfung an Bohrkern-Prüfkörpern können quantitative Scherfestigkeitswerte des Materials gewonnen werden. Folglich kann der Zustand der Verklebung der einzelnen Lamellenlagen abgeschätzt werden.

Das Prüfverfahren ist der in EN 14080, Anhang D beschriebenen Vorgehensweise für die Qualitätskontrolle von Brettschichtholz angelehnt.

Es wird darauf hingewiesen, dass durch die lokal beschränkte Beprobung im Zuge einer Bohrkernuntersuchung u.U. nicht alle kritischen Stellen erfasst werden, und daher der Angabe der Qualität der Verklebung ein stichpunktartiger Charakter zugrunde liegt. Die Ergebnisse dürfen daher nur im Zusammenhang mit Ergebnissen weiterer Daten (z.B. Tragwerkshistorie, klimatische Bedingungen, etc.) und Untersuchungsmethoden (Materialfeuchtebestimmung, Bohrwiderstandsmessungen, etc.) interpretiert werden.

Eine Bauwerksprüfung wird durch die Verantwortlichen in den kommunalen Bauämtern oder Bauaufsichtsbehörden wie auch durch die Eigentümer bzw. Verantwortlichen veranlasst. Grundlagen hierfür finden sich z.B. in den von der Bauministerkonferenz (ARGEBAU) veröffentlichten Dokumenten „Hinweise für die Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen durch den Eigentümer/Verfügungsberechtigten (2006)“ bzw. „Hinweise zur Einschätzung von Art und Umfang zu untersuchender, harnstoffharzverklebter Holzbauteile auf mögliche Schäden aus Feuchte- oder Temperatureinwirkungen durch den Eigentümer / Verfügungsberechtigten (2013)“.

Im Zuge der Erstbesichtigung des Bauwerks trifft der Sachverständige / die fachkundige bzw. besonders fachkundige Person - in Abhängigkeit des vorgefundenen Zustands der Bauteile - eine Entscheidung über die Notwendigkeit einer Untersuchung der Qualität der Lamellenverklebung, und ggf. zur Durchführung einer Bohrkernuntersuchung. Die Probenentnahme kann entweder durch einen Sachverständigen, durch eine fachkundige Firma, oder durch Prüfmänner erfolgen, welche auch die mechanische Prüfung des Probenmaterials übernehmen und die Prüfergebnisse in Anlehnung an EN 14080 auswerten. Die Interpretation der Ergebnisse und die Erörterung von Auswirkungen von u.U. zu reduzierenden Festigkeiten auf die Gesamtkonstruktion geschieht - unter Einbezug von Ergebnissen weiterer Untersuchungen - durch einen Sachverständigen.

1. Auswahl der Bohrkernentnahmestellen am Tragwerk

Die Entnahme der Bohrkernproben geschieht unter Einbezug einer Klebefuge der Lamellenverklebung.

Die Anzahl der zu begutachtenden Bauteile ist individuell abhängig vom deren Zustand festzulegen.

Die Entnahme kann in mehreren Stufen erfolgen:

1. Entnahme an visuell auffälligen Stellen + Referenzstelle, Probenanzahl: ca. 12
2. Erhöhung des Probenumfangs bei hoher Varianz in den Prüfergebnissen der ersten Entnahme bzw. bei nicht eindeutiger Lage der Prüfergebnisse bezüglich den Mindestanforderungen gemäß DIN EN 14080 (siehe Schritt 3)

Entscheidungskriterien:

- Verteilung der Entnahmestellen verteilt über die Bauteilhöhe unter Beachtung der statischen Kräfte im Bauteil (keine Schwächung der Biegezugzone, keine Entnahme im Bereich $h/6$ ab Trägerunterkante bzw. in den untersten drei Lamellen)
- Entnahme von 3 Bohrkernen je Entnahmestelle (Vermeidung von Fehlinterpretation aus Einzelwerten) bei erhöhtem Probenumfang
- Entnahme an visuell auffälligen Stellen, z.B. erheblichen Delaminierungen, Wasserflecken, o.ä., und an einer visuell unauffälligen Referenzstelle.
- Zufällige Auswahl der Entnahmestellen in Trägerlängsrichtung
- Zufällige Auswahl der Trägerseiten bzgl. der Entnahmestellen

2. Praktische Vorgehensweise bei der Bohrkernentnahme

Eine minimal-invasive Probenentnahme wird angestrebt, d.h. durch die Beprobung der Bauteile darf deren statische Integrität nicht gefährdet werden. Ein Bohrkern-Durchmesser mit einem Innendurchmesser von 35 mm und einen Außendurchmesser von 50 mm hat sich in der Entnahme- und Prüfpraxis bewährt.

Vorgehensweise:

- Herstellung der freien Zugänglichkeit der Entnahmestelle, u.U. Entfernung von Bekleidungen
- Verwendung von geeignetem Entnahmewerkzeug: Bohrgerät in einem am Bauteil fixierten Bohrstand, alternativ handgeführtes Bohrgerät mit Bohrschablone; ausreichend scharfer Scheibenschneider/ Zapfenbohrer.
- Verlauf der Bohrkernachse rechtwinklig zur Bauteiloberfläche
- Verlauf der zu prüfenden Klebefuge durch die Bohrkernachse.
- Ausbrechen des Bohrkerns am Bohrgrund mittels Rohr / Stange
- Systematische Beschriftung der Bohrkernproben mit Bezug zu deren Lage im Tragwerk
- Aufbewahrung der Bohrkernproben im Probebeutel zur Vermeidung hoher Materialfeuchteschwankungen bis zur Normklimalagerung
- Fotodokumentation der Entnahmestellen
- Verschließen der Bohrbohrlöcher nach der Bohrkernentnahme mittels eingeklebtem Holzrundstab/Holzstöpsel gleicher Holzart und ggf. erforderlicher Imprägnierung

3. Scherprüfung der Bohrkernproben

Die Scherprüfung geschieht in Anlehnung an das in EN 14080, Anhang D beschriebene Verfahren.

Vorgehensweise:

- Fotografische Dokumentation des Einlieferungszustandes der Proben
- Lagerung der Proben im Normklima (20°C / 65% rel. Luftfeuchte) bis zur Scherprüfung
- Geometrisches Aufnehmen der Bohrkernproben und anschließendes Abkappen von vorab delaminierten Randbereichen und unebenen Stirnflächen
- Zuschnitt der Proben mit geeignetem Werkzeug / Schneidelehre zur Herstellung von Prüfkörpern mit parallelen Lasteinleitungsflächen
- Systematische Kennzeichnung der Prüfkörper
- Geometrisches Aufnehmen der Prüfkörper
- Scherprüfung der Prüfkörper mittels geeigneter Schervorrichtung
- Berechnung der Scherfestigkeit f_v aus den einzelnen Prüfergebnissen.

4. Aufnahme des Holzfaserbruchanteils

Nach erfolgter Scherprüfung wird, getrennt für jeden Prüfkörper, durch die Betrachtung beider nun offenliegenden Scherflächen abgeschätzt, zu welchen Anteilen sich der Scherbruch innerhalb der Klebefuge, bzw. des angrenzenden Holzes, ereignet hat.

Empfehlungen:

- Visuelle Abschätzung der Flächenanteile in 10 %-Schritten durch mindestens zwei erfahrene Prüfer
- Einfärben der Bruchflächen bei farblich schwer zu unterscheidenden Flächenanteilen Holzfaserbruch/Klebstoffbruch bzw. farblosem Klebstoff (z.B. UF, MUF, PUR) mittels geeignetem Ligninindikator

5. Qualitative Beurteilung der Lamellenverklebung

Die qualitative Beurteilung der Lamellenverklebung geschieht auf Basis der quantitativen Prüfergebnisse. Die Auswertung der Prüfergebnisse geschieht dabei gemäß EN 14080, Kapitel 5.5.5.2.3.

Die Qualität der Lamellenverklebung kann demnach als ausreichend angenommen werden, wenn der im Schritt 4 bestimmte Holzfaserbruchanteil eines Prüfkörpers den auf Basis der Prüfkörperscherfestigkeit ermittelten Mindest-Holzfaserbruchanteil nicht unterschreitet. Bei der Einzelwertbetrachtung gelten Werte unter 4 N/mm², bei der Mittelwertbetrachtung Werte unter 6 N/mm², als nicht zulässig, und indizieren demnach eine unzureichende Qualität der Verklebung.

Hinweise:

- Darstellung/Gegenüberstellung der Prüfergebnisse Scherfestigkeit und Holzfaserbruchanteil in einem Diagramm empfohlen
- Identifikation singulärer, eindeutiger Ausreißer unter den Prüfwerten → ggf. Vernachlässigung bei der Einzelwertbetrachtung
- Fokussierung auf die Mittelwertbetrachtung; alternativ Median-Betrachtung
- Kritische Hinterfragung der Qualität der Verklebung bei merklich hohem Klebstoffbruch-Flächenanteil
- Kritische Hinterfragung der Beurteilung bei geringer Probenanzahl aus unterschiedlichen Tragwerksteilen (Lage, Geometrie, Zustand, statische und klimatische Belastung, etc.)

6. Abschätzung der Bauteil-Schubfestigkeit

Die ermittelten Werte der Scherfestigkeit aus den Bohrkern-Scherprüfungen unter Ziffer 3, bzw. aus den Prüfergebnissen errechnete 5%-Quantilwerte, sind nicht als absolute Schubfestigkeitswerte der untersuchten Bauteile zu sehen, und dürfen nicht als Grundlage für eine statische Berechnung verwendet werden. Bei ausreichender Qualität der Lamellenverklebung gemäß Ziffer 5 dürfen die in den Tragwerksnormen festgelegten Festigkeitswerte angesetzt werden.

Alternativ kann der Rechenwert der bestehenden Schubfestigkeit eines beprobten Brettschichtholzbauteils über die Korrelation zu den Bohrkernfestigkeiten abgeschätzt werden. Ein lokaler Bezug von Bohrkern-Entnahmestellen und Bauteil, bzw. eine in dem Sinne direkte Vergleichbarkeit des zu bewertenden Materials, ist hierbei obligatorisch.

Vorgehensweise:

- Berechnung des charakteristischen Wertes der Schubfestigkeit: $f_{v,k,BSH} = (f_{v,m,Bohrkerne} - 4N/mm^2) - k_s \cdot StabW$
- Beachtung von Materialfeuchtigkeit mit erheblicher Abweichung zur Holz-Ausgleichsfeuchte unter Normklimabedingungen