

FESTLEGUNG DER SCHUBSTEI- FIGKEIT UND SCHUBFESTIG- KEIT VON TRÄGERN, INSB. AUS LAUBHOLZ-BSH

**Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz
Projekt 2019.10**

Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Wald
und
Konferenz für Wald, Wildtiere und Landschaft KWL

Schlussbericht

Autoren

Ernst Gehri
Prof. em. ETH Zürich, 8803 Rüschlikon

Pedro Palma & René Steiger
Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen, 8600 Dübendorf

Thomas Strahm
neue Holzbau AG, 6078 Lungern

Inhalt

	Seite
Zusammenfassung	5
Teil 1: Einleitung	7
Teil 2: Vorversuche an Buchen-BSH (3-Punkt-Biegung)	21
Teil 3: 3-Punkt-Biegeversuche an Fichten-BSH	43
Teil 4: 3-Punkt-Biegeversuche an Eschen-BSH	61
Anhang A zum Teil 4: Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeit der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze	83
Teil 5: 4-Punkt-Biegeversuche an Eschen-BSH	91
Anhang A zum Teil 5: Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeit der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze	117
Anhang B zum Teil 5: Kräftegleichgewicht im Versuchsaufbau für die 4-Punkt-Biegeversuche	129
Teil 6: Folgerungen aus den Versuchen	137

Zusammenfassung

In der Baupraxis wird Holz sehr häufig in Form von Biegeträgern aus Vollholz oder Brett-schichtholz (BSH) in Holztragwerken eingesetzt. Der Ingenieur hat in seiner statischen Berechnung nachzuweisen, dass ein Biegeträger die Anforderungen der Baunormen betreffend Trag-sicherheit und Gebrauchstauglichkeit erfüllt. Dies umfasst u. a. den Nachweis einer ausreichenden Biege- und Schubfestigkeit und eine Berechnung der zu erwartenden Durchbiegung sowie einen Vergleich dieses Werts mit vorgegebenen Grenzwerten. Zentrale mechanische Eigen-schaften in den erwähnten Nachweisen sind neben der Biegefestigkeit f_m und dem Biege-Elastizitätsmodul E_m , die Schubfestigkeit f_v und der Schubmodul G . Diese Werte müssen für die in der Baupraxis eingesetzten Holzprodukte nach den Vorgaben von Prüfnormen ermittelt werden. Während die experimentelle Bestimmung von Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul auf verhältnismässig einfache Weise mit einer 4-Punkt-Biegeprüfung erfolgen kann, ist es bedeutend schwieriger, einen für die Baupraxis und die Normierung geeigneten Wert für die Schubfestigkeit und den Schubmodul zu ermitteln.

Im Forschungsprojekt WHFF-CH 2019.10 sollten daher Prüfmethoden für die experimentelle Ermittlung der Schubsteifigkeit und der Schubfestigkeit von Trägern (insb. aus Laubholz-BSH) für zwei Anwendungsbereiche untersucht werden, nämlich (i) für die Forschung, wo es wichtig ist, dass sich in den Versuchen praktisch ausschliesslich Schubbrüche einstellen und wo es möglich ist, auch komplexe Test-Setups zu realisieren und fortgeschrittene Messmethoden (z.B. Bildkorrelationsmessungen) einzusetzen; und (ii) für den BSH-Produktionsbetrieb, wo es wichtig ist, mit einfachen, kostengünstigen Test-Setups sowie Mess- und Auswertemethoden zu operieren und wo bei der Qualitätskontrolle im Rahmen der Erstprüfung (und sofern angezeigt, im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle) die Überprüfung der deklarierten Eigenschaften des BSH-Produkts im Vordergrund steht. Desweiteren sollten genauere Kenntnisse zum Einfluss der Bauteilgrösse auf die Schubfestigkeit (Einfluss der Querschnittsabmessungen, Einfluss der geometrischen Abmessungen der Prüfkongfiguration) von BSH-Trägern aus Nadelholz (Fichte) und aus Laubholz (Buche und insbesondere Esche) erarbeitet und daraus für die Baupraxis gültige Beziehungen zur Erfassung des Grösseneinflusses bei der Schubfestigkeit abgeleitet werden.

Die Ergebnisse der geleisteten Forschungsarbeiten können wie folgt zusammengefasst werden:

In 3-Punkt-Biegeversuchen an Fichten-BSH-Trägern der Festigkeitsklasse GL 32c mit Trägerhöhen von 480, 600 und 800 mm wurden Mittelwerte der Schubfestigkeit bzw. des Schubmoduls von 4.1 N/mm^2 bzw. 600 N/mm^2 ermittelt. Die Abhängigkeit der Schubfestigkeit (Schubspannung am Ort des Schubbruchs) von der Trägerhöhe kann, ausgehend von einer Referenz-Trägerhöhe von 600 mm mit der Funktion $f_v = 4.0 \cdot (600/h)^{0.76}$ beschrieben werden.

Aus den wenigen Vorversuchen an je einem 400, 500, 600 und 700 mm hohen Buchen-BSH-Träger der Festigkeitsklasse GL 48c wurden Mittelwerte der Schubfestigkeit bzw. des Schubmoduls von 9 N/mm^2 bzw. $1000 - 1100 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Diese Werte stimmen gut mit denjenigen überein, welche im Rahmen des AP Holz-Projekts durch Ehrhart et al. ermittelt worden waren. Die Abhängigkeit der Schubfestigkeit (Schubspannung am Ort des Schubbruchs) von der Trägerhöhe kann mit einer Funktion in der Form $f_v = \text{Konstante} \cdot h^{-0.40}$ beschrieben werden.

Den Schwerpunkt der Untersuchungen bildeten 3-Punkt- und 4-Punkt-Biegeversuche an Eschen-BSH-Trägern der Festigkeitsklassen GL 40c, GL 48c und GL 48c "Spezial", letztere mit jeweils 3 Lamellen der Festigkeitsklasse T50 ohne Keilzinkenstösse auf der Biegezugseite, um zu verhindern, dass die Träger auf Biegung versagen, bevor ein Schubbruch eintritt. Aus

den Versuchen ergaben sich Mittelwerte der Schubfestigkeit $f_{v,\text{mean}}$ bzw. des Schubmoduls G_{mean} von 10 bis 12 N/mm² bzw. 1120 bis 1160 N/mm². Die Abhängigkeit der Schubfestigkeit von der Trägerhöhe h kann, ausgehend von einer Referenz-Trägerhöhe von 600 mm, ausgehend von den Ergebnissen der 4-Punkt-Biegeversuche mit einer Funktion in der Form $f_v = \text{Konstante} \cdot (600/h)^{0.35}$ beschrieben werden. Aus den 3-Punkt-Biegeversuchen wurde der Zusammenhang $f_v = \text{Konstante} \cdot (600/h)^{0.20}$ ermittelt. Diese Forschungsergebnisse zum Eschen-BSH wurden im Rahmen der Publikation Lignatec 33/2021 "Verklebte Laubholzprodukte für den statischen Einsatz" in die Praxis umgesetzt werden. Im Lignatec 33/2021 ist der Mittelwert des Schubmoduls von Eschen-BSH mit $G_{\text{mean}} = 1000 \text{ N/mm}^2$ angegeben und die Schubfestigkeit, auf der sicheren Seite liegend, mit einem Bemessungswert von $f_{v,d} = 3.2 \text{ N/mm}^2$. Die Korrekturfunktion zur Erfassung des Einflusses der Bauteilgrösse auf die Schubfestigkeit wurde im Lignatec 33/2021 in der Form $f_v = \text{Konstante} \cdot (600/h)^{0.25}$ angegeben.

Entscheidend für alle Schubprüfungen an BSH-Trägern ist es, eine möglichst dem Schubfluss entsprechende Krafteinleitung zu gewährleisten. Dies ist mittels einer Krafteinleitung ausschliesslich über Querdruck im Holz nicht oder nur für kleine Trägerhöhen (und bei Trägern aus Fichtenholz) möglich. Die Einleitung der zur Erzeugung von Schubbrüchen in Laubholz-BSH nötigen hohen Kräfte ist, bedingt durch die höhere Schubfestigkeit von Laubholz-BSH, praktisch nur mit eingeklebten Gewindestangen durchführbar. In den im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts durchgeführten Versuchen konnte gezeigt werden, dass es durch Verstärkung der Krafteinleitungszonen im Bereich der Lastenleitungen und der Auflager mittels eingeklebten Gewindestangen System GSA[®] fallweise ergänzt durch in vorgebohrte Löcher eingedrehte Vollgewindeschrauben möglich ist, die notwendigen hohen Kräfte in die Prüfkörper einzuleiten.

Um den Einfluss des Verhältnisses der Schubfeldlänge zur Trägerhöhe $\alpha = L_v/h$ zu untersuchen, bzw. den entsprechenden optimalen α -Wert zu ermitteln, wurden im vorliegenden Forschungsprojekt Versuche an Trägern mit unterschiedlichen α -Werten zwischen 1.11 und 2.5 durchgeführt. Wie durch die Versuche erneut bestätigt wird, ist zur Ermittlung der Schubfestigkeit eine genormte Basis-Prüfkonfiguration in Form eines 3-Punkt-Biegeversuchs mit einem Verhältnis zwischen Schubfeldlänge und Trägerhöhe von $\alpha = 1.6 - 1.8$ zu empfehlen, um Biegebrüche zu vermeiden und um ein möglichst reine Schubspannungsverteilung im Schubfeld zu erhalten. Für diesen Wertebereich von α ergaben sich auch ähnliche Schubmoduln aus den 3-Punkt- bzw. den 4-Punkt-Biegeversuchen.

Für die Baupraxis genügt in der Regel der Nachweis, dass die festgelegten Produktewerte erfüllt werden, bzw. dass die Prüfwerte über diese Anforderungen liegen. Hierfür genügt die einfachere 3-Punkt-Biegeprüfkonfiguration. Ein vertiefter Einblick in das Schubverhalten lässt sich allerdings mit dieser Prüfkonfiguration nicht gewinnen. Hierfür bietet sich die in diesem Projekt eingesetzte sogenannte "Alternative 4-Punkt-Biegeprüfkonfiguration" an. Diese ist zwar aufwendiger, ermöglicht es aber, bei gleich grossen erforderlichen Kräften höhere Schubspannungen zu erzeugen und längere Schubfelder zu prüfen. Im Vergleich zu 3-Punkt-Biegeversuchen erlaubt diese Art des Versuchs eine Verdopplung der Feldlänge bei identem Biegemoment und identener Querkraft. Der Einfluss der Querdruckspannungen auf die Schubspannung kann damit nahezu eliminiert werden. Während für die Baupraxis die Kontrolle bzw. der Nachweis einer festgelegten bzw. deklarierten Baustoffeigenschaft im Vordergrund steht und damit *de facto* ein Systemwert verknüpft mit einem geregelten Vorgehen (Prüfung, Abmessungen, Auswertung) gemeint ist, möchte man in der Forschung das Schubverhalten von BSH-Trägern möglichst ganzheitlich erfassen.

FESTLEGUNG DER SCHUBSTEI- FIGKEIT UND SCHUBFESTIG- KEIT VON TRÄGERN, INSB. AUS LAUBHOLZ-BSH

**Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz
Projekt 2019.10**

Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Wald
und
Konferenz für Wald, Wildtiere und Landschaft KWL

Schlussbericht Teil 1 Einleitung

René Steiger
Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen, 8600 Dübendorf

Inhaltsverzeichnis

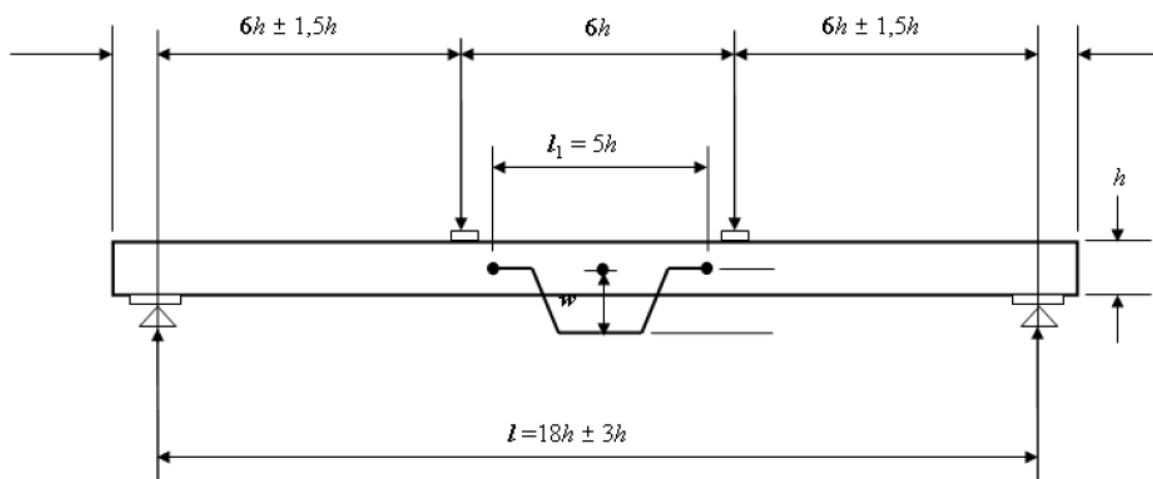
1	PROBLEMBESCHREIBUNG.....	10
2	ZIELE DES PROJEKTS	15
3	BEDEUTUNG DES PROJEKTS FÜR FORSCHUNG UND PRAXIS	15
4	METHODIK	16
4.1	ARBEITSSCHRITTE	16
4.2	VORVERSUCHE	16
4.3	FORMULIERUNG VON FRAGEN.....	17
4.4	HAUPTVERSUCHE	17
5	ERWARTETE PROJEKTERGEBNISSE.....	19
6	LITERATUR	19

1 Problembeschreibung

In der Baupraxis wird Holz sehr häufig in Form von Biegeträgern aus Vollholz oder Brett-schichtholz (BSH) in Holztragwerken eingesetzt. Der Ingenieur hat in seiner statischen Berechnung nachzuweisen, dass ein Biegeträger die Anforderungen der Baunormen betreffend Trag-sicherheit und Gebrauchstauglichkeit erfüllt. Dies umfasst in der Regel den Nachweis einer ausreichenden Biege- und Schubfestigkeit sowie eine Berechnung der zu erwartenden Durch-biegung und einen Vergleich dieses Werts mit Richtwerten, welche in den Normen (z.B. Norm SIA 265 [1]) angegeben sind.

Zentrale mechanische Eigenschaften in den erwähnten Nachweisen sind die Biegefestigkeit f_m , die Schubfestigkeit f_v , der Biege-Elastizitätsmodul E_m und der Schubmodul G . Diese Werte müssen für die in der Baupraxis eingesetzten Holzprodukte nach den Vorgaben von Prüfnormen ermittelt werden. Die für die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Biegeträgern in Europa massgebende Prüfnorm ist die EN 408 [2].

Während die experimentelle Bestimmung von Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul auf verhältnismässig einfache Weise mit einer 4-Punkt-Biegeprüfung (Abb. 1) erfolgen kann, ist es bedeutend schwieriger, einen für die Baupraxis und die Normierung geeigneten Wert für die Schubfestigkeit und den Schubmodul zu ermitteln.



$$\text{Biegefestigkeit: } f_m = \frac{3Fa}{bh^2} \quad \text{Biege-Elastizitätsmodul } E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)}$$

Abb. 1: 4-Punkt-Biegeprüfung und Formeln gemäss EN 408 [2] zur experimentellen Ermittlung der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls.

Bei der Ermittlung von Schubmodul und Schubfestigkeit stellen sich die folgenden Probleme:

- Bei der Scherprüfung mit einem Kraft- zur Faserwinkel von 14° gemäss EN 408, Ziffer 18 (Abb. 2) stellen sich während des Versuchs im Prüfkörper nicht nur Schubspannungen ein, sondern auch Spannungen rechtwinklig zur Faserrichtung. Letztere führen im Fall von Querzug zu einer Reduktion der Schubfestigkeit, im Fall von Querdruck zu einer Erhöhung.
- Andere Prüfverfahren sind kompliziert in der Umsetzung (z.B. Torsion gemäss EN 408, Ziffer 11.1 (Abb. 3 und Abb. 4) und bedingen einen entsprechenden Aufwand im Ver-

suchsaufbau. In der Forschung wird daher vermehrt die asymmetrische 4-Punkt-Biegeprüfung eingesetzt [3] (Abb. 5), welche bezüglich Aufwand und Komplexität eine Mittelstellung einnimmt.

- Die Referenzhöhe für die Angabe / Ermittlung der Biegefestigkeit bei BSH beträgt 600 mm. Es ist naheliegend, diese Referenzhöhe auch für die Bestimmung der Schubfestigkeit anzusetzen. Dies führt jedoch insbesondere bei BSH aus Laubholz zu sehr hohen in den Prüfkörper einzuleitenden Kräften. Versuche mit Lasteinleitungen über Querdruck, wie man sie traditionell bei BSH-Trägern aus Nadelholz durchführt, sind wegen den bei BSH aus Laubholz nötigen wesentlich höheren Kräften ungeeignet.
- Bei der der Baupraxis am ehesten entsprechenden, einfach durchzuführenden 3-Punkt-Biegeprüfung von Trägern mit kurzer Spannweite (Abb. 6) ergeben sich zur Erzielung von Schubbrüchen grosse Kräfte, welche beim Lasteinleitungspunkt in Spannweitenmitte und bei den Auflagern einzuleiten sind. Diese Kräfte können bereits bei BSH aus Nadelholz hohe Werte erreichen, sind jedoch bei BSH aus Laubholz nochmals um einiges grösser. Um zu verhindern, dass vor dem Auftreten eines Schubbruchs die Prüfkörper wegen zu grossen Spannungen rechtwinklig zur Faserrichtung an den Lasteinleitungspunkten infolge Überschreitens der Querdruckfestigkeit versagen, müssen die Prüfkörper mittels Schrauben oder eingeklebten Gewindestangen verstärkt werden [4, 5] (Abb. 7). Diese Verstärkungen müssen, was die Steifigkeit und die Einschraub- bzw. Einklebelänge betrifft, so ausgelegt sein, dass die Schubspannungsverteilung im Prüfkörper möglichst wenig beeinflusst wird und sich ein Schubbruch unbehindert einstellen kann.
- Es ist schwierig, eine Prüfkörperkonfiguration und Trägerverstärkung zu finden, welche während des Versuchs im Prüfkörper einen Zustand reinen Schubs, d.h. ohne Überlagerung markanter Spannungen rechtwinklig zur Faserrichtung zu erzeugen [6]. Entscheidend bei allen Schubprüfungen an BSH-Trägern ist es, eine Krafteinleitung zu gewährleisten, welche möglichst dem Schubfluss entspricht. Dies ist mit der traditionellen Krafteinleitung über Querdruck nicht oder nur für kleine Trägerhöhen (und BSH aus Nadelholz) möglich. Bei BSH aus Laubholz sind Schubversuche, bedingt durch die markant höhere Schubfestigkeit, praktisch nur mit eingeklebten Gewindestangen durchführbar. Durch diese Massnahme kann ein Schubfeld mit durch Spannungen rechtwinklig zur Faserrichtung nahezu unbeeinflusster Schubspannungsverteilung erzeugt werden (Abb. 8).

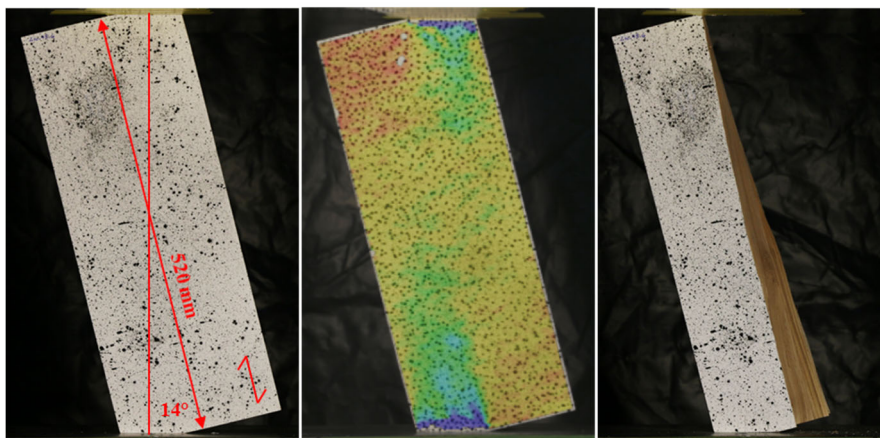


Abb. 2: Druckscher-Prüfkörper mit einem Kraft- zur Faserwinkel von 14° zur Bestimmung der Schubfestigkeit und des Schubmoduls: Prüfkörper vor dem Versagen (links), Dehnungsverteilung ϵ_{xx} kurz vor dem Versagen (parallel zur Faserrichtung, Mitte) sowie Prüfkörper nach dem Versagen (rechts).

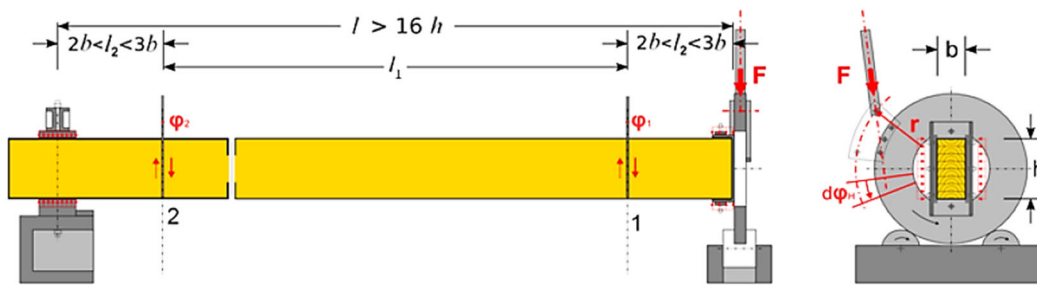


Abb. 3: Prinzip einer Torsions-Prüfanordnung mit Anforderungen an die Anordnung der Messstellen gemäss EN 408, Ziffer 11.1 [2] zur Bestimmung des Schubmoduls.

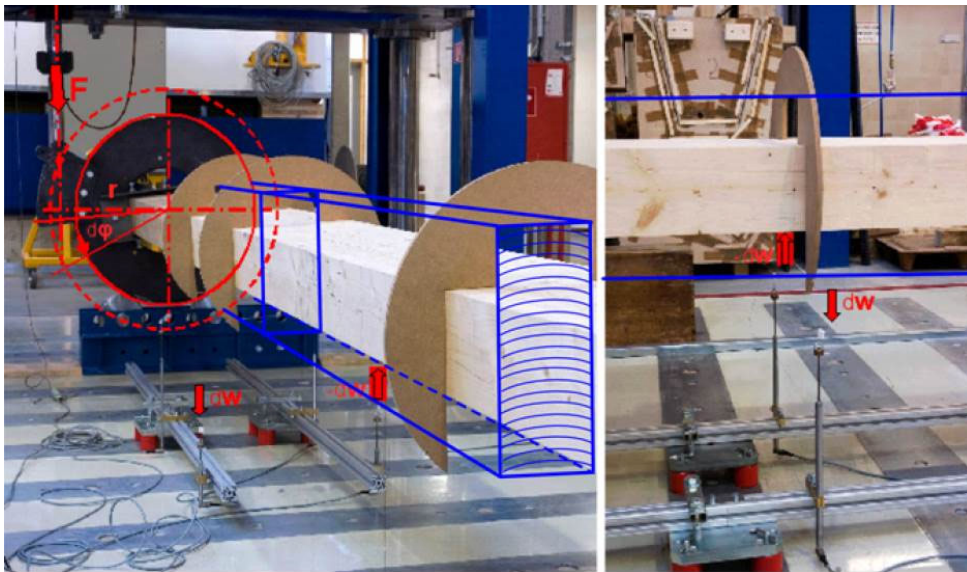


Abb. 4: Beispiel einer Torsions-Prüfanordnung gemäss EN 408, Ziffer 11.1 [2] zur Bestimmung des Schubmoduls.

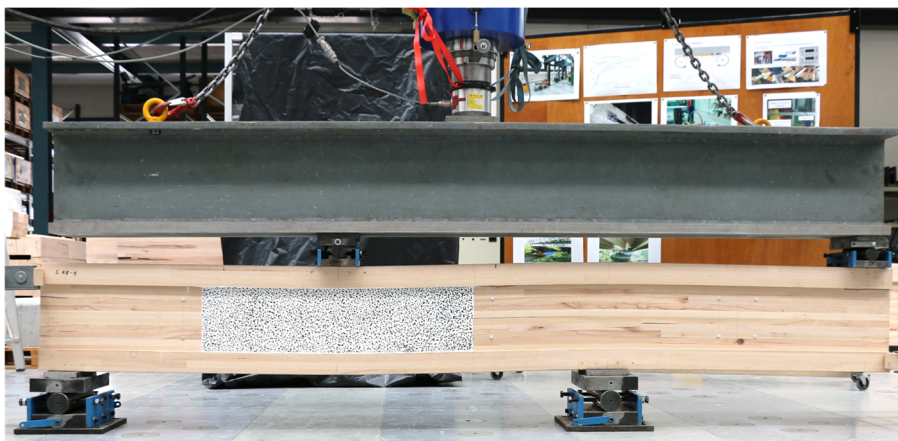


Abb. 5: Asymmetrischer 4-Punkt Biegeversuch zur Bestimmung von Schubmodul und Schubfestigkeit.

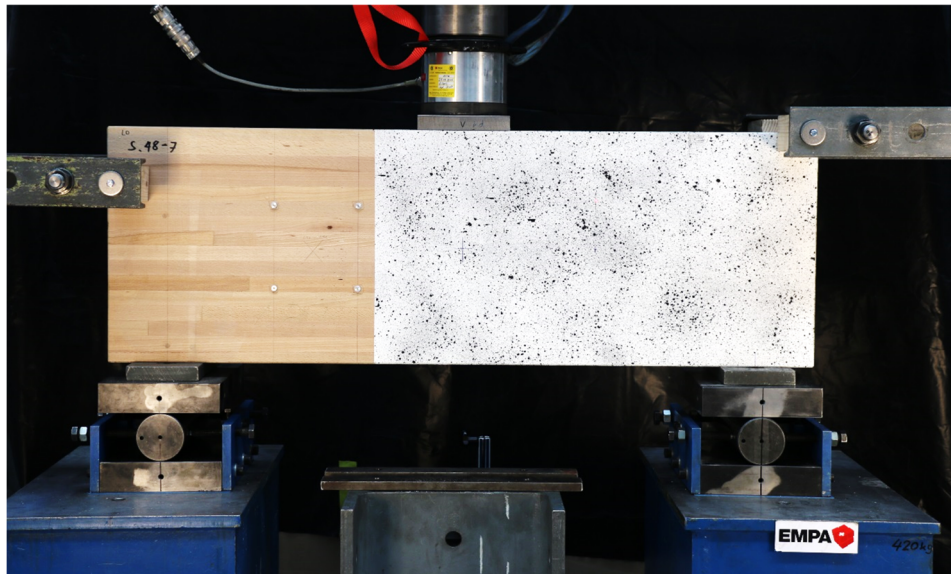


Abb. 6: 3-Punkt Biegeversuch zur Bestimmung von Schubmodul und Schubfestigkeit.

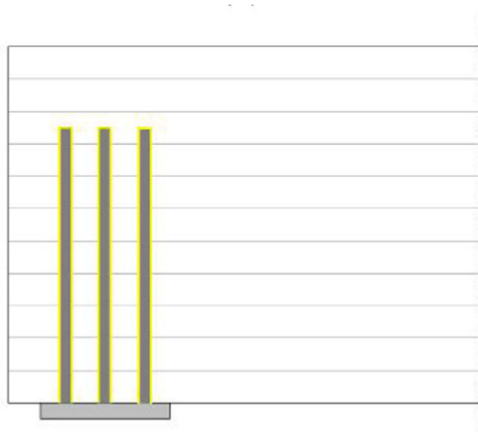


Abb. 7: Verstärkung rechtwinklig zur Faserrichtung mittels Schrauben oder eingeklebten Gewindestangen zur Verhinderung des Querdruckversagens bei den Lasteinleitungen [5].

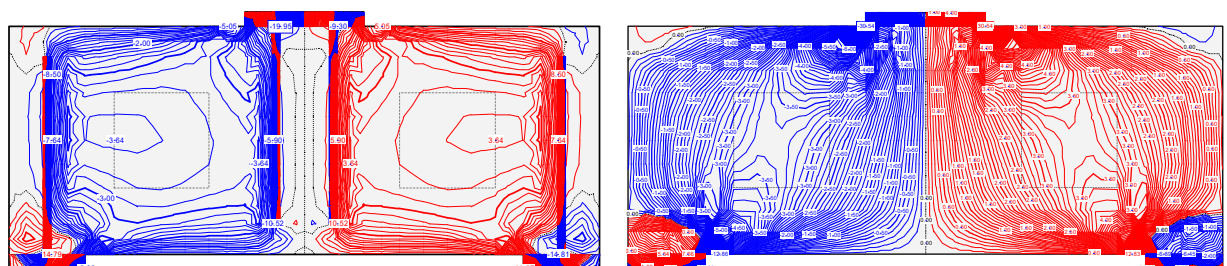


Abb. 8: Bei der Übertragung von Kräften in den Prüfkörper mittels Schrauben oder eingeklebter Gewindestangen treten im elastischen Bereich Schubfelder mit gleichmässiger Schubspannungsverteilung auf (links), nicht aber bei der direkten Übertragung der Kräfte über Querdruck (rechts) [6].

Bekannter Weise sind viele der Festigkeitseigenschaften von Holz von der Grösse des beanspruchten Volumens abhängig (sogenannter Volumeneinfluss oder Grösseneinfluss). Dies trifft neben der Biegefestigkeit insbesondere auf die Schubfestigkeit zu. Diese Tatsache hat in den Baunormen bisher kaum Eingang gefunden; die Schubfestigkeiten sind, trotz des im Vergleich zur Biegefestigkeit sogar grösseren Einflusses des Volumens, in den europäischen Normen für Vollholz (EN 338 [7]) und für Brettschichtholz (EN 14080 [8]) als konstante Werte angegeben.

Mit der angestrebten Normung von BSH aus Laubholz, insbesondere von BSH aus Buche, sind zuverlässige Festlegungen bezüglich Schub erforderlich. Im Rahmen des durch den Aktionsplan Holz geförderten Forschungsprojekts REF-1011-04200 "Homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz – Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt für Biegeträger und Stützen" wurden bereits, ergänzend zu Biegeversuchen, Schubversuche durchgeführt [3]. Diese zeigen das grosse Potential des Laubholzes auf. So liegen für ähnliche Querschnittsabmessungen und -aufbauten die mittleren Schubfestigkeiten rund 3 Mal höher als bei BSH aus Nadelholz (Fichte) [3, 9]. Eine angemessene Nutzung dieser hohen Werte ist jedoch derzeit – ohne zusätzliche eingehendere Untersuchungen über das gesamte Spektrum der in der Baupraxis einzusetzenden Trägerquerschnitte – nicht vertretbar.

Da zurzeit auch bei BSH aus Nadelholz keine Grösseneinflüsse in der Bemessung berücksichtigt werden, sollte eine Regelung erarbeitet werden, welche gleichzeitig für Laub- und Nadelholz anwendbar ist. Deshalb sind im Rahmen des Projekts auch vergleichende Versuche an BSH aus Nadelholz durchgeführt.

Aus bisherigen Forschungsarbeiten ist der Einfluss des beanspruchten Volumens auf die Schubfestigkeit gut dokumentiert. Eingehendere Untersuchungen gehen zurück auf die 1970er Jahre (Keenan 1974 [10]; Foschi and Barret 1976 [11]; Barret and Foschi 1977 [12]). Die Ansätze sind leicht unterschiedlich: Keenan geht von der Grösse der Schubfläche aus, was zu einem einfacheren Ansatz führt; Barret and Foschi gehen von einem Schubvolumen aus. Gehri zeigte 1981 [13], dass beide Ansätze zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Für die Baupraxis sollte der einfachere Ansatz bevorzugt werden:

$$f_v \text{ proportional zu } A_{shear}^{0.28} \quad (1)$$

Die Abb. 9 zeigt den Verlauf des Grösseneinflussfaktors gemäss Formel (1) in Funktion der Grösse des Schubfeldes, repräsentiert durch den sogenannten α -Wert (Verhältnis der Länge des Schubfeldes zur Trägerhöhe) und veranschaulicht den grossen Einfluss des Volumens. Zu beachten ist zudem, dass die meisten Versuche mit α -Werten um 1 durchgeführt werden.

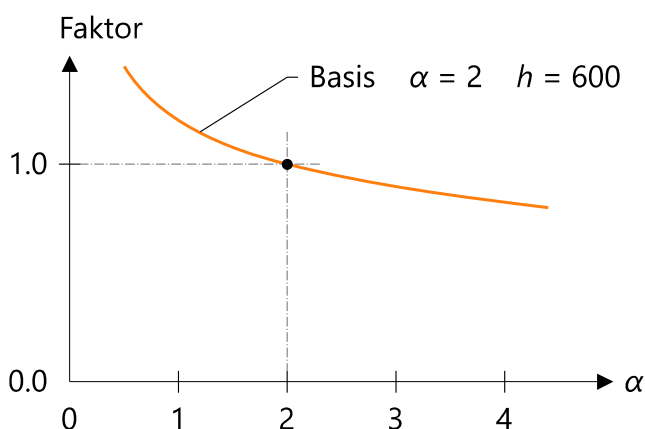


Abb. 9: Verlauf des Grösseneinflussfaktors gemäss Formel (1) in Funktion der Grösse des Schubfeldes (Verhältnis der Länge des Schubfeldes zur Trägerhöhe) α .

2 Ziele des Projekts

Das Projekt hatte zum Ziel:

- genauere Kenntnisse zum Einfluss der Bauteilgrösse auf die Schubfestigkeit (Einfluss der Querschnittsabmessungen, Einfluss der geometrischen Abmessungen der Prüfkongfiguration) von BSH-Trägern aus Nadelholz (Fichte) und aus Laubholz (Buche) zu erarbeiten;
- eine Prüfmethode für die experimentelle Ermittlung der Schubsteifigkeit und der Schubfestigkeit von Trägern (insb. aus Laubholz-BSH) zu entwickeln und Angaben zur Messung und Auswertung der Verformungen und Spannungen zu machen und zwar für die folgenden zwei Anwendungsbereiche:
 - für die Forschung, wo es wichtig ist, dass sich in den Versuchen praktisch ausschliesslich Schubbrüche einstellen und wo es möglich ist, auch komplexe Test-Setups zu realisieren und fortgeschrittene Messmethoden (z.B. Bildkorrelationsmessungen) einzusetzen;
 - für den BSH-Produktionsbetrieb, wo es wichtig ist, mit einfachen, kostengünstigen Test-Setups (z.B. 3-Punkt-Biegeprüfungen) sowie Mess- und Auswertemethoden zu operieren und wo bei der Qualitätskontrolle im Rahmen der Erstprüfung (und sofern angezeigt, im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle) der deklarierten Eigenschaften des BSH-Produkts (sogenanntes Proof-Loading mit einem Prüfwert (Threshold) der geringfügig über dem deklarierten Wert liegt) im Vordergrund steht;
- Regelabmessungen für Querschnitte festzulegen, welche die Anforderungen an die beiden oben spezifizierten Anwendungsbereiche erfüllen;
- für die Baupraxis bzw. für die Baunormen (SIA 265, EC 5) einfache Beziehungen zur Erfassung des Grösseneinflusses bei der Schubfestigkeit zu erarbeiten;
- Korrekturfaktoren anzugeben, um die Prüfergebnisse auf andere Bedingungen (Spannweite, Querschnittsabmessung, Holzfeuchte, Querkraftverlauf) umrechnen zu können.

3 Bedeutung des Projekts für Forschung und Praxis

Für die *Baupraxis* ist eine einfache Prüfmethode für die Qualitätskontrolle der Schubfestigkeit von BSH-Trägern im Rahmen der Eigen- und Fremdüberwachung gesucht. Hier steht der Nachweis bzw. die Kontrolle einer festgelegten Baustoffeigenschaft (charakteristischer Wert bzw. Bemessungswert in den Normen). Im Projekt sollte die bekannte und einfache 3-Punkt-Biegeprüfung bezüglich Spannweite in Abhängigkeit der Trägerhöhe, Querschnittsabmessungen des Trägers und Verstärkungen der Krafteinleitungszonen dahingehend optimiert, dass auch die bei BSH aus Laubholz vorhandenen hohen Schubfestigkeiten verlässlich verifiziert werden können.

Als Beitrag für die *Normung* liefert das Projekt:

- Hinweise zur auf der sicheren Seite liegenden Angabe von Schubsteifigkeiten und Schubfestigkeiten (charakteristische Werte bzw. Bemessungswerte) für BSH aus Laubholz, ohne jedoch die Wirtschaftlichkeit des Produkts zu schmälern bzw. die Schubwerte zu vorsichtig festzulegen;
- Angaben zum Grösseneinfluss bei der Schubfestigkeit und Empfehlungen zur Festlegung der Referenzhöhe bei BSH aus Laubholz.

Für die *Forschung*, wo das Erzielen von Schubbrüchen im Vordergrund steht, um die tatsächlichen mechanischen Eigenschaften von BSH (insb. aus Laubholz) zu ermitteln, macht das Projekt Vorschläge zur Optimierung der asymmetrischen 4-Punkt-Biegeprüfung.

4 Methodik

4.1 Arbeitsschritte

Das Projekt wurde in den folgenden Schritten bearbeitet:

- Vorversuche (Vorleistung durch die neue Holzbau AG und Prof. Gehri);
- Planung der Hauptversuche / Formulierung von Hypothesen;
- Herstellung der Prüfkörper, Aufbau der Prüfeinrichtungen;
- Durchführung der Hauptversuche (3-Punkt-Biegeversuche und asymmetrische 4-Punkt-Biegeversuche);
- Auswertung der Versuche / Überprüfung der Hypothesen;
- Berichterstattung.

4.2 Vorversuche

Zuerst wurde (als Vorleistung durch die neue Holzbau AG) eine Vorversuchsserie an BSH-Trägern aus Fichtenholz durchgeführt, um die Art und Geometrie der Krafteinleitung (Verstärkungen rechtwinklig zur Faserrichtung) sowie die geometrischen Abmessungen der Prüfkörper (Querschnittsabmessungen, Spannweiten, α -Werte) für die Hauptversuche festzulegen.

Im Rahmen der Vorversuche wurden durch die neue Holzbau AG 3-Punkt-Biegeversuche an 120 mm breiten Buchen-BSH-Trägern der Festigkeitsklasse GL48c durchgeführt, welche auf der Biegezug- und der Biegedruckseite mit BauBuche (Bu-LVL) verstärkt waren. Der Kernteil der Träger, wo die Schubbrüche zu erwarten waren, bestand somit aus Lamellen der Festigkeitsklassen T42 und T24. Es wurde je ein Träger mit Höhe 400 mm, 500 mm, 600 mm und 700 mm geprüft (Abb. 10, links). Sämtliche Versuche wurden mit einer Spannweite von 1'720 mm durchgeführt. Die Trägerlängen betrugen 1'900 mm. Die Länge der Schubfelder war konstant zu 780 mm gewählt (Abb. 10, rechts), wodurch sich α -Werte von 1.95 (Trägerhöhe $h = 400$ mm), 1.56 ($h = 500$ mm), 1.30 ($h = 600$ mm) und 1.11 ($h = 700$ mm) ergaben.

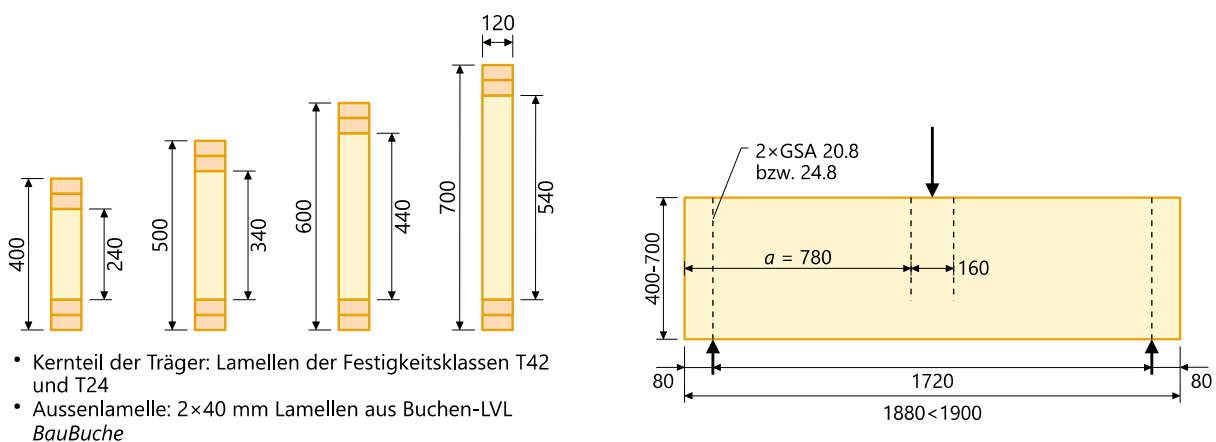


Abb. 10: Vorversuche zur Festlegung der Krafteinleitung und zur Abklärung der Notwendigkeit einer Verstärkung der Biegezugzone (durch Anordnung einer Aussenlamelle aus Buchen-LVL, BauBuche).

4.3 Formulierung von Fragen

Sodann wurden Fragen formuliert (siehe Tabelle 1). Die Fragen und das Vorgehen sind dabei ausgehend von der „Schubfläche“ formuliert. Man kann jedoch in analoger Weise vom „Schubvolumen“ ausgehen.

Tabelle 1: Für das Projekt formulierte Fragen und Vorgehensweise zu deren Überprüfung

Frage	Beantwortung
1) Ergeben sich für eine konstant gehaltene Schubfläche ($A_{shear} = \text{konstant}$) identische Schubfestigkeiten?	Beantwortung im Rahmen der Vorversuche für variable Trägerhöhe h und zugeordneten α -Wert (Verhältnis der Länge des Schubfeldes zur Trägerhöhe).
2) Gilt unabhängig vom gewählten α -Wert der Zusammenhang zwischen Schubfestigkeit f_v und Schubfläche A_{shear} gemäss Formel (1) (f_v proportional zu A_{shear}^β) und beträgt der Wert des Exponenten $\beta = -0.28$?	Beantwortung im Rahmen der Hauptversuche für (i) eine konstante Trägerbreite b (Fichten-BSH: 160 mm, Buchen-BSH: 120 mm); (ii) eine konstante Trägerhöhe h (Fichten-BSH und Buchen-BSH: 600 mm).
3) Ist die Formel (1) (f_v proportional zu A_{shear}^β) und der Exponent $\beta = -0.28$ korrekt für eine variable Trägerhöhe h ?	Beantwortung im Rahmen der Hauptversuche für ein Verhältnis der Länge des Schubfeldes zur Trägerhöhe von $\alpha = 2.0$.

4.4 Hauptversuche

Die Haupt-Versuchsserie umfasste:

- 3-Punkt-Biegeversuche an einer Serie von 21 Trägern (Fichten-BSH der Festigkeitsklasse GL 32c und Eschen-BSH der Festigkeitsklasse GL 48c) mit einer Höhe von 480, 600 und 800 mm und α -Werten (= Verhältnis der Länge des Schubfeldes zur Trägerhöhe) von 1.2, 1.6, 2.0 und 2.5 (Tabelle 2), um die Vergleichbarkeit mit den asymmetrischen 4-Punkt-Biegeversuchen zu ermöglichen. Die Wahl von höheren Festigkeitsklassen GL 32c bzw. GL 48c war nötig, um zu verhindern, dass vorzeitiges Biegeversagen auftrat.
- asymmetrische 4-Punkt-Biegeversuche mit unterschiedlichen α -Werten (= Verhältnis der Länge des Schubfeldes zur Trägerhöhe) von 1.2, 1.6, 2.0 und 2.5 an 26 Prüfkörpern aus Eschen-BSH der Festigkeitsklasse GL 48c (Tabelle 3) mit Trägerhöhen von 480, 600 und 800 mm. Die meisten Versuche werden an Trägern mit einer Höhe von $h = 600$ mm (14 Prüfkörper) durchgeführt.

Sämtliche Prüfkörper wurden zur Einleitung der grossen Kräfte mit eingeklebten Gewindestangen GSA und Vollgewindeschrauben VG verstärkt:

- Endauflager: 2 GSA 20.8 + 6 VG 10/200;
- Mittelaflager: 4 GSA 20.8 + 9 VG 10/200.

Gemessen bzw. registriert wurden:

- die Schubverformungen mittels beidseitig angeordneter Messkreuze und die Verformungen in einem Schubfeld mittels Bildkorrelationsmessung (DIC), siehe Abb. 5 und Abb. 6;

- Kraft
- Schubversagen (Werte von Verformung und Kraft, Position und Verlauf des Versagens, Beobachtungen).

Tabelle 2: Zusammenstellung der im Rahmen der Haupt-Serie in 3-Punkt-Biegeversuchen geprüften 21 Träger (Abmessungen und Anzahl Versuche n)

Holzart	Abmessungen [mm] Breite / Höhe	Länge [mm]	α -Wert ¹⁾	Anzahl	Volumen [m³]
Fichte GL 32c	160 / 480	1'896	1.6	$n = 3$	0.4368
	160 / 600	2'280		$n = 3$	0.6566
	160 / 800	2'920		$n = 3$	1.1213
	160 / 600	1'800	1.2	$n = 1$	0.1728
		2'760	2.0	$n = 1$	0.2650
		3'360	2.5	$n = 1$	0.3226
Esche GL 48c	120 / 480	1'896	1.6	$n = 3$	0.3276
	120 / 600	2'280		$n = 3$	0.4925
	120 / 800	2'920		$n = 3$	0.8410
					4.6362

¹⁾ α = Verhältnis der Länge des Schubfeldes zur Trägerhöhe

Tabelle 3: Zusammenstellung der im Rahmen der Haupt-Serie in asymmetrischen 4-Punkt-Biegeversuchen geprüften 26 Träger (Abmessungen und Anzahl Versuche n)

Holzart	Abmessungen [mm] Breite / Höhe	Länge [mm]	α -Wert ¹⁾	Anzahl	Volumen [m³]
Esche GL 48c	120 / 480	5'600	1.6	$n = 3$	0.9677
			2.0	$n = 3$	0.9677
	120 / 600	5'920	1.2	$n = 3$	1.2787
			1.6	$n = 5$	2.1312
			2.0	$n = 3$	1.2787
			2.5	$n = 3$	1.2787
	120 / 800	5'920	1.2	$n = 3$	1.7050
			1.6	$n = 3$	1.7050
					11.3127

¹⁾ α = Verhältnis der Länge des Schubfeldes zur Trägerhöhe

Um Flexibilität in der Abwicklung der Versuche zu erhalten, wurden zusätzlich zu den in der Tabelle 2 aufgelisteten Prüfkörper je 2 BSH-Träger aus Fichte hergestellt mit den Abmessungen $b \times h = 160 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ und Längen von 1'896, 2'280 und 2'920 mm. Dies ermöglichte es, falls nötig die Anzahl der Versuche zu erhöhen, oder Versuche mit zusätzlichen α -Werten (Zwischenwerte zwischen $\alpha = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$) durchzuführen. Daraus resultierte ein zusätzli-

cher Materialaufwand an Fichten-BSH GL 32c von 1.3624 m³. Insgesamt wurden in den Hauptversuchsserien 4.34 m³ Fichten-BSH der Festigkeitsklasse GL 32c und 12.97 m³ Eschen-BSH der Festigkeitsklasse GL 48c geprüft.

5 Erwartete Projektergebnisse

Das Projekt sollte die folgenden Ergebnisse liefern:

- Messprotokolle;
- Auswertungen und technischer Bericht;
- Validierung der aufgestellten Hypothesen und Vorschlag für die Erfassung des Gröseneinflusses;
- Vorschlag für die Festlegung von charakteristischen Werten und Bemessungswerten für die Schubfestigkeit von BSH aus Laubholz sowie von Formeln zur Erfassung des Gröseneinflusses zu Handen von Normungsgremien
- Vorschlag einer Prüfkongfiguration für die Durchführung von Schubversuchen an BSH-Trägern aus Laubholz im Rahmen der Forschung, wo das Erzielen von Schubbrüchen im Vordergrund steht;
- Vorschlag einer Prüfkongfiguration für die Durchführung von Schubversuchen an BSH-Trägern aus Laubholz im Rahmen der Qualitätskontrolle (Eigen- und Fremdüberwachung) im BSH-Produktionsbetrieb, wo das Überprüfen der deklarierten Werte der Schubfestigkeit im Vordergrund steht.

6 Literatur

1. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, *Norm SIA 265 - Holzbau*. 2021, Zürich: Sia.
2. Comité Européen de Normalisation CEN, *EN 408:2010 + A1:2012: Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties*. 2010 / 2012: CEN, Bruxelles, Belgium.
3. Ehrhart, T., et al. *CIB-W18/INTER/51-12-4: Mechanical properties of European beech glued laminated timber*. in *Meeting Five*. 2018. Tallinn, Estonia.
4. Gehri, E., *Eingeklebte Anker - Anforderungen und Umsetzung*, in *15. Internationales Holzbau-Forum 09*. 2009: Garmisch-Partenkirchen, Deutschland. p. 2. - 4. Dezember 2009.
5. Steiger, R., et al., *Strengthening of timber structures with glued-in rods*. Construction and Building Materials, 2015. **97**: p. 90-105.
6. Steiger, R. and E. Gehri. *Paper CIB-W18 44-6-2: Interaction of shear stresses and stresses perpendicular to the grain*. in *Proceedings of CIB-W18 Meeting Forty-four*. 2011. Alghero, Italy.
7. Comité Européen de Normalisation CEN, *EN 338: Structural timber - Strength classes*. 2016, Comité Européen de Normalisation CEN. p. 13.
8. Comité Européen de Normalisation CEN, *EN 14080: Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements*. 2013, Comité Européen de Normalisation CEN. p. 103.
9. Büeler, M., *Schubverhalten von Brettschichtholzträgern aus Buche und Esche*, in *Institute of Strcutural Engineering - Steel, Timber and Composite Structures*. 2011, ETH Zürich: Zurich. p. 75.
10. Keenan, F.J., *Shear strength of wood beams*. Forest Products Journal, 1974. **24**(9): p. 63-70.
11. Foschi, R.O. and J.D. Barrett, *Longitudinal shear strength of Douglas-fir*. Canadian Journal of Civil Engineering, 1976. **3**: p. 198-208.
12. Barrett, J.D. and R.O. Foschi, *Shear strength of uniformly loaded dimension lumber*. Canadian Journal of Civil Engineering, 1977. **4**: p. 86-95.
13. Gehri, E., *Grundlagen der Berechnung und Bemessung*, in *Einführung in die Norm SIA 164 (1981) Holzbau*. 1981, Professur bei Baustatik und Stahlbau, ETH Zürich: Zürich. p. 59-117.

FESTLEGUNG DER SCHUBSTEI- FIGKEIT UND SCHUBFESTIG- KEIT VON TRÄGERN, INSB. AUS LAUBHOLZ-BSH

**Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz
Projekt 2019.10**

Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Wald
und
Konferenz für Wald, Wildtiere und Landschaft KWL

Schlussbericht Teil 2 Vorversuche an Buchen-BSH (3-Punkt-Biegung)

Ernst Gehri
Prof. em. ETH Zürich, 8803 Rüschlikon

Inhaltsverzeichnis

1	EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG DES SCHUBWIDERSTANDS VON BSH-TRÄGERN.....	24
2	KONZEPT DER VORVERSUCHE DURCH DIE NEUE HOLZBAU AG.....	25
2.1	RECHNERISCHE BESTIMMUNG DES SCHUBWIDERSTANDS	25
2.2	SCHWIERIGKEITEN BEI DER EXPERIMENTELLEN ERMITTLUNG DER SCHUBFESTIGKEIT.....	27
2.2.1	<i>Bruchart.....</i>	27
2.2.2	<i>Krafteinleitung (Prüflast und Auflager-Reaktionskräfte).....</i>	27
2.2.3	<i>Unterschiede in der Belastung bei Versuch und in der Bau-Praxis.....</i>	27
2.3	AUSBILDUNG DER PRÜFKÖRPER.....	28
2.3.1	<i>Werkseitige Vorgabe</i>	28
2.3.2	<i>Querschnittsaufbau.....</i>	28
2.3.3	<i>Ausbildung der Krafteinleitungen</i>	28
2.3.4	<i>Abmessungen der Schubfelder.....</i>	29
2.4	VERSUCHSAUFBAU UND MESSUNGEN	29
2.5	BESTIMMUNG DES SCHUBMODULS	31
2.5.1	<i>Längenänderung der Diagonalen infolge der Schiebung.....</i>	31
2.5.2	<i>Einfluss einer Biegebeanspruchung auf die Verzerrungen</i>	31
2.5.3	<i>Praktisches Vorgehen.....</i>	32
3	VERSUCHSERGEBNISSE.....	33
3.1	PRÜFKÖRPER MIT EINER TRÄGERHÖHE VON $H = 400$ MM	33
3.1.1	<i>Schubverzerrungen in den Feldern</i>	33
3.1.2	<i>Schubmodul</i>	34
3.2	PRÜFKÖRPER MIT EINER TRÄGERHÖHE VON $H = 500$ MM	36
3.3	PRÜFKÖRPER MIT EINER TRÄGERHÖHE VON $H = 600$ MM	37
3.4	PRÜFKÖRPER MIT EINER TRÄGERHÖHE VON $H = 700$ MM	38
4	FOLGERUNGEN AUS DEN VERSUCHEN	39
4.1	KRAFTEINLEITUNGEN.....	39
4.2	SCHUBFESTIGKEIT	39
4.3	SCHUBMODUL	40
4.4	EINFLUSS DER SCHUBFELDLÄNGE	40
4.5	TRAGLAST IN FUNKTION DER TRÄGERHÖHE	40
4.6	FAZIT	42
5	LITERATUR	42

1 Experimentelle Ermittlung des Schubwiderstands von BSH-Trägern

Versuchsmässig wird direkt nur das Tragvermögen F – ausgehend von einer Prüfkongfiguration z.B. in einem 3-Punkt-Biegeversuch – erfasst. Einer der wichtigsten Parameter für die Festlegung der optimalen geometrischen Abmessungen in 3-Punkt-Biegeversuchen mit dem Ziel, die Schubfestigkeit von BSH-Trägern experimentell zu bestimmen, ist der Wert α , welcher das Verhältnis zwischen der Länge a und der Höhe h des Schubfelds beschreibt (Abb. 1).

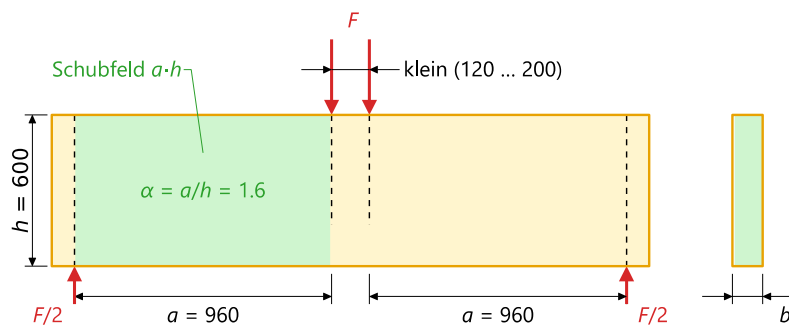


Abb. 1: Schubfelder (Zonen mit gleichmässiger ungestörter Schubverformungen) beim 3-Punkt-Biegeversuch.

In beiden Seitenfeldern wirkt eine konstante Querkraft und somit wird eine weitgehend konstante Schubbeanspruchung über die Feldlänge a erreicht. Unter der Annahme des Vorliegens eines schlanken, prismatischen und geraden Stabes lassen sich die resultierenden Schubspannungen – nach der klassischen Biegelehre – mit ausreichender Genauigkeit ermitteln zu:

$$\tau_{\max} = \frac{3}{4} \cdot \frac{F}{b \cdot h} \quad (1)$$

Die Traglast auf Schub (F_v) lässt sich somit – bei bekannten Schubeigenschaften – in Funktion der Schubfestigkeit f_v rechnerisch bestimmen zu:

$$F_v = \frac{4}{3} \cdot b \cdot h \cdot f_v \quad (2)$$

Falls kein Grösseneinfluss auf die Schubfestigkeit f_v vorliegt, ist die Traglast – bei konstanter Trägerbreite b – nur noch linear von der Trägerhöhe h abhängig (d.h. proportional zu h):

$$F_v \sim h \quad (3)$$

Bei Werkstoffen mit spröden Bruchverhalten – hierzu zählt Holz, insbesondere bei Versagen auf Schub – gilt generell gemäss der Weakest Link von Weibull [1]:

$$F_v \sim h^\beta \quad \text{mit} \quad \beta < 1 \quad (4)$$

Ein analoges Verhalten liegt bei Biegung – allerdings in abgeschwächter Form – vor. Die Traglast auf Biegung F_m – für den normierten Referenzträger mit einer Spannweite von 18 x Trägerhöhe h – beträgt:

$$F_m = \frac{b \cdot h}{18} \cdot f_m \quad \text{mit} \quad f_m = f(h^{-0.1}) \quad (5)$$

Somit gilt für die Proportionalität zwischen der Traglast F_m und der Trägerhöhe h :

$$F_m \sim h^{0.9} \quad \text{bzw.} \quad \beta = 0.9 \quad (6)$$

Aufgrund des wesentlich spröderen Versagens auf Schub (gegenüber Biegung) ist bei Schub ein Exponent β kleiner als 0,9 zu erwarten (Abb. 2). Aufgabe des Forschungsvorhabens ist die experimentelle Erfassung dieses Exponenten β . Zu beachten ist dabei, dass dieser Wert wesentlich von der Prüfkongfiguration abhängig ist (Verhältnisse der Schubfeldlänge a zur Trägerbreite b und zur Trägerhöhe h) und er somit mit dem einfachen aber undifferenzierten Volumeneinfluss gemäss Formel (4) ungenügend erfasst wird.

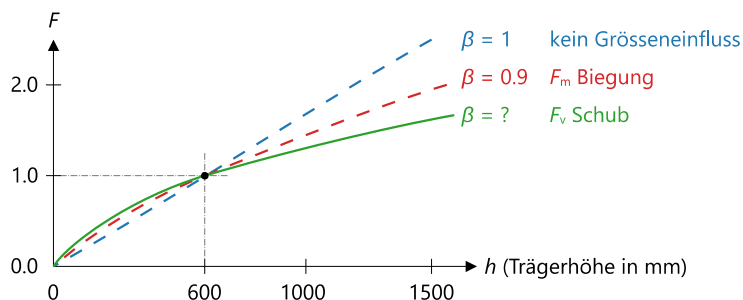


Abb. 2: Abhängigkeit des Tragwiderstands F_m bei Biegung bzw. F_v bei Schub von der Trägerhöhe h .

Generell werden Grösseneinflüsse bezogen auf eine Referenzgrösse z.B. bezogen auf das Referenz-Volumen V_{ref} , mit einer Funktion in der Form $(V_{\text{eff}}/V_{\text{ref}})^{-\beta}$ beschrieben. Aus diesem Grunde ist die Festlegung der Referenzkongfiguration entscheidend, sowohl der Prüfkongfiguration als auch der absoluten Werte (und Verhältnisse) der Referenzabmessungen der Prüfkörper.

Für die Erfassung des Tragvermögens auf Schub wird zudem eine „optimale“ Ausbildung der Prüfkörper gesucht, mit dem Ziel auch bei hoher Biegebeanspruchung möglichst weitestgehend Schubbrüche zu erzielen. Diese Randbedingung beeinflusst die Wahl des α -Werts massgeblich. Kleine α -Werte führen zu Schubbrüchen, allerdings wird die Bedingung der klassischen Biegelehre „schlanker“ prismatischer Stab dabei verletzt. Deshalb sollten α -Werte unter 1,5 vermieden werden, da hier eher „scheibenartige“ Verhältnisse vorliegen.

Die Prüfkongfiguration soll eine möglichst über die gesamte Schubfeldlänge a konstant wirkende Schubbeanspruchung – ohne wesentlichen Querdruck – gewährleisten. Dies ist mit Krafteinleitungen basierend auf der durch die neue Holzbau AG entwickelte GSA-Technologie möglich, nicht aber mit der „konventionellen“ Lasteinleitung über Querdruck [2]. Dieses System der Krafteinleitung mittels eingeklebter Gewindestangen hat sich in der Praxis für BSH aus Nadelholz bestens bewährt. Bedingt durch die im Vergleich zu Nadelholz-BSH rund doppelten Schubfestigkeit des Laubholzes (Buche, Esche, Robinie) ergeben sich entsprechend höhere Anforderungen an das Krafteinleitungs-System. Bei ungenügender Abstimmung der Prüfparameter kann das grosse Potential der Schubfestigkeit von Laubholz experimentell nicht erfasst werden. Als Basis für die später geplante Hauptversuchsserie sollte mittels Vorversuchen durch die „neue Holzbau AG“ die Grenzleistung des GSA-Systems was die Krafteinleitung in Laubholz-BSH betrifft, vorgehend geklärt werden.

2 Konzept der Vorversuche durch die neue Holzbau AG

2.1 Rechnerische Bestimmung des Schubwiderstands

Die rechnerische Erfassung des Tragwiderstandes auf Schub erfolgt traditionellerweise ausgehend von der Schubfestigkeit des eingesetzten Werkstoffes. Im Falle von Holz (Schnittholz

oder Brettschichtholz) liegt zudem in der Regel ein rechteckiger Trägerquerschnitt vor. Damit kann man den Tragwiderstand auf Schub (Träger auf Biegung infolge Querlasten) ermitteln zu:

$$V = \frac{2}{3} \cdot b \cdot h \cdot f_v \quad (7)$$

Die Parameter b und h entsprechen den Querschnittabmessungen (Breite und Höhe) und f_v der Schubfestigkeit. Bei bekannter Schubfestigkeit ist der Tragwiderstand auf Schub bestimmbar.

In Versuchen wird direkt nur das Tragvermögen des Trägers F_v bzw. die Querkraft erfasst; die Schubfestigkeit f_v lässt sich anschliessend, unter der Annahme, dass ein schlanker, prismatischer, gerader Stab vorliegt, rechnerisch ermitteln, zu:

$$f_v = \frac{3}{4} \cdot \frac{F_v}{b \cdot h} \quad (8)$$

Die diesen Formeln zugrundeliegenden Biegemomenten- und Querkraftflächen mit den entsprechend resultierenden Verläufen von Biege- und Schubspannung für eine 3-Punkt-Biegebeanspruchung mit mittiger Einzellast sind in der Abb. 3 dargestellt.

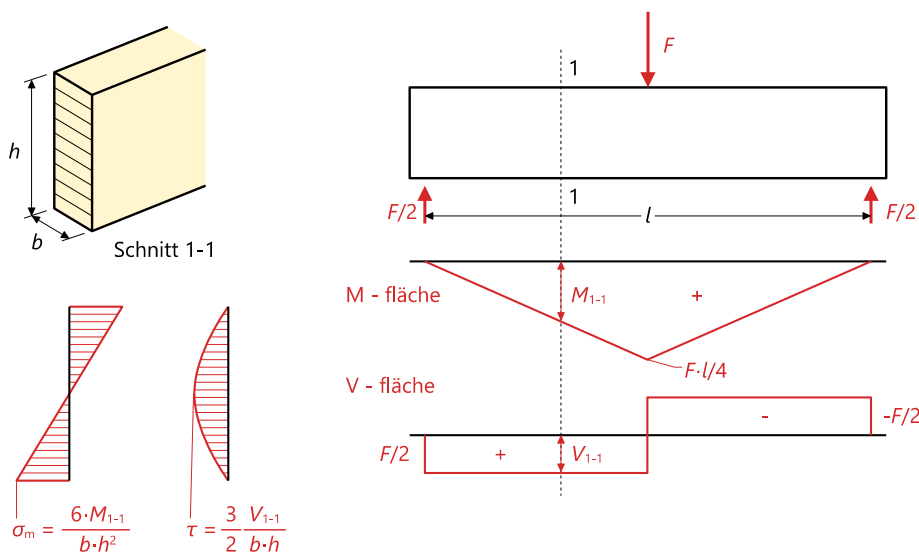


Abb. 3: Biegemomenten- und Querkraftflächen mit den entsprechend resultierenden Verläufen von Biege- und Schubspannung für eine 3-Punkt-Biegebeanspruchung mit mittiger Einzellast.

Nach Dubas, Baustatik I (1983) [3] ist folgendes dabei zu beachten:

"Die klassische Biegelehre geht bei der Bestimmung der Spannungen von der Hypothese vom Ebenbleiben ursprünglich ebener Querschnitte aus; diese Hypothese gilt an sich nur bei auf reine Biegung beanspruchten Stäben. Schubbeanspruchungen führen nämlich zu Verzerrungen mit entsprechenden Verwölbungen der Querschnittsfläche: für schlanke Stäbe, wie sie hier vorausgesetzt sind, wird dadurch die ε -Verteilung nur unwesentlich beeinflusst, so dass die Bernoulli-Navier'sche Hypothese im Rahmen der praktisch erforderlichen Genauigkeit zutrifft.

Bei gedungenen Stäben (Höhe oder Breite nicht mehr klein im Verhältnis zur Spannweite) ist dagegen die Scheibentheorie zu verwenden oder die Biegelehre anzupassen. Bei veränderlicher Biegung (infolge von Querkraften V) treten nicht nur Normalspannungen σ auf, sondern auch Schubspannungen τ , welche die Querkraft zu übertragen haben. Die Annahmen der Navier'schen Biegelehre machen es unmöglich, die Schubspannungen „direkt“ (aus den Verzerrungen) zu ermitteln. Sie müssen „indirekt“ aus den bereits bestimmten Normalspannungen (durch eine Gleichgewichtsbedingung) berechnet werden."

2.2 Schwierigkeiten bei der experimentellen Ermittlung der Schubfestigkeit

2.2.1 Bruchart

Es besteht die Gefahr, dass bei zu grosser Spannweite oder zu geringer Biegefestigkeit nicht Schubbrüche, sondern Biegebrüche auftreten. Durch die Wahl eines geeigneten Verhältnisses der Spannweite zur Trägerhöhe (ℓ/h) lassen sich Biegebrüche meist vermeiden, insbesondere durch Ausbildung der Träger mit angepasster Sortierung der Zuglamellen, sowie Ausschluss von Keilzinkenstössen im hochbeanspruchten Mittelbereich.

Anzustreben ist – um der Annahme eines schlanken Stabes zu entsprechen – ein möglichst hohes Verhältnis ℓ/h . Bei Fichten-BSH – und mittlerer Belastung – sind ℓ/h -Werte um 5 bis 6 knapp noch möglich; bei Laubholz-BSH liegen diese Werte jedoch tiefer ($\ell/h \approx 4$).

2.2.2 Krafteinleitung (Prüflast und Auflager-Reaktionskräfte)

Nach dem Prinzip von St. Vénant gelten die einfachen Spannungsformeln der Festigkeitslehre nur in hinreichendem Abstand von der Lasteinleitung, in der Abb. 4 grün markiert.

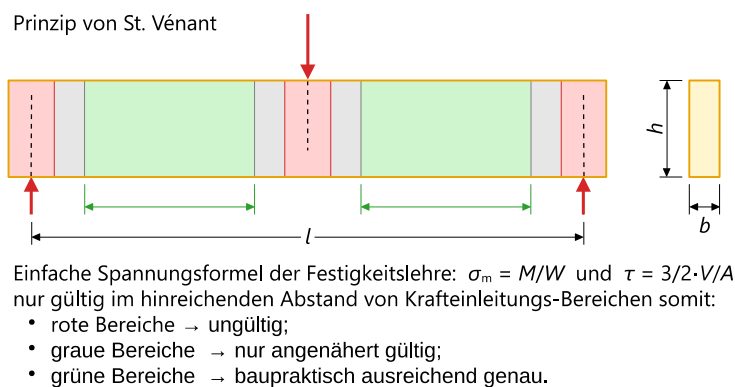


Abb. 4: Prinzip von St. Vénant

Die geringe Belastbarkeit des Holzes auf Querdruck führt zu übermässig grossen Lagerflächen. Bei den vorhandenen kleinen ℓ/h -Verhältnissen führt dies zu einer wesentlichen Verminderung der Grösse der Schubfelder. Durch eine Krafteinleitung, die einen ähnlichen Verlauf aufweist wie die Schubkräfte im ungestörten Bereich, lässt sich der gestörte Bereich klein halten bzw. die Grösse der Schubzone maximieren. Deshalb sollte die Krafteinleitung mittels eingeklebten Stahlstäbe erfolgen. Wie Versuche zeigten, lassen sich die erforderlichen Kräfte in Fichten-BSH problemlos einleiten; bei Laubholz-BSH – und entsprechend höheren Kräften – können allerdings Probleme auftreten.

2.2.3 Unterschiede in der Belastung bei Versuch und in der Bau-Praxis

In der Praxis liegt in den überwiegenden Fällen eine verteilte Lasteinleitung vor, während im Versuch eine bzw. zwei konzentrierte Lasten eingeführt werden. Der Vorteil liegt – für den Versuch – darin, dass die Querkraft über das gesamte Schubfeld konstant bleibt. Dies ermöglicht einerseits eine klarere Zuordnung der Werte zur Grösse des Schubfeldes und andererseits die einfache und zuverlässige Erfassung des Schubmoduls mittels Messung der Schiebungen.

2.3 Ausbildung der Prüfkörper

2.3.1 Werkseitige Vorgabe

Für die Vorversuche standen zur Verfügung – aus den „unbeschädigten“ Seitenbereichen von an der Empa im Rahmen des AP-Holz-Projekts durchgeführten Biegeversuchen – 3 Trägerabschnitte Buchen-BSH der Festigkeitsklasse GL 48c mit Querschnitt 120 mm / 600 mm und einer Länge von 1.90 m. Diese Abschnitte wiesen – zumindest optisch – keine Schädigungen auf. Durch Längsauftrennen und zusätzliche Anordnung von Aussenlamellen aus Buchen-Furnierschichtholz (BauBuche) konnten 4 Prüfkörper mit unterschiedlicher Höhe hergestellt werden.

2.3.2 Querschnittsaufbau

Der Aufbau der 4 Prüfkörper ist in der Abb. 5 dargestellt. Der Kern bestand aus Buchen-BSH der Festigkeitsklasse GL 48c und war somit gemischt aus Lamellen der Festigkeitsklassen T42 und T24 hergestellt worden. Die Abb. 6 zeigt die 3 grösseren Querschnitte. Deutlich erkennbar sind die Aussenlamellen aus Buchen-Furnierschichtholz (BauBuche).

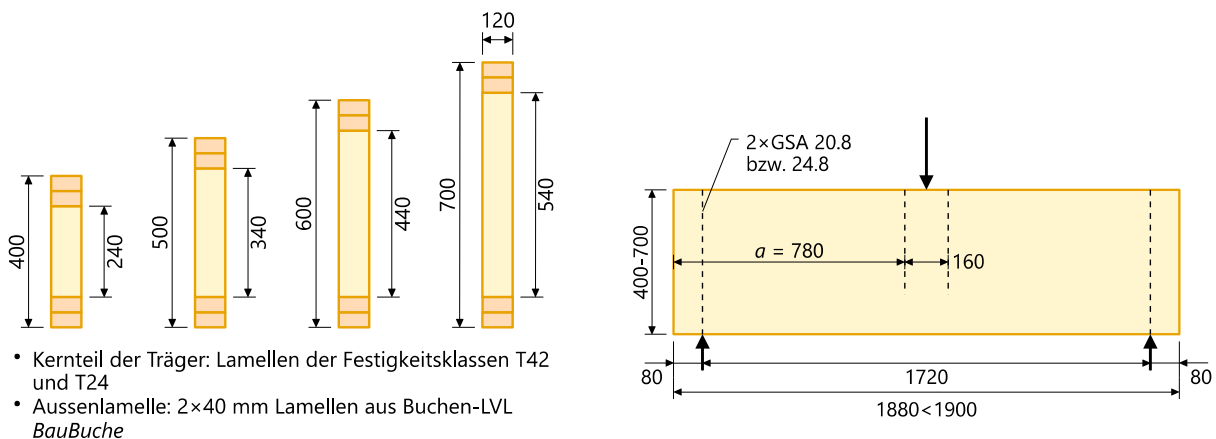


Abb. 5: Geometrische Abmessungen und Aufbauten der Prüfkörper für die Vorversuche.



Abb. 6: In den Vorversuchen geprüfte Träger mit den Querschnittsabmessungen 120/500, 120/600 und 120/700. Die Kerne bestehen aus Buchen-BSH der Festigkeitsklasse GL 48c und die Randzonen aus Buchen-Furnierschichtholz (BauBuche).

2.3.3 Ausbildung der Krafteinleitungen

Angestrebt wurde eine möglichst gleichmässige Einleitung der Kraft über die Höhe und die Querschnittsbreite. Dies wurde ermöglicht durch „steife“ eingeklebte Gewindestangen aus einem hochfesten Stahl. Da hier eine Druckkrafteinleitung erfolgt, sind grössere Beanspruchungen bis zum Erreichen der Stauchgrenze des Stahles möglich. Dies bedingt jedoch eine ausreichende Verankerungslänge, vorzugsweise die maximal mögliche (Abb. 7):

- im Träger-Endbereich: über die gesamte Höhe verlaufend;
- im Träger- Mittelbereich: Höhe – 100 mm zur Verhinderung einer Schwächung des Zuggurtes und damit einer Reduktion des Biegetragwiderstands.

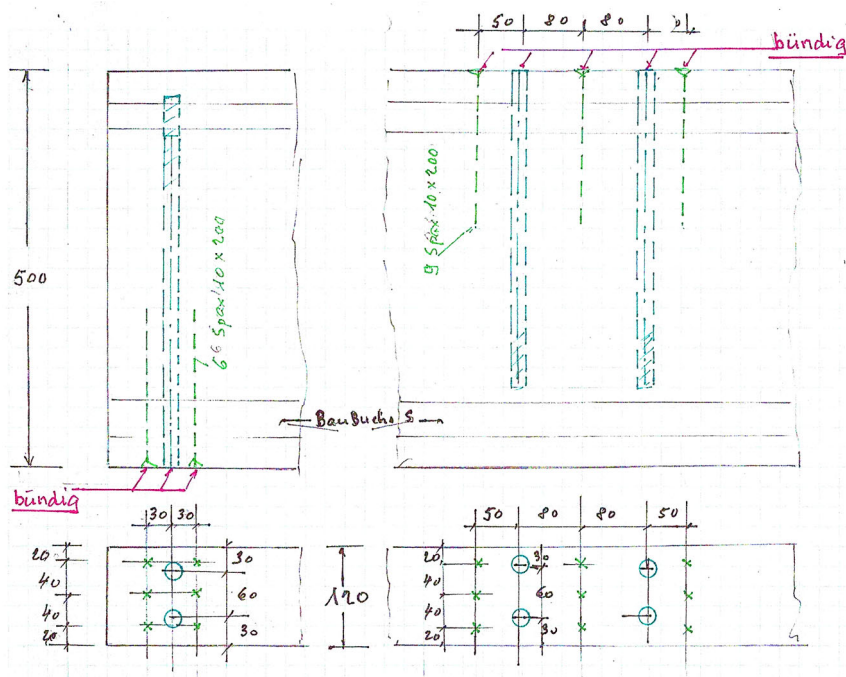


Abb. 7: Typische Ausbildung der Krafteinleitungen mittels GSA 20.8 und zusätzlicher Vollgewindeschrauben, gezeichnet für $h = 500$ mm. Analoge Ausbildung für die anderen Höhen.

2.3.4 Abmessungen der Schubfelder

Aufgrund der Einschränkungen beim Ausgangsmaterial zur Herstellung der Prüfkörper (siehe Abschnitt 2.3.1), wiesen die Schubfelder die Abmessungen gemäss Tabelle 1 auf.

Tabelle 1: Geometrische Abmessungen der Träger und der Schubfelder

Prüfkörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe h [mm]	Länge Schubfeld a [mm]	$\alpha = \frac{a}{h}$
1	1'900	120	400	780	1.95
2			500		1.56
3			600		1.30
4			700		1.11

2.4 Versuchsaufbau und Messungen

Der Versuchsaufbau ist am Beispiel des Prüfkörpers mit einer Trägerhöhe von $h = 400$ mm in der Abb. 8 dargestellt. Bei der kleinsten Trägerhöhe waren grosse Aufständigung der Lager erforderlich, welche bei den Versuchen an den Trägern mit grössere Höhen reduziert werden konnten. Die Aufständigung der Lager ermöglichte es, die Krafteinleitung im Mittelbereich unverändert zu lassen. Pro Hängestangenpaar konnten rund 320 kN eingeleitet werden, total

maximal 950 kN. Der Prüfkörper ist an 4 Stellen seitlich stabilisiert (Stahlrahmen mit Führungen). Die Lagerung ist beidseitig gelenkig und längsbeweglich (Gleitlager). Die Abb. 9 zeigt einen der höheren Prüfkörper. Hier ist auch der Messaufbau sehr gut erkennbar.

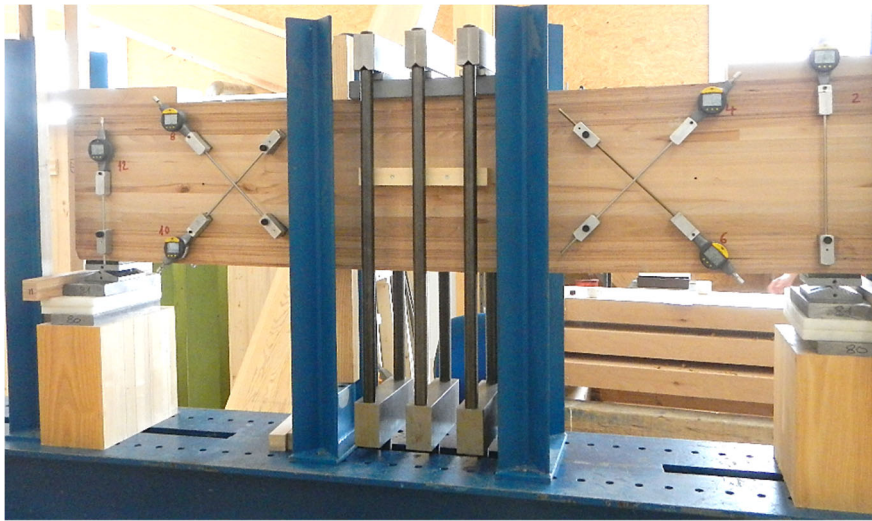


Abb. 8: Prüfaufbau bei der neuen Holzbau AG: 400 mm hoher und 1.90 m langer Träger als einfacher Balken gelagert und mittig mit einer Einzellast (eingeleitet durch 3 Zugstangenpaare) belastet. Die vertikalen blauen Stahlprofile verhindern ein seitliches Ausweichen der Trägers.



Abb. 9: Einer der höheren Träger im Prüfstand. Gut erkennbar sind die gekreuzt angeordneten Messsysteme zur Messung der Schubverzerrungen.

Die Schubverzerrungen wurden jeweils in Feldmitte in einem Quadrat mit Seitenlänge ℓ (meist zu $h/2$ festgelegt) über die Längenänderungen der Diagonalen erfasst. Im Träger treten neben Biege- und Schubbeanspruchungen noch unbekannte Torsionsbeanspruchungen auf; dies bedingt durch die vorhandenen unbestimmten Lagerungsbedingungen. Aus diesem Grunde müssen die Diagonalverformungen sowohl auf der Vorder- als auch auf der Rückseite erfasst und anschliessend jeweils die Mittelwerte bezogen auf die Mittelebene ermittelt werden. Diese Mittelwerte sind dann als Basiswerte für die Bestimmung des Schubmoduls zu verwenden.

2.5 Bestimmung des Schubmoduls

Der Schubmodul kann, ausgehend von den bekannten Beziehungen zwischen Schiebung und Schubmodul, direkt aus den Längenänderungen der Diagonalen erfasst werden.

2.5.1 Längenänderung der Diagonalen infolge der Schiebung

Aufgrund einer Schubbeanspruchung stellen sich im Träger Verschiebungen w_v ein, welche zu Längenänderungen in den Diagonalen führen (Abb. 10).

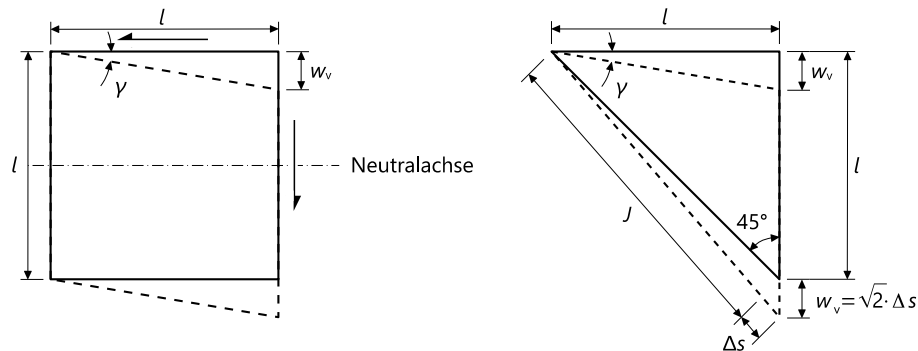


Abb. 10: Messkreuz zur Bestimmung des Schubmoduls aus den Längenänderungen Δs in den Diagonalen, welche sich aus einer durch eine Schubbeanspruchung bedingte Verschiebung w_v ergeben.

Unter der Voraussetzung, dass die Seitenlängen ℓ des Quadrats unverändert bleiben und die Verschiebung w_v sehr klein sind im Vergleich zu ℓ , kann man aus den Absolut-Werten der gemessenen Verlängerungen bzw. Verkürzungen der Diagonalen Δs den Schubmodul wie folgt bestimmen:

$$\gamma = \frac{w_v}{\ell} = \frac{\sqrt{2} \cdot \Delta s}{\ell} \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (10)$$

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\ell}{\sqrt{2} \cdot \Delta s} \cdot \tau \quad (11)$$

Analog dem Biege-E-Modul sucht man für die Messung eine Zone, die nicht durch andere Baustoffeigenschaften „gestört“ wird und grösste Verzerrungen aufweist; für den Biege-E-Modul also eine sogenannte querkraftfreie Zone (mittlerer Bereich bei einer Vierpunktbelastung); für den Schubmodul im Bereich, wo die Querkraft möglichst ungestört wirkt und um die Neutralachse.

2.5.2 Einfluss einer Biegebeanspruchung auf die Verzerrungen

In der Abb. 11 ist die Situation dargestellt, in der sich in den Diagonalen Längenänderungen infolge einer Biegeverformung einstellen.

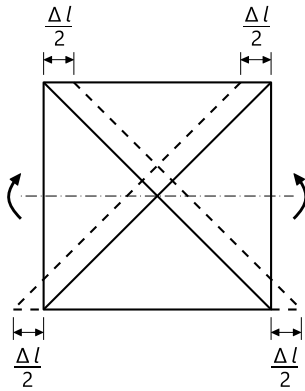


Abb. 11: Längenänderungen in den Diagonalen infolge einer Biegeverformung

Falls die Längenänderungen Δl auf der Zug- und der Druckseite identisch sind (was der Fall ist, wenn sich das Messkreuz in einer Lage symmetrisch oberhalb und unterhalb zur Neutralachse befindet), ergeben sich insgesamt keine Veränderungen der Diagonalenlängen.

Zu beachten ist, dass der Messbereich symmetrisch zur Neutralachse angeordnet wird; dadurch werden die Biegeverformungen bezüglich der Diagonalen kompensiert. Weiter ist die ungleichmassige (parabolische) Verteilung der Schubspannungen und somit auch der Schiebungen über die Höhe des Querschnittes (siehe Abb. 12) zu beachten.

2.5.3 Praktisches Vorgehen

Ausgehend vom Verlauf der Schubspannungen wird für den Messbereich die mittlere Schubspannung $\tau_{\text{mean, Messbereich}}$ ermittelt und der gemessenen Schiebung γ_{Messung} gegenübergestellt. Mittels der folgenden Beziehung kann daraus der Schubmodul G ermittelt werden:

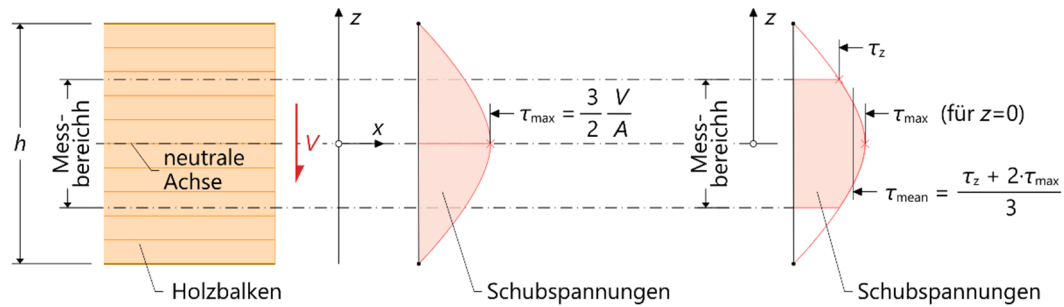
$$\gamma_{\text{Messung}} = \frac{w_v}{\ell} = \frac{\tau_{\text{mean, Messbereich}}}{G} \quad (12)$$

Bezüglich der Berechnung von $\tau_{\text{mean, Messbereich}}$ kann unterschiedlich vorgegangen werden. An Stelle eines parabolischen Verlaufes innerhalb des Messbereiches wird – oftmals vereinfachend – einen trapezförmigen Verlauf angenommen. Dies führt zu einer Überschätzung des Schubmoduls. Für einen Rechteckquerschnitt mit der Fläche $b \cdot h = A$ kann der parabolische Verlauf der Schubspannungen gemäss der klassischen Biegetheorie mittels folgender Formel berechnet werden:

$$\tau = \frac{V \cdot S}{I \cdot b} \quad (13)$$

mit:

τ	Schubspannung
V	Querkraft
S	Statisches Moment
I	Flächenträgheitsmoment
b	Breite



Die Schiebungen sind proportional zur Schubbeanspruchung. Über den Messbereich ergibt sich eine mittlere Schiebung entsprechend der mittleren Schubbeanspruchung τ_{mean} .

Da der Verlauf der Schubspannungen parabolförmig ist, muss der Mittelwert mit der Parabelformel ermittelt werden. Bei Anwendung der Trapezformel ergibt sich eine ungenaue Erfassung (Überschätzung des Schubmoduls)

Abb. 12: Verlauf der Schubspannungen über einen Rechteckquerschnitt.

3 Versuchsergebnisse

3.1 Prüfkörper mit einer Trägerhöhe von $h = 400$ mm

Die Prüfung wurde am 05.04.2019 erfolgreich durchgeführt. Zusätzlich zur Schubfestigkeit wurden die Schubmodule der beiden Felder, sowie Verformungen der Krafteinleitung an beiden Auflagern gemessen. Diese, da versuchstechnisch bedingt mit geringer Aussagekraft, werden nachstehend nicht mehr weiter betrachtet.

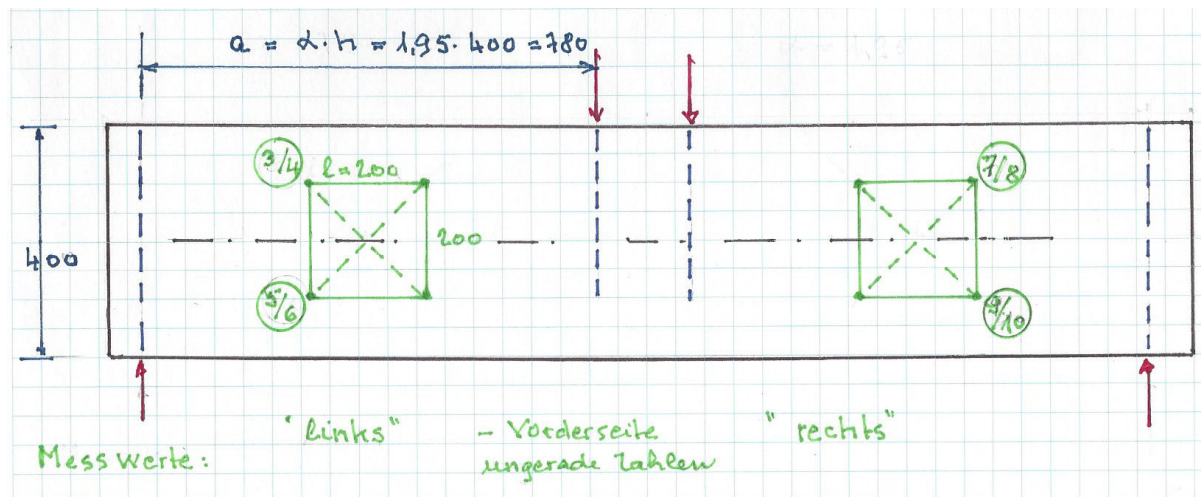


Abb. 13: Anordnung der Messkreuze beim Prüfkörper mit einer Höhe von 400 mm.

3.1.1 Schubverzerrungen in den Feldern

Die Schubverzerrungen in den Feldern wurden beidseitig in einem quadratischen Feld mit Seitenlänge $\ell = 200$ mm $= h/2$ gemessen (Abb. 13). Das Messfeld war symmetrisch zur Neutralachse angeordnet, so dass der Einfluss von Biegeverformungen "theoretisch" ausgeschaltet ist. Man muss von "theoretisch" sprechen, weil die allgemeine Balkentheorie nur gültig ist für Prüfkörper mit grosser Spannweite im Vergleich zur Höhe.

Die Diagonalverformungen weisen unterschiedliches Vorzeichen auf: Druck – positiv; Zug – negativ. Die absoluten Werte sind nicht identisch, sondern sowohl vom Verhältnis α , von der Art und Ausbildung der Krafteinleitungen, als auch von der Höhe der Schubbeanspruchung beeinflusst. Die Messergebnisse sind in der Abb. 14 dargestellt.

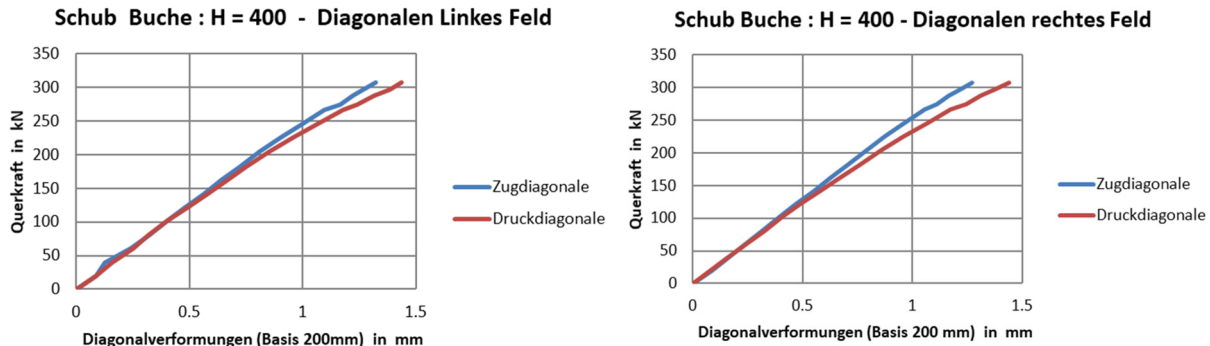


Abb. 14: Prüfkörper mit $h = 400$ mm: Diagonalverformungen in Funktion der Querkraft.

3.1.2 Schubmodul

Diese kann aus dem absoluten mittleren Wert der Diagonalverformung (Abb. 15) ermittelt werden. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass ab einer Querkraft von rund 150 kN ein Abflachen der Last-Verformungskurve bzw. eine Zunahme der Verformungen erfolgte. Bei einer Querkraft von $V \approx 300$ kN wurden die Messuhren entfernt (Vermeidung von Defekten an der Messeinrichtung infolge eines schlagartigen Schubbruches, ohne erkennbare Vorankündigung). Der Bruch trat allerdings erst bei einer Querkraft von $F_v = 362$ kN ein, was einer sehr hohen Schubfestigkeit von $f_v = 11.3$ N/mm² entspricht.

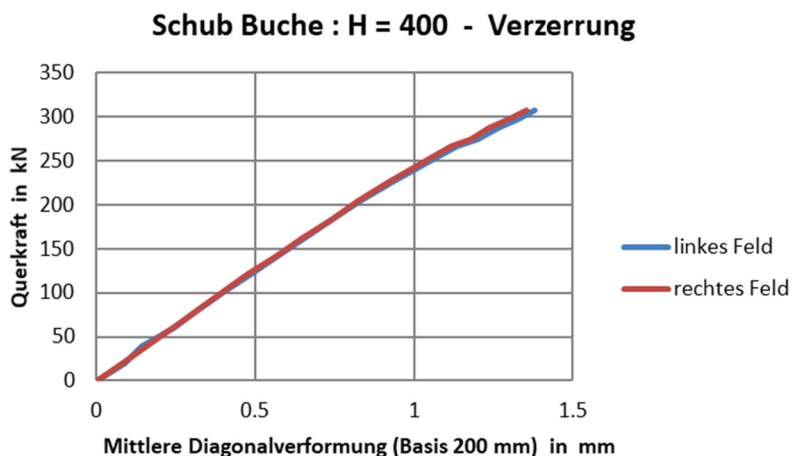


Abb. 15: Prüfkörper mit $h = 400$ mm: Mittlere Diagonalverformung in Funktion der Querkraft

Die Auswertung für die beiden Kraftbereiche 0 – 150 kN und 200 – 350 kN (Abb. 16) zeigt deutliche Unterschiede bezüglich Schubsteifigkeit auf. Dies lässt sich nur begründen durch Änderungen im Materialverhalten: grössere Nachgiebigkeit der Zugdiagonale (infolge Rissbildung) und gleichzeitiger Umlagerung auf Druck (mit entsprechender Zunahme der Druckverformungen).

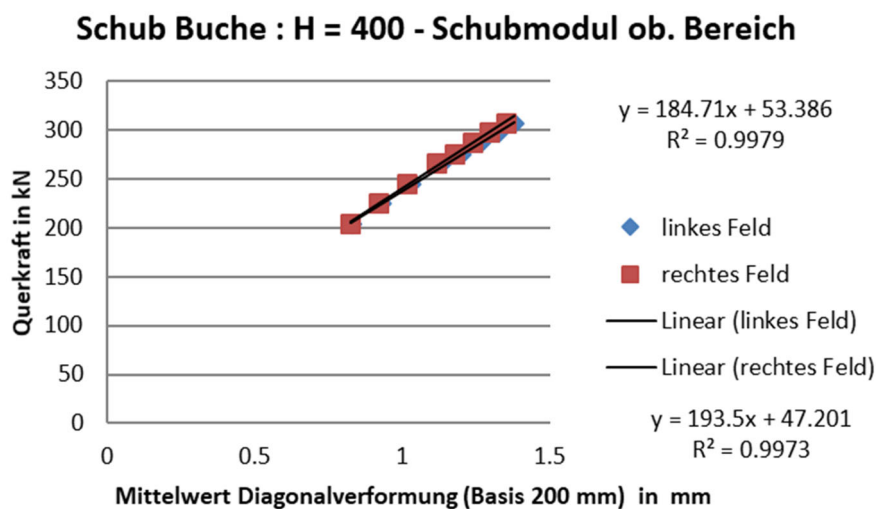
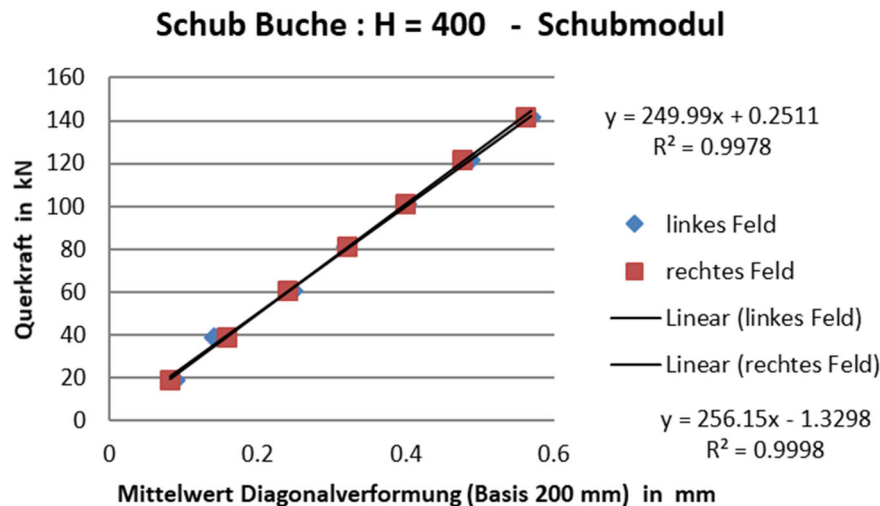


Abb. 16: Prüfkörper mit $h = 400$ mm: Mittlere Diagonalverformung in Funktion der Querkraft für den Kraftbereich 0 – 150 kN (oben) und 200 – 350 kN (unten).

Aus den Messergebnissen kann der Schubmodul wie folgt ermittelt werden:

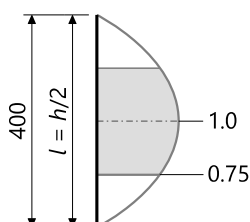
$$G = \frac{\ell}{\sqrt{2} \cdot \Delta s} \cdot \tau_{mean} \quad (14)$$

Steigungen der Regressionsgeraden in der Abb. 16, oben (d. h. im elastischen Bereich der Last-Verformungskurve):

$$\text{Linkes Feld: } y = 246.99 \cdot x \quad (15)$$

$$\text{Rechtes Feld: } y = 256.15 \cdot x \quad (16)$$

Mit $\Delta s = x$ und einer Querkraft von $y = 100$ kN ergibt sich:



$$\Delta \tau_{\max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{100 \cdot 10^3}{120 \cdot 400} = 3.125 \text{ N/mm}^2 \quad (17)$$

$$\Delta \tau_{\text{mean}} = \frac{0.75 + 2}{3} \cdot \Delta \tau_{\max} = 2.865 \text{ N/mm}^2 \quad (18)$$

Die Schubmoduln G_{links} und G_{rechts} werden mit der Diagonalverformung Δs infolge der Querkraft $y = 100 \text{ kN}$, d.h. mit

$$\Delta s_{links} = x_{links} = \frac{100}{249.99} = 0.400 \text{ mm} \quad (19)$$

$$\Delta s_{rechts} = x_{rechts} = \frac{100}{256.15} = 0.391 \text{ mm} \quad (20)$$

errechnet zu

$$G_{links} = \frac{200}{\sqrt{2} \cdot 0.400} \cdot 2.865 = 1'013 \text{ N/mm}^2 \quad (21)$$

$$G_{rechts} = \frac{200}{\sqrt{2} \cdot 0.391} \cdot 2.865 = 1'036 \text{ N/mm}^2 \quad (22)$$

was einen mittleren Schubmodul ergibt von:

$$G \approx 1'025 \text{ N/mm}^2 \quad (23)$$

3.2 Prüfkörper mit einer Trägerhöhe von $h = 500 \text{ mm}$

Die Prüfung wurde am 10.04.2019 erfolgreich durchgeführt. Die Traglast lag mit $F_v = 292 \text{ kN}$ tief, ja tiefer als für den Prüfkörper $h = 400 \text{ mm}$. Der Grund dafür war eine Schwäche der Klebfuge auf halber Trägerhöhe, d. h. im Bereich mit der höchsten Beanspruchung in Kombination mit einer ungeeigneten (d.h. nicht der Ziel-Festigkeitsklasse entsprechenden) Brettlamelle. Abb. 17 zeigt das Bruchbild.



Abb. 17: Prüfkörper mit $h = 500 \text{ mm}$: Bruch bei einer vergleichsweise niedrigen Kraft von 583 kN infolge geschwächter Klebfuge und nicht der Ziel-Festigkeitsklasse entsprechenden Brettlamelle auf halber Trägerhöhe.

Der Bruchwert ist unerwartet tief und entspricht einer Schubfestigkeit von lediglich 7.3 N/mm^2 . (Hinweis: Die neue Holzbau AG setzt für die Bemessungen Buchen-BSH einen charakteristischen Wert der Schubfestigkeit von 4.5 N/mm^2 an, was rund 60% des im vorliegenden Versuch erzielten Werts entspricht.) Das elastische Verhalten im Messbereich (bis rund $F_v = 200 \text{ kN}$, Abb. 18) zeigte kaum Unterschiede zum Prüfkörper mit einer Höhe von 400 mm .

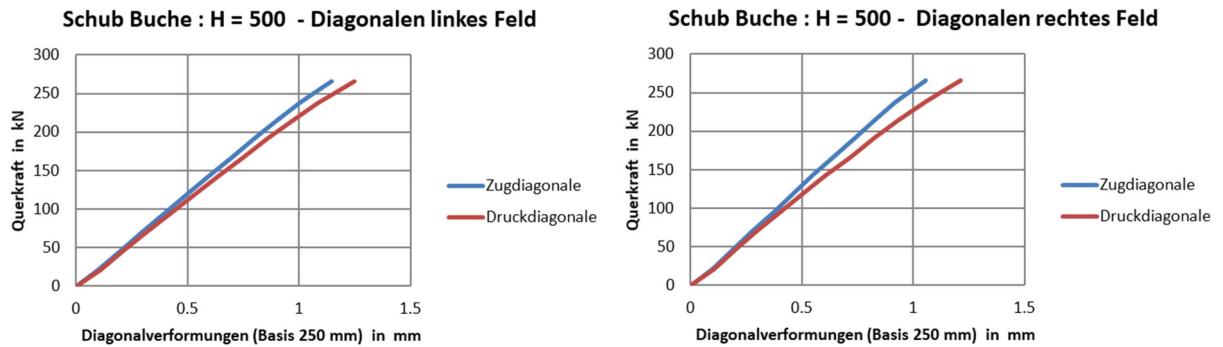


Abb. 18: Prüfkörper mit $h = 500$ mm: Diagonalverformungen in Funktion der Querkraft.

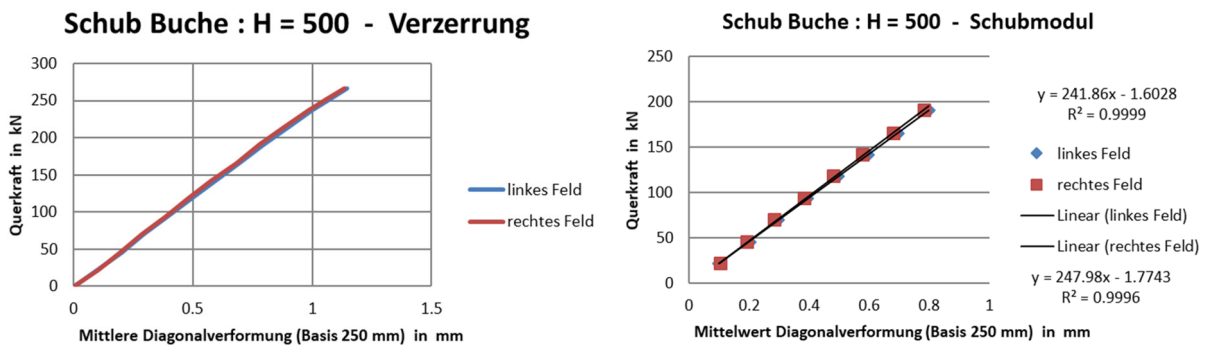


Abb. 19: Prüfkörper mit $h = 500$ mm: Verzerrung in Funktion der Querkraft (links) und Regression mit linearer Funktion im elastischen Bereich zur Ermittlung des Schubmoduls (rechts).

Die aus den Schubverzerrungen (Abb. 19, links) errechneten Schubmodule links und rechts (Abb. 19, rechts) sind weitgehend identisch und betragen $G_{\text{links}} \approx G_{\text{rechts}} = 1'140 \text{ N/mm}^2$.

3.3 Prüfkörper mit einer Trägerhöhe von $h = 600$ mm

Die Prüfung wurde am 11.04.2019 erfolgreich durchgeführt. Die Traglast betrug $F_v = 407 \text{ kN}$ was einer Schubfestigkeit von $f_v = 8.5 \text{ N/mm}^2$ entspricht. Die Ergebnisse der Messungen und die Auswertung sind nachfolgend in graphischer Form dargestellt.

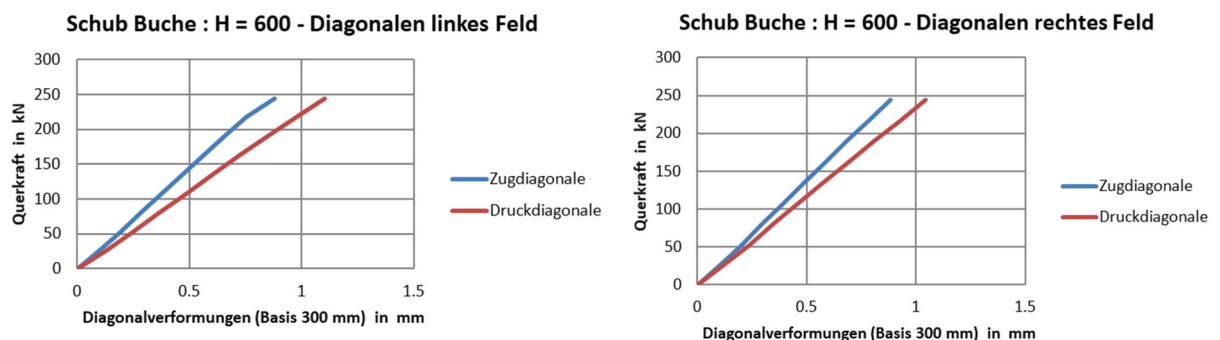


Abb. 20: Prüfkörper mit $h = 600$ mm: Diagonalverformungen in Funktion der Querkraft.

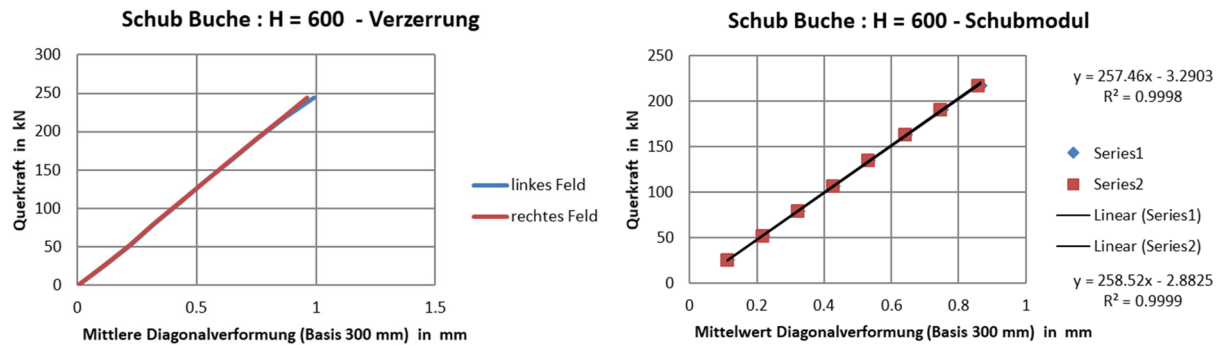


Abb. 21: Prüfkörper mit $h = 600$ mm: Verzerrung in Funktion der Querkraft (links) und Regression mit linearer Funktion im elastischen Bereich zur Ermittlung des Schubmoduls (rechts).

Die Schubmoduln wurden errechnet zu $G_{\text{links}} = 942 \text{ N/mm}^2$ und $G_{\text{rechts}} = 1'047 \text{ N/mm}^2$.

3.4 Prüfkörper mit einer Trägerhöhe von $h = 700$ mm

Die Prüfung wurde am 11.04.2019 durchgeführt. Ein Schubbruch konnte nicht erzeugt werden, da die Kapazität der Prüfeinrichtung der neuen Holzbau AG mit einer Maximalkraft von 950 kN nicht ausreichte. Der Versuch wurde bei einer Kraft von $F_v = 476$ kN abgebrochen. Dies entspricht einer Schubspannung von $f_v = 8.5 \text{ N/mm}^2$ und die Schubfestigkeit des Trägers lag also oberhalb dieses Werts.

Es gilt zu beachten, dass, in Abweichung zu den bisherigen Prüfungen, die Messlänge ℓ hier nicht $h/2 = 350$ mm betrug, sondern zu 300 mm festgelegt. Dies war bedingt durch die beschränkten Messlängen der vorhandenen Messeinrichtungen. Die Verformungskurven sind somit nicht direkt mit den Versuchen an den Trägern mit Höhen 400 mm, 500 mm und 600 mm vergleichbar. Die resultierenden Schubmodule sind allerdings direkt vergleichbar, da die mittleren Schubspannungen korrekt ermittelt wurden. Die Ergebnisse der Messungen und die Auswertung sind nachfolgend in graphischer Form dargestellt.

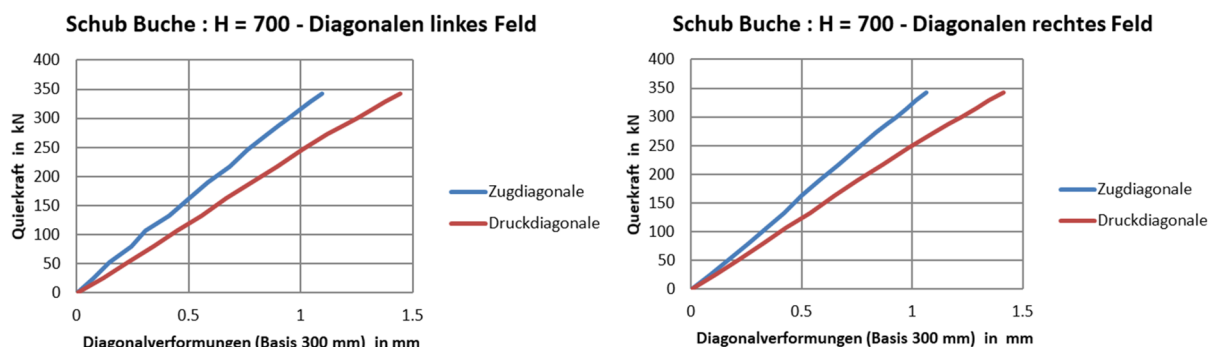


Abb. 22: Prüfkörper mit $h = 700$ mm: Diagonalverformungen in Funktion der Querkraft.

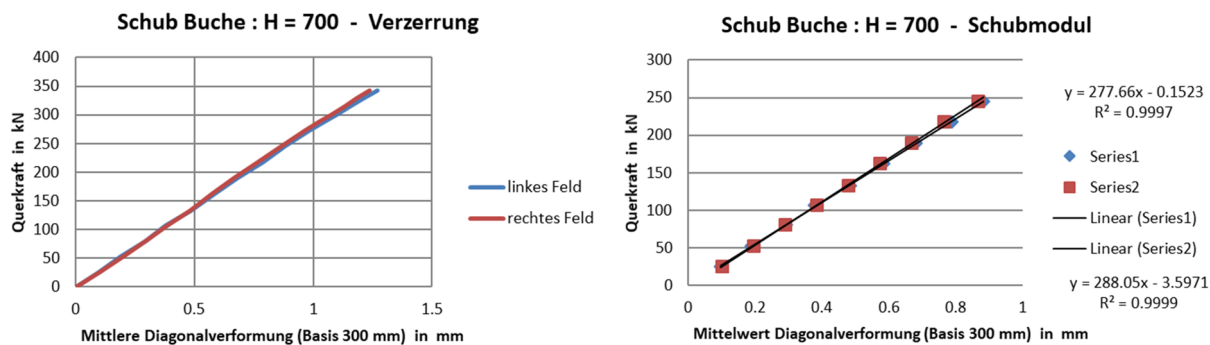


Abb. 23: Prüfkörper mit $h = 700$ mm: Verzerrung in Funktion der Querkraft (links) und Regression mit linearer Funktion im elastischen Bereich zur Ermittlung des Schubmoduls (rechts).

Die Schubmoduln wurden errechnet zu $G_{links} = 982 \text{ N/mm}^2$ und $G_{rechts} = 1'024 \text{ N/mm}^2$.

4 Folgerungen aus den Versuchen

4.1 Krafteinleitungen

Dank einer optimierten Ausbildung der Krafteinleitungen ist die Prüfung von rechteckförmigen Trägern auch für Laubholz-BSH möglich. Die Prüfanlage der neuen Holzbau AG ermöglicht die Einleitung von Kräften bis zu 950 kN. Die weiteren, im Rahmen des Projekts geplanten Versuche an Eschen-BSH wurden an der Empa durchgeführt. Dabei wurden Leistungen der Krafteinleitungen mit dem GSA®-System von bis zu ca. 1'400 kN – ohne erkennbare Schädigungen – erreicht.

Wenn man, mit dem Ziel die Schwächung des Prüfräger-Querschnitts durch die Gewindestangen in Grenzen zu halten, sich auf eingeklebte Gewindestangen mit Maximal-Durchmessern von 20 mm beschränkt, sind Prüfkörperbreiten von 120 mm für Laubholz-BSH-Laubholz optimal. Bei der Prüfung von Nadelholz-BSH sind etwas grössere Breiten von ca. 150 bis 160 mm anzustreben.

4.2 Schubfestigkeit

Die in den Vorversuchen erzielten Schubfestigkeiten sind in der Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Schubfestigkeiten der 4 in den Vorversuchen geprüften Buchen-BSH-Träger

Prüfkörper mit $h =$	Schubfestigkeit	Mittelwert ²⁾	Standardabweichung ²⁾	Variationskoeffizient ²⁾
400	11.3 N/mm ²			
500	7.3 N/mm ²	9.0 N/mm ²	2.1 N/mm ²	0.23
600	8.5 N/mm ²			
700 ¹⁾	> 8.5 N/mm ²			

¹⁾ Der Prüfkörper 4 konnte wegen Leistungsbeschränkung der Prüfeinrichtung nicht bis zum Bruch belastet werden.

²⁾ Prüfkörper 1 – 3

4.3 Schubmodul

Erwartungsgemäss hat die unterschiedliche Trägerhöhe keinen Einfluss auf die Grösse des Schubmoduls. Die Schubwerte variieren (leicht) innerhalb desselben Trägers (Messungen im linken und rechten Schubfeld). Etwas grössere Unterschiede traten zwischen den einzelnen Trägern auf. Die in den Vorversuchen ermittelten Schubmoduln sind in der Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Schubmoduln der 4 in den Vorversuchen geprüften Buchen-BSH-Träger

Prüfkörper mit $h =$	Schubmodul	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
400	1'025 N/mm ²	1'041 N/mm ²	67.4 N/mm ²	0.06
500	1'140 N/mm ²			
600	995 N/mm ²			
700	1'003 N/mm ²			

Die Schubmodule für Buchen-BSH-Buche lagen im Bereich von $G \approx 1'000 - 1'100 \text{ N/mm}^2$.

4.4 Einfluss der Schubfeldlänge

Wie im Kapitel 1 erläutert wurde, sind grössere α -Werte anzustreben. Dies führt jedoch – besonders bei kleineren Trägerhöhen – zu grösseren Biegebeanspruchungen und damit zum Versagen der Prüfkörper auf Biegung statt auf Schub. Um Biegebrüche möglichst zu vermeiden, können hochfeste Randlamellen eingesetzt werden. In den hier beschriebenen Vorversuchen wurden jeweils 2 Randlamellen aus Buchen-Furnierschichtholz (BauBuche) angeordnet.

Die Prüfkörper mit hohen α -Werten zeigten weitgehend identische Diagonaldehnungen (Absolutwerte) auf Zug und auf Druck. Mit Abnahme der α -Werte nehmen die Druckdehnungen stärker zu, mit gleichzeitiger Abnahme der Zugdehnungen; die Abtragung der Kräfte erfolgt demnach stärker über die Druckdiagonale. Dies wird besonders deutlich aus dem Vergleich der Diagonalverformungen bei den Prüfkörpern mit der $h = 400 \text{ mm}$ ($\alpha = 1.95$) und der Höhe $h = 700 \text{ mm}$ ($\alpha = 1.11$).

Für den Referenzträger mit Höhe 600 mm, welcher die gleiche Bezugsgrösse wie für die Prüfung von Biegeträgern aufweist, erweist sich ein α -Wert von 1.60 als optimal. Mit $\alpha = 1.60$ werden bereits die Bedingung der klassischen Biegetheorie – schlanker Stab – erfüllt und dennoch erfolgt das Versagen noch als Schubbruch. Biegebrüche lassen sich weitgehend vermeiden durch eine sorgfältige Festigkeitssortierung der Randlamellen.

4.5 Traglast in Funktion der Trägerhöhe

In der Abb. 24 sind die auf die Prüfkörper aufgebrachten maximalen Lasten F in Funktion der Trägerhöhe h dargestellt. Die weiteren Abmessungen der Prüfkörper (Länge des Schubfeldes $a = 780 \text{ mm}$; Breite des Trägers $b = 120 \text{ mm}$) waren in den Versuchen konstant. Es kommt also nur die Höhe h als einzige Variable vor. Gesucht wird die maximal Last F in Funktion der variablen Grösse h :

$$F = f(h) \quad (24)$$

Für die Ermittlung des Grösseneinflusses liegen aus den Vorversuchen allerdings nur 4 Einzelwerte vor. Zudem lag kein einheitliches Prüfmaterial vor. Das Prüfmaterial stammt aus „unbeschädigten“ Teilen von anderweitigen Prüfungen, mit unterschiedlichem Aufbau des Kernes aus T24 und T42-Brettern. Somit sind grössere Abweichungen verständlich und da es sich um Einzelwerte (basierend jeweils auf einem einzigen Versuch pro Trägerhöhe) handelt, ist keine gesicherte Aussage möglich. Dennoch kann die im Abschnitt 4.3 der Einleitung formulierte Hypothese 1 (Ergeben sich für eine konstant gehaltene Schubfläche $A_{\text{shear}} = \text{konstant}$ identische Schubfestigkeiten?) verneint werden.

In der Abb. 24 und der Abb. 25 sind mögliche Zusammenhänge zwischen Traglast bzw. Schubfestigkeit und Trägerhöhe und entsprechende Ansätze zur Erfassung des Volumeneinflusses für die Trägerbreite $b = 120 \text{ mm}$ und die Schubfeld-Weite $a = 780 \text{ mm}$ – der Traglast bzw. der Schubfestigkeit dargestellt. Es muss dabei beachtet werden, dass der in den Graphiken eingetragene Schubspannungswert für die Trägerhöhe 700 mm nicht der Schubfestigkeit des Trägers entspricht, da er nicht bis zum Bruch belastet werden konnte. Es handelt sich um die im Versuch maximal erreichte Schubspannung.

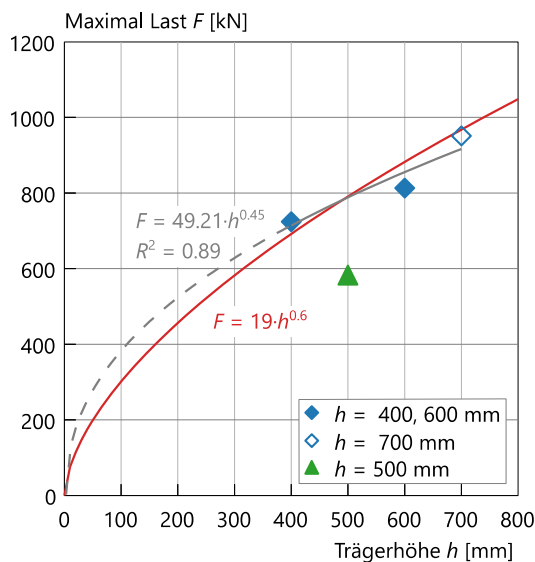


Abb. 24: Maximale Last F in Funktion der Trägerhöhe. Eingezeichnet sind die maximalen Lasten der 4 Prüfkörper und eine auf der Formel (25) basierende gefittete Funktion (rote Linie).

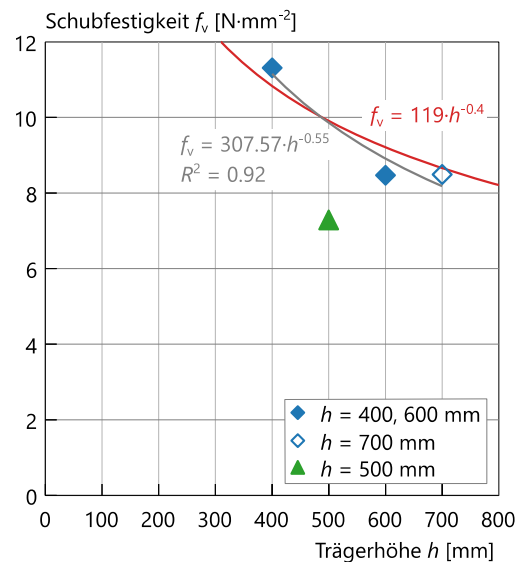


Abb. 25: Schubfestigkeit in Funktion der Trägerhöhe. Eingezeichnet sind die maximalen Schubspannungen, welche in den Versuche an den 4 Prüfkörpern erreicht wurden und eine auf der Formel (26) basierende gefittete Funktion (rote Linie).

Die Datenreihe 3 (Prüfkörper $h = 500 \text{ mm}$) ist wegen durch Vorschädigungen verursachtem zu tiefem Bruchwert als Ausreisser zu betrachten. In der Abb. 24 ist, als rote Kurve, ein möglicher Verlauf der maximalen Last F in Funktion der Trägerhöhe h , bei konstanter Länge a des Schubfeldes auf Basis der folgenden Funktion eingetragen:

$$F = 19 \cdot h^{0.6} \quad (25)$$

In der Abb. 25 ist, als rote Kurve, ein möglicher Verlauf der Schubfestigkeit f_v in Funktion der Trägerhöhe h , bei konstanter Länge a des Schubfeldes auf Basis der folgenden Funktion eingetragen:

$$f_v = 119 \cdot h^{-0.4} \quad (26)$$

Obwohl nur 2 Bruchwerte auf Schub vorliegen, kann auf Grund der Vorversuche vermutet werden, dass sich die Hypothese einer nur von der Scherlänge abhängigen Schubfestigkeit nicht aufrechterhalten lässt.

4.6 Fazit

Auf Basis der Vorversuche konnte gezeigt werden, dass:

- mittels eingeklebter Gewindestangen System GSA und geeigneter Auslegung (Stangendurchmesser, Anzahl der Stangen, Länge und Abstände) die erforderlichen hohen Kräfte für die Schubprüfung von Buchen-BSH-Buche erreicht werden können;
- bei konstanter Scherfläche die Traglast bzw. die Schubfestigkeit von der Trägerhöhe abhängig ist; die Exponenten β weisen eine Grössenordnung auf von $\beta \approx 0.6$ (Traglast in Funktion der Trägerhöhe) bzw. $\beta \approx -0.4$ (Schubfestigkeit in Funktion der Trägerhöhe).
- der Schubmodul von Buchen-BSH im Bereich von 1'000 - 1'100 N/mm² liegt;
- die Schubfestigkeiten von Buchen-BSH Werte von 9 N/mm² erreichten.

Die für die Vorversuche gesteckte Zielsetzung wurde somit erreicht.

Auf Grund der Erfahrungen in den Vorversuchen wird empfohlen, auf die Verwendung vorhandener Reststücke aus anderen Versuchen zu verzichten. Es könnten zwar Kosten bei der Produktion der Prüfkörper eingespart werden, Unsicherheiten bezüglich Zustand des Rohmaterials erschweren jedoch die Bewertung von in den Versuchen festgestellten Abweichungen und somit eine gesicherte Auswertung der Prüfwerte.

5 Literatur

1. Weibull, W., *A statistical theory of the strength of materials - The phenomenon of rupture in solids*. 1939, Stockholm, Sweden.
2. Steiger, R. and E. Gehri. *Paper CIB-W18 44-6-2: Interaction of shear stresses and stresses perpendicular to the grain*. in *Proceedings of CIB-W18 Meeting Forty-four*. 2011. Alghero, Italy.
3. Dubas, P., *Baustatik I*. 1983, Zürich: Institut für Baustatik und Stahlbau, ETH Zürich.

FESTLEGUNG DER SCHUBSTEI- FIGKEIT UND SCHUBFESTIG- KEIT VON TRÄGERN, INSB. AUS LAUBHOLZ-BSH

**Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz
Projekt 2019.10**

Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Wald
und
Konferenz für Wald, Wildtiere und Landschaft KWL

Schlussbericht

Teil 3

3-Punkt-Biegeversuche an Fichten-BSH

Thomas Strahm, René Steiger, Pedro Palma
Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen, 8600 Dübendorf

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	46
2	MATERIAL	46
3	DIMENSIONIERUNG DES PRÜFAUFBAUS	46
4	ABMESSUNGEN UND ANZAHL DER PRÜFKÖRPER	46
5	VERSTÄRKUNG DER KRAFTEINLEITUNGSZONEN DER PRÜFKÖRPER	49
6	VERSUCHE	50
6.1	VERSUCHSAUFBAU	50
6.2	MESSGRÖSSEN	50
6.3	BELASTUNGSPROGRAMM	51
7	ERGEBNISSE	51
7.1	BRUCHLASTEN UND VERSAGENSARTEN	51
7.2	SCHUBFESTIGKEIT	52
7.3	SCHUBMODULN	57
8	FAZIT	58

1 Einleitung

Neben der Hauptserie der Prüfkörper aus BSH Esche sind ergänzend 12 Prüfkörper aus BSH Fichte vorgesehen. Ziel ist es an «identischen» Prüfkörper jedoch in anderen Holzarten zu prüfen, ob der Grössen- Volumeneinfluss bei Schubbeanspruchung vergleichbar ist.

2 Material

Alle Fichten-BSH-Prüfkörper sind als kombinierte Träger der Festigkeitsklasse BSH GL 32c hergestellt worden. Das bedeutet, dass sowohl in der Druck- wie auch in der Zugzone jeweils T26 Lamellen, im Mittelbereich T14 Lamellen eingesetzt wurden. Die verwendeten T26 Lamellen stammen von der Sägerei Wyss in Büron (LU), die Mittellagen von verschiedenen Schweizer Sägern: Holz aus der Zentralschweiz (Wyss, Büron (LU)) und aus dem Simmental (Olwo, Erlenbach (BE)). Die unsortierten Bretter hatten eine Breite von 175 mm und wurden in der Sägerei auf eine Dicke von 44 mm vorgehobelt.

Da nur wenige Prüfkörper herzustellen waren, wurde versucht, im Kern die Lamellen so gut wie möglich zu homogenisieren. Allerdings war eine Sortierung nach der Schubfestigkeit nicht möglich, da es dazu keine Kriterien gibt. Die T14 Lamellen wurden mit dem Timbergrader sortiert und wiesen eine mittlere Qualität auf (E-Modul zwischen 9'000 – 13'000 N/mm²; mittlere Rohdichte zwischen 380 – 450 kg/m³).

Die Keilzinkenstösse wurden mit Henkel 1K-PUR Klebstoff Loctite HB S109 verklebt und die Flächenverklebung der Lamellen erfolgte mit Henkel 1K-Pur Klebstoff HB S309. Die Prüfkörper wiesen bei der Verklebung eine Holzfeuchte von ca. 12% auf.

3 Dimensionierung des Prüfaufbaus

Die Prüfeinrichtung sowie die Krafterleitungen wurden, unabhängig von der Prüfkörpergrösse, auf eine Schub-Bruchspannung von 4.5 N/mm² ausgelegt.

4 Abmessungen und Anzahl der Prüfkörper

Die Versuche wurden als 3-Punkt-Biegeversuche an 12 Fichten-BSH Trägern mit einer Breite von 160 mm und Höhen von 480, 600 und 800 mm durchgeführt. Der α -Wert (Verhältnis der Länge des Schubfeldes zur Trägerhöhe) betrug bei den Prüfkörpern FI-1.1, FI-2.1, FI-3.1 $\alpha = 1.6$. Bei den 600 mm hohen Prüfkörpern wurden zusätzlich Prüfkörper mit α -Werten von 1.2 (FI-2.2), 2.0 (FI-2.3) und 2.5 (FI-2.4) geprüft, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Geometrische Abmessungen der Träger und der Schubfelder

Prüfkörper		Balkenbreite	Balkenhöhe	Länge des Schubfeldes	Verhältnis $\alpha = L_v / h$	Fläche des Schubfeldes	Volumen des Schubfeldes
		b	h	L_v	α	A_{shear}	Vol_v
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm/mm]	[mm ²]	[m ³]
FI-1.1	GL 32c, 3x	160	480	768	1.6	122880	0.059
FI-2.1	GL 32c, 3x	160	600	960	1.6	153600	0.092
FI-3.1	GL 32c, 3x	160	800	1280	1.6	204800	0.164
FI-2.2	GL 32c, 1x	160	600	720	1.2	115200	0.069
FI-2.3	GL 32c, 1x	160	600	1200	2.0	192000	0.115
FI-2.4	GL 32c, 1x	160	600	1500	2.5	240000	0.144

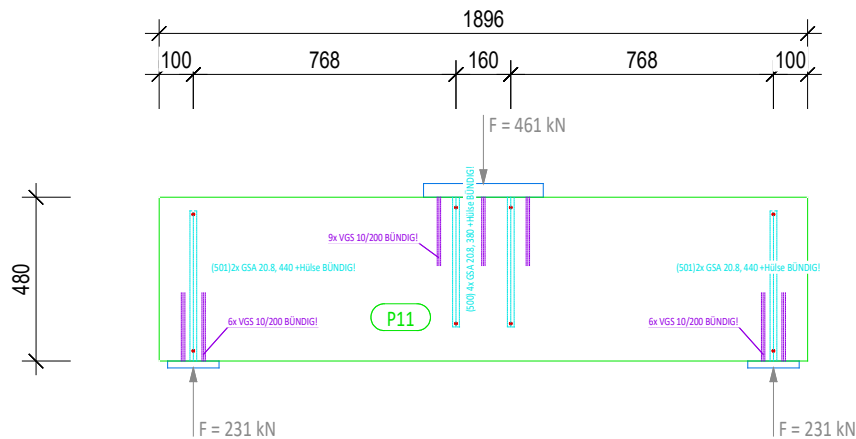


Abb. 1: Prüfkörper FI-1.1: Breite 160 mm, Höhe 480 mm, Länge 1896 mm, Spannweite 1696 mm. Es wurden 3 Prüfkörper dieses Typs geprüft.

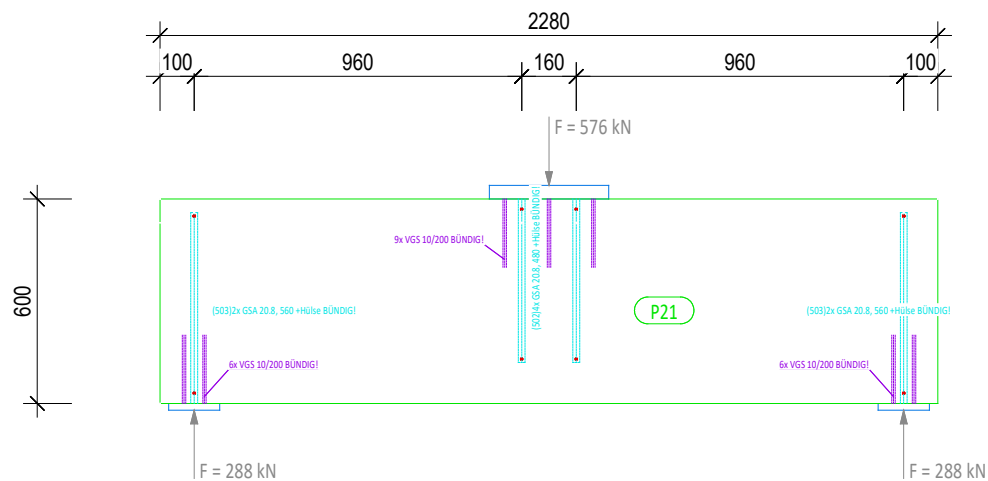


Abb. 2: Prüfkörper FI-2.1: Breite 160 mm, Höhe 600 mm, Länge 2280 mm, Spannweite 2080 mm. Es wurden 3 Prüfkörper dieses Typs geprüft.

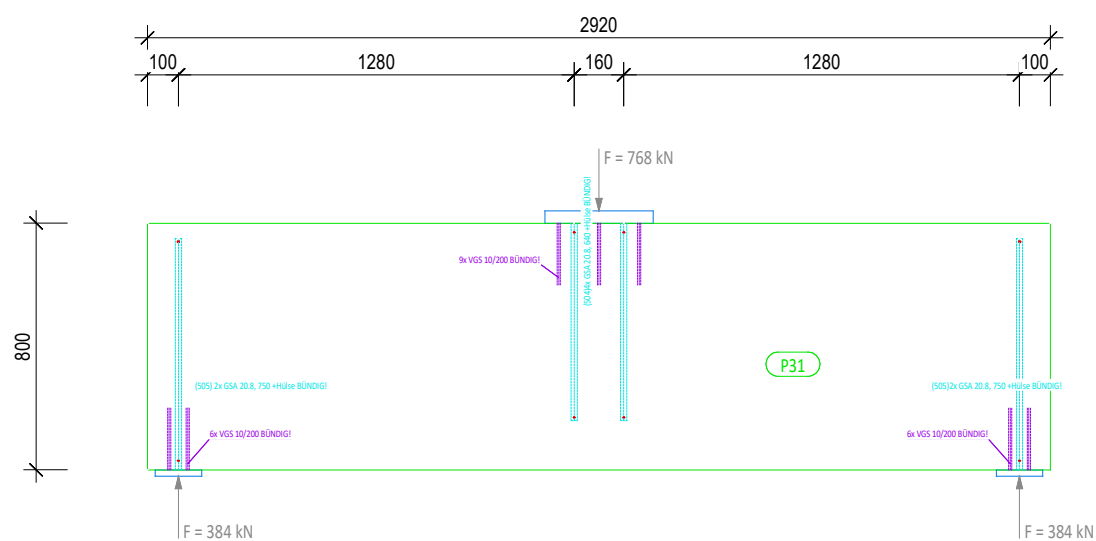


Abb. 3: Prüfkörper FI-3.1: Breite 160 mm, Höhe 800 mm, Länge 2920 mm, Spannweite 2720 mm. Es wurden 3 Prüfkörper dieses Typs geprüft.

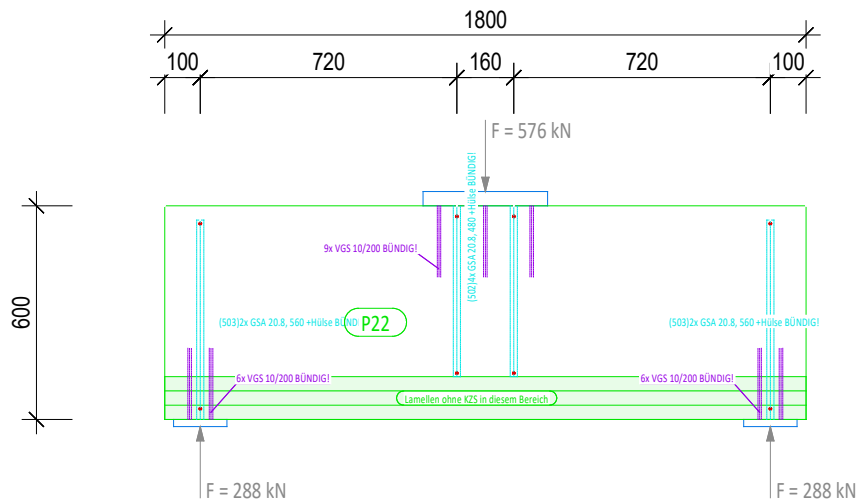


Abb. 4: Prüfkörper FI-2.2: Breite 160 mm, Höhe 600 mm, Länge 1800 mm, Spannweite 1600 mm. Es wurde 1 Prüfkörper dieses Typs geprüft.

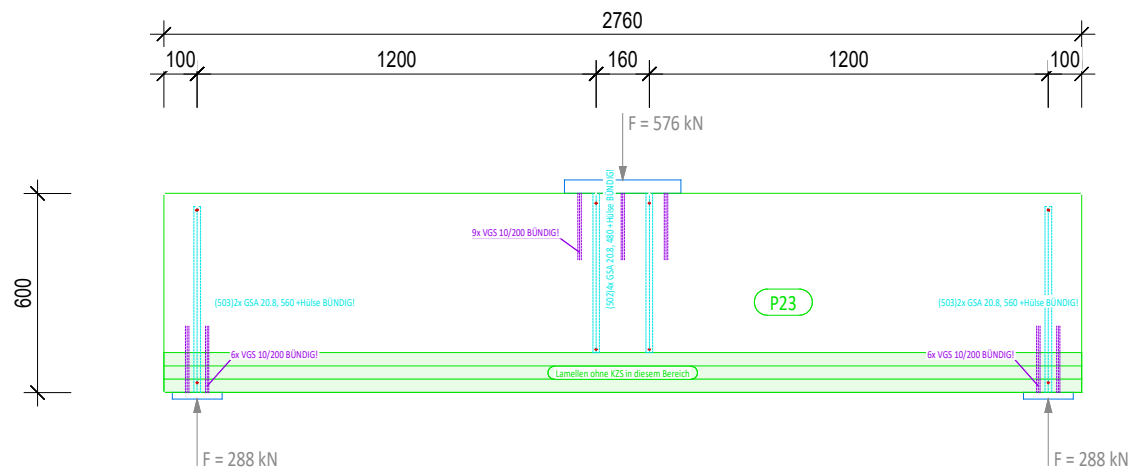


Abb. 5: Prüfkörper FI-2.3: Breite 160 mm, Höhe 600 mm, Länge 2760 mm, Spannweite 2560 mm. Es wurde 1 Prüfkörper dieses Typs geprüft.

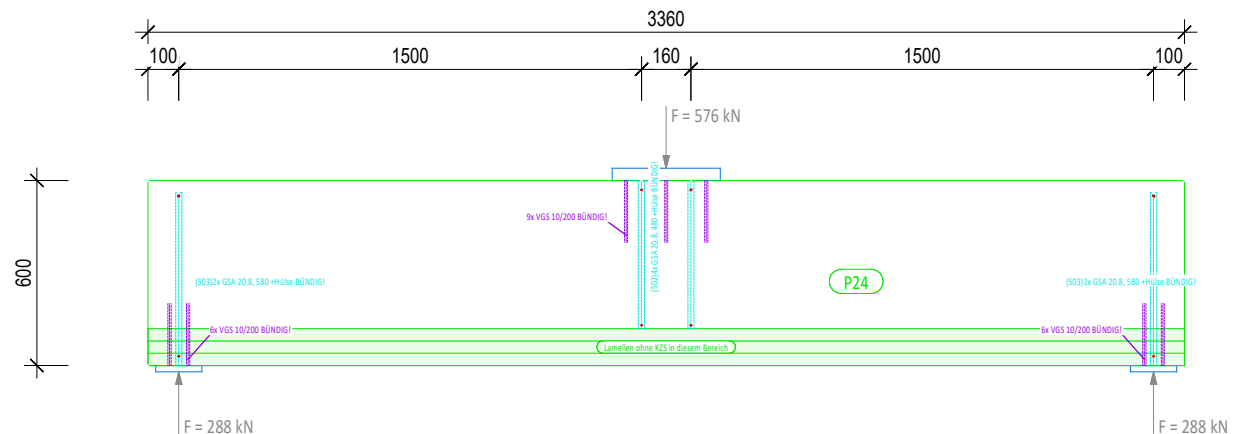


Abb. 6: Prüfkörper FI-2.4: Breite 160 mm, Höhe 600 mm, Länge 3360 mm, Spannweite 3160 mm. Es wurde 1 Prüfkörper dieses Typs geprüft.

5 Verstärkung der Krafteinleitungszonen der Prüfkörper

Um bei den Lasteinleitungsstellen die hohen Kräfte in die Träger einleiten zu können, ohne dass das Holz in den Krafteinleitungszonen wegen übermässiger Beanspruchung auf Druck rechtwinklig zur Faserrichtung versagt, wurden die Krafteinleitungszonen durch die Neue Holzbau AG verstärkt. Die entsprechenden Verstärkungen sind im Aufriss in Abb. 1 bis Abb. 6 mit hellblauer (eingeklebte Gewindestangen System GSA®) bzw. violetter Farbe (Vollgewindeschrauben) und im Grundriss in der Abb. 7 dargestellt. Es waren die folgenden Verstärkungen nötig:

Prüfkörper Typ FI-1.1 ($h = 480 \text{ mm}$):

- Auflager: 2 x GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8.8, $L = 440 \text{ mm}$ plus 6 x VGS $\varnothing 10 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$
- Zylinder: 4 x GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8.8, $L = 380 \text{ mm}$ plus 9 x VGS $\varnothing 10 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$

Prüfkörper Typ FI-2.1 ($h = 600 \text{ mm}$):

- Auflager: 2 x GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8.8, $L = 560 \text{ mm}$ plus 6 x VGS $\varnothing 10 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$
- Zylinder: 4 x GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8.8, $L = 480 \text{ mm}$ plus 9 x VGS $\varnothing 10 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$

Prüfkörper Typ FI-3.1 ($h = 800 \text{ mm}$):

- Auflager: 2 x GSA $\varnothing 24$, Festigkeit 8.8, $L = 750 \text{ mm}$ plus 6 x VGS $\varnothing 10 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$
- Zylinder: 5 x GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8.8, $L = 640 \text{ mm}$ plus 10 x VGS $\varnothing 10 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$

Prüfkörper Typ FI-2.2 ($h = 600 \text{ mm}$):

- Auflager: 2 x GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8.8, $L = 560 \text{ mm}$ plus 6 x VGS $\varnothing 10 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$
- Zylinder: 4 x GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8.8, $L = 480 \text{ mm}$ plus 9 x VGS $\varnothing 10 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$

Prüfkörper Typ FI-2.3 ($h = 600 \text{ mm}$):

- Auflager: 2 x GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8.8, $L = 560 \text{ mm}$ plus 6 x VGS $\varnothing 10 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$
- Zylinder: 4 x GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8.8, $L = 480 \text{ mm}$ plus 9 x VGS $\varnothing 10 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$

Prüfkörper Typ FI-2.4 ($h = 600 \text{ mm}$):

- Auflager: 2 x GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8.8, $L = 560 \text{ mm}$ plus 6 x VGS $\varnothing 10 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$
- Zylinder: 4 x GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8.8, $L = 480 \text{ mm}$ plus 9 x VGS $\varnothing 10 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$

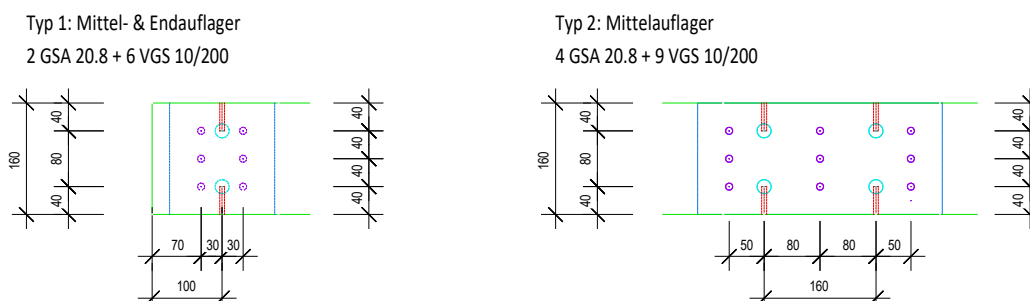


Abb. 7: Verstärkung der Krafteinleitungszonen mittels eingeklebten Gewindestangen System GSA® und Vollgewindeschrauben zur Verhinderung von Querdruckversagen im Holz.

6 Versuche

6.1 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden vom 16 Juni bis 17 Juli 2020 im Prüflabor der n'H in Lungern durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in der Abb. 8 dargestellt. Die Prüfungen wurden hauptsächlich durch Herrn Micha Bach durchgeführt. (Herzlichen Dank für die sorgfältige und gut dokumentierte Arbeit!) Analog zu den im Teil 2 dieses Berichts beschriebenen Vorversuchen, wurden die Prüfkörper an vier Stellen seitlich stabilisiert. Die Auflager waren beidseitig gelenkig und längsbeweglich ausgebildet.



Abb. 8: Versuchsaufbau im Prüflabor der n'H für die 3-Punkt-Biegeversuche an Fichten-BSH.

6.2 Messgrößen

Es wurden die folgenden Parameter bestimmt bzw. gemessen:

- Abmessungen der Prüfkörper
- Geometrie des Prüfaufbaus (Kontrolle)
- Zylinderkraft (Öldruckmessung)
- Schubverformungen mit 4 quadratischen Messkreuzen mit je 2 Messuhren in den Diagonalen (Erläuterungen dazu siehe Teil 2 des Berichts).
- Bruchlast
- Art des Versagens (Schubbruch / Biegebruch), Position des Versagens und Rissbild

Tabelle 2: Abmessungen der Träger und der Felder zur Messung der Schubverformungen. (Definition der Parameter siehe Abb. 9).

PK-Typ	Trägerhöhe	Länge [mm]		Messkreuze: Abmessungen und Position [mm]					
	h [mm]	L	l	a	$d^{1)}$	p	x	y	z
FI-1.1	480	1896	768	240	339	384	364	344	120
FI-2.1	600	2280	960	300	424	480	430	410	150
FI-3.1	800	2920	1280	400	566	640	540	520	200
FI-2.2	600	1800	720	300	424	360	310	290	150
FI-2.3	600	2760	1200	300	424	700	550	530	150
FI-2.4	600	3360	1500	300	424	750	700	680	150

¹⁾ Diagonalenlänge

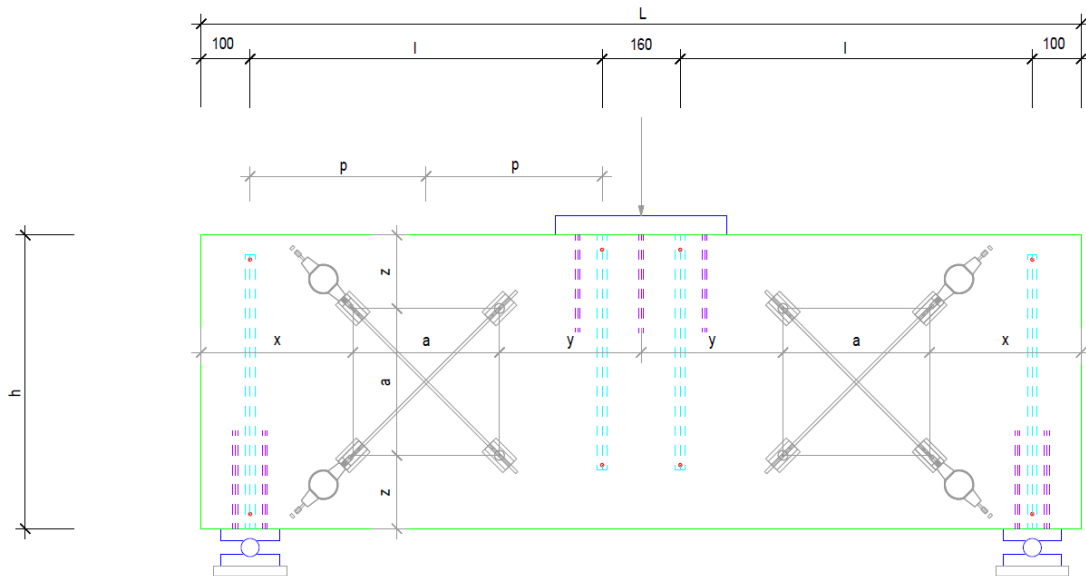


Abb. 9: Darstellung der Abmessungen und der Position der Messkreuze zur Bestimmung des Schubmoduls in parametrisierter Form. Zahlenwerte siehe Tabelle 2.

6.3 Belastungsprogramm

Die Belastung erfolgte stufenweise in Schritten von 20 bar, was einer Kraftzunahme pro Belastungsschritt von 18.64 kN entspricht. Bei jedem Belastungsschritt wurden die Messuhren an den Diagonalen abgelesen und in die Messwerte eine Excel-Tabelle eingetragen. Während der Ablesung der Messuhren reduzierte sich der Öldruck um einige wenige Bar. Für die Auswertung wurde der tiefere Wert des Drucks genommen. Dies erklärt auch die unterschiedliche Beschriftung der Prüfkörper gegenüber dem in der Tabelle 3 aufgeführten Bruchwert, wie dies am Beispiel des Prüfkörpers FI-1.1--2 in der Abb. 10 ersichtlich ist.

7 Ergebnisse

7.1 Bruchlasten und Versagensarten

Die Bruchlasten und Versagensarten sind in der Tabelle 3 zusammengestellt. Bei sämtlichen Prüfkörpern konnte ein Schubbruch erzeugt werden.



Abb. 10: Beispiel eines typischen Schubbruchs (Prüfkörper FI-1.1--2).

Der Einfluss einzelner Lamellen hat wesentliche Auswirkungen, die Schubbrüche erfolgten nicht wie erwartet immer in halber Höhe des Trägers. Zur Berechnung der in der Bruchfläche herrschenden Schubspannung ist die Lage des Risses wichtig. Sie ist in der letzten Spalte der Tabelle 3 in Form einer Z-Lage (Abstand zur neutralen Achse) angegeben.

Tabelle 3: Bruchlasten und Versagensarten der Fichten-BSH-Träger

PK	Bruchlast F_u [kN]	Querkraft V_u [kN]	Bruchart	Lage des Bruchs Z [mm]
FI-1.1--1	551.0	275.5	Schubbruch, danach Laststeigerung bis 553.8 kN	82
FI-1.1--2	543.3	271.7	Schubbruch, danach Laststeigerung bis 547.5 kN	82
FI-1.1--3	484.3	242.2	Schubbruch, danach Laststeigerung bis 488.5 kN	134
FI-2.1--1	520.1	260.1	Schubbruch, danach Laststeigerung bis 524 kN	47
FI-2.1--2	415.2	207.6	Schubbruch, danach Laststeigerung bis 419.9 kN	0
FI-2.1--3	511.7	255.9	Schubbruch, danach Laststeigerung bis 515.9 kN	108
FI-3.1--1	569.0	284.5	Schubbruch, danach Laststeigerung bis 573.2 kN	32
FI-3.1--2	610.9	305.5	Schubbruch, danach Laststeigerung bis 615.1 kN	48
FI-3.1--3	574.3	287.2	Schubbruch, danach Laststeigerung bis 578.5 kN	72
FI-2-2--1	534.0	267.0	Schubbruch, danach Laststeigerung bis 536.8 kN	60
FI-2.3--1	415.2	207.6	Schubbruch, danach keine Laststeigerung möglich	66
FI-2.4--1	499.1	249.6	Schubbruch, danach Laststeigerung bis 503.3 kN	120

7.2 Schubfestigkeit

Die aus den Bruchlasten gemäss Tabelle 3 errechneten Schub- und Biegespannungen sind in der Tabelle 4 zusammengestellt. Die Schubspannung wurde sowohl am Ort des Schubbruchs errechnet (was der eigentlichen Schubfestigkeit entspricht), als auch als maximale Schubspannung in halber Höhe des Trägers (Abb. 11) und Erläuterungen dazu im Teil 2 des Berichts. Die zum Zeitpunkt des Schubversagens herrschende Biegespannung wurde mit einem Hebelarm gleich der Hälfte der Spannweite errechnet.

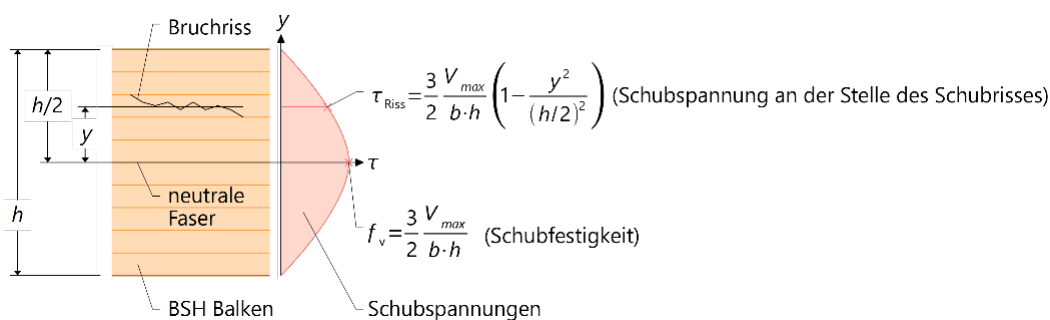


Abb. 11: Berechnung der maximalen Schubspannung und der Schubspannung beim Riss.

Die Versuchsergebnisse (Mittelwerte) sind in der Abb. 12 und der Abb. 13 dargestellt. Im Mittel über alle Versuche betrug die Schubfestigkeit $f_{v,\text{mean}} = 4.0 \text{ N/mm}^2$, die Schubspannung beim Riss $\tau_{\text{Riss,mean}} = 3.7 \text{ N/mm}^2$ und der Variationskoeffizient im Mittel 16%.

Tabelle 4: Schubfestigkeiten, Schubspannungen und Biegespannungen beim Bruch

Prüfkörper			Schubfestigkeit				Schubspannung τ_{Riss} *		Maximale Biege- spannung im Bal- ken** $\sigma_{\text{m,max}}$	
			f_v	$f_{v,\text{mean}}$	$f_{v,\text{SD}}$	COV***	τ_{Riss}	$\tau_{\text{Riss,mean}}$	$\sigma_{\text{m,max}}$	$\sigma_{\text{m,max,mean}}$
			[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
FI-1.1	FI-1.1_PK1	GL 32c	5.4				4.8		9.5	
	FI-1.1_PK2	GL 32c	5.3	5.13	0.4	0.078	4.7	4.3	9.4	
	FI-1.1_PK3	GL 32c	4.7				3.3		8.4	
FI-2.1	FI-2.1_PK1	GL 32c	4.1				4.0		7.0	
	FI-2.1_PK2	GL 32c	3.2	3.77	0.5	0.133	3.2	3.6	5.6	
	FI-2.1_PK3	GL 32c	4.0				3.5		6.9	
FI-2.2	FI-2.2_PK1	GL 32c	4.2	-	-	-	4.0	-	5.6	-
FI-2.3	FI-2.3_PK1	GL 32c	3.2	-	-	-	3.1	-	6.9	-
FI-2.4	FI-2.4_PK1	GL 32c	3.9	-	-		3.3	-	10.3	-
FI-3.1	FI-3.1_PK1	GL 32c	3.3				3.3		5.7	
	FI-3.1_PK2	GL 32c	3.6	3.43	0.1	0.029	3.5	3.4	6.1	
	FI-3.1_PK3	GL 32c	3.4				3.3		5.7	

* Schubspannung an der Stelle des Schubrisses.

** Es sind keine Biegebrüche aufgetreten, d. h. $f_m \geq \sigma_{\text{m,max}}$

*** Variationskoeffizient

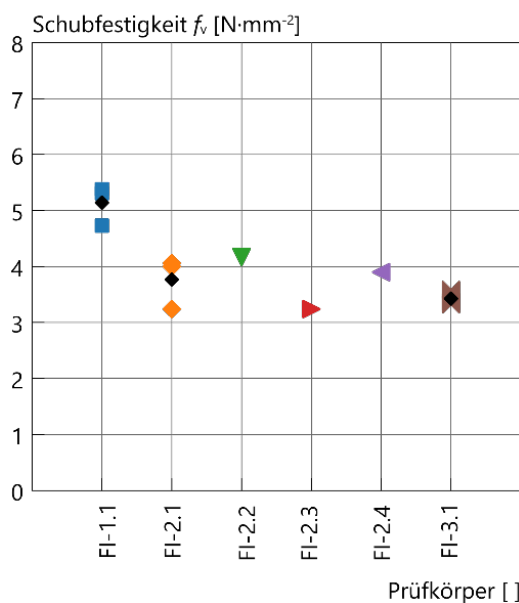
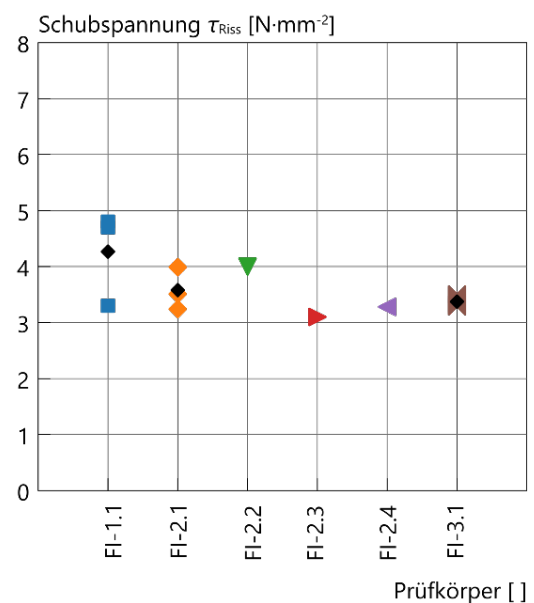


Abb. 12: In den 3-Punkt-Biegeversuchen an Fichten-BSH ermittelte Einzelwerte (farbig) und Mittelwerte (schwarz) der Schubfestigkeit.

Abb. 13: In den 3-Punkt-Biegeversuchen an Fichten-BSH ermittelte Einzelwerte (farbig) und Mittelwerte (schwarz) der Schubspannungen an der Ort des Schubbruchs τ_{Riss} .

In der Abb. 15 ist die *Schubfestigkeit* in Funktion der Fläche des Schubfelds A_{shear} für alle α -Werte (Abb. 15a), für $\alpha = 1.6$ (Abb. 15b), des α -Werts (Abb. 15c), der Querschnittshöhe (Abb. 15d), der Länge des Schubfelds L_v (Abb. 15e) und dem Volumen des Schubfelds Vol_v (Abb. 15f) dargestellt. Es ist erkennbar, dass sich der Zusammenhang zwischen Schubfestigkeit und Fläche des Schubfelds mittels folgender Funktion beschreiben lässt:

$$f_v = 2053 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.52} \quad \text{für alle } \alpha\text{-Werte} \quad \text{und} \quad f_v = 39924 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.77} \quad \text{für } \alpha = 1.6$$

Der Zusammenhang zwischen der *Schubfestigkeit* f_v und der Trägerhöhe h lässt sich beschreiben mit der Funktion:

$$f_v = 511 \cdot h^{-0.76}.$$

Der Zusammenhang lässt sich auch als Funktion der Referenzträgerhöhe von $h = 600$ mm formulieren:

$$f_v = 511 \cdot h^{-0.76} = \underbrace{4.0}_{\left(\frac{511}{600^{0.76}}\right)} \left(\frac{600}{h}\right)^{0.76}.$$

In der Abb. 16 ist die *Schubspannung* am Ort des Schubbruchs τ_{Riss} in Funktion der Fläche des Schubfelds A_{shear} (Abb. 16a), der Querschnittshöhe h (Abb. 16d), der Länge des Schubfelds L_v (Abb. 16e) und dem Volumen des Schubfelds Vol_v (Abb. 16f) dargestellt. Es ist erkennbar, dass sich der Zusammenhang zwischen Schubfestigkeit und Fläche des Schubfelds mittels folgender Funktion beschreiben lässt:

$$\tau_{\text{Riss}} = 372 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.39} \quad \text{für alle } \alpha\text{-Werte} \quad \text{und} \quad \tau_{\text{Riss}} = 574 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.42} \quad \text{für } \alpha = 1.6$$

Der Zusammenhang lässt sich auch als Funktion der Referenzträgerhöhe von $h = 600$ mm formulieren (siehe auch Abb. 14):

$$\tau_{\text{Riss}} = 51 \cdot h^{-0.41} = \underbrace{3.7}_{\left(\frac{51}{600^{0.41}}\right)} \left(\frac{600}{h}\right)^{0.41}.$$

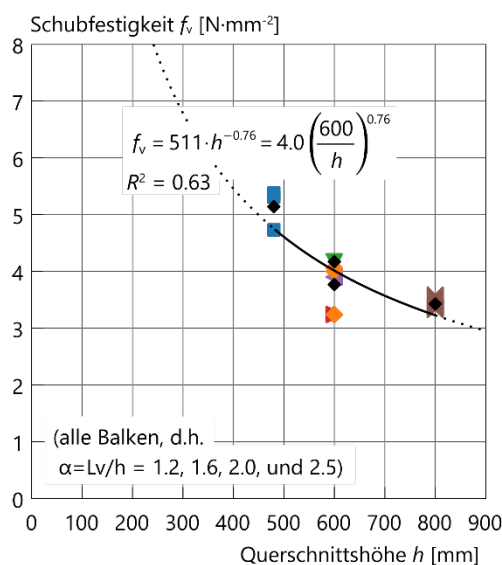


Abb. 14: Zusammenhang zwischen der Schubfestigkeit und der Trägerhöhe, bezogen auf eine Referenzhöhe von $h = 600$ mm.

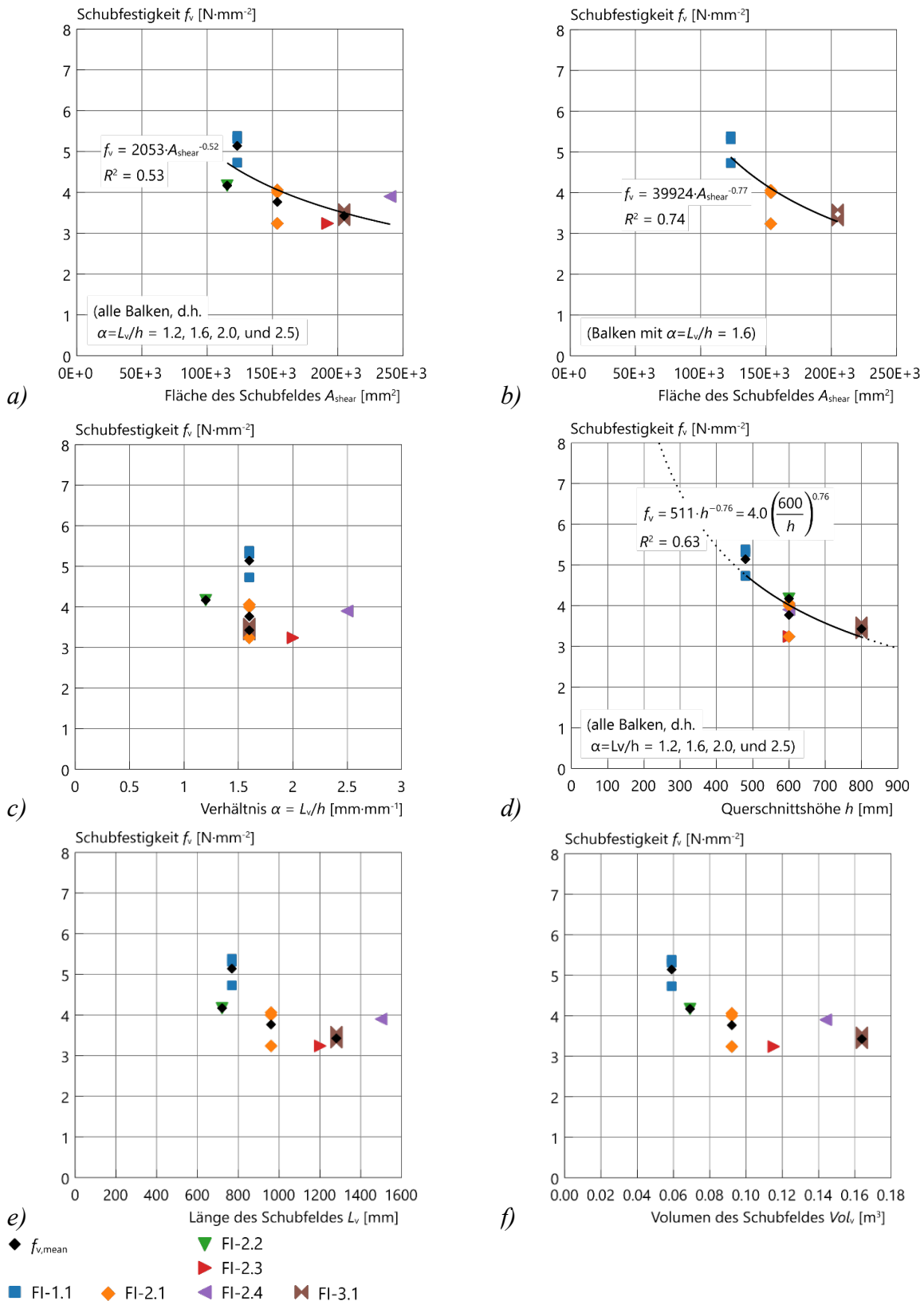


Abb. 15: Schubfestigkeit in Funktion der Fläche des Schubfelds für alle α -Werte (a), für $\alpha = 1.6$ (b), der α -Werte (c), der Querschnittshöhe (d), der Länge des Schubfelds (e) und dem Volumen des Schubfelds (f).

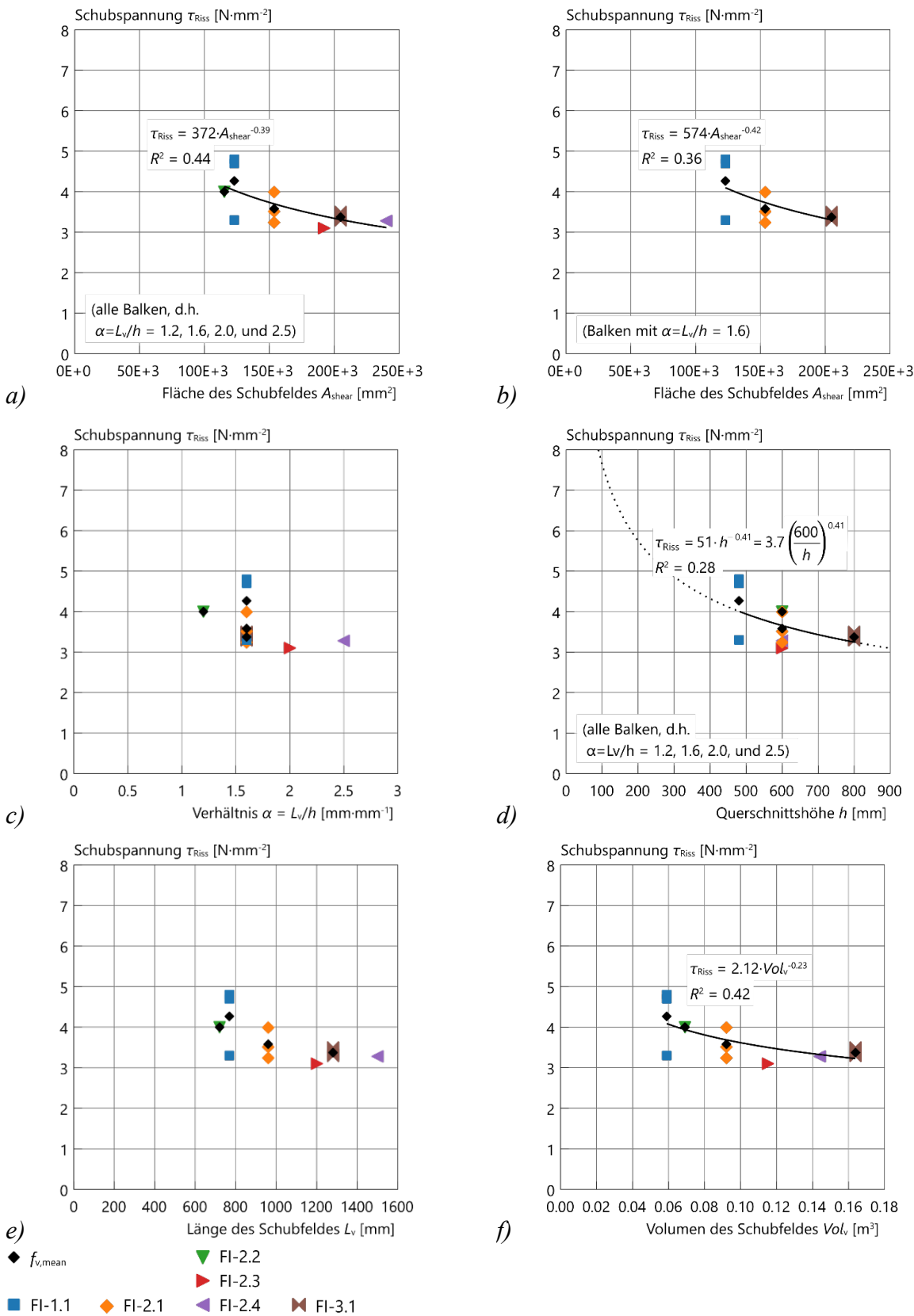


Abb. 16: Schubspannungen an der Ort des Schubbruchs τ_{Riss} in Funktion der Fläche des Schubfeldes für alle α -Werte (a), für $\alpha = 1.6$ (b), der α -Werte (c), der Querschnittshöhe (d), der Länge des Schubfeldes (e) und dem Volumen des Schubfeldes (f).

7.3 Schubmoduln

Die Schubmoduln wurden, wie in der Abb. 17 dargestellt, berechnet. Die Tabelle 5 enthält die aus den Messungen abgeleiteten Schubmoduln.

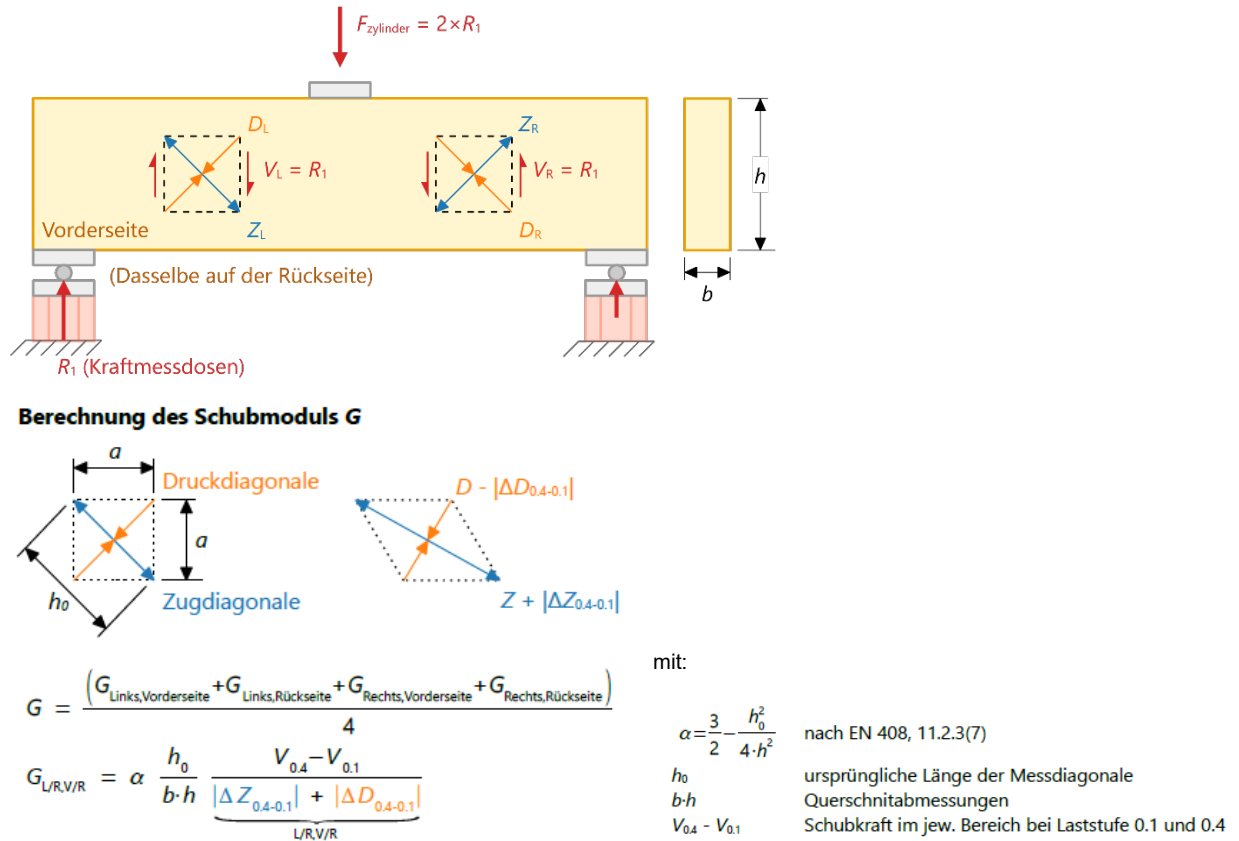


Abb. 17: Ermittlung der Schubmoduln aus den Messungen der Längenveränderungen der Diagonalen der Messkreuze. Zahlenwerte siehe Tabelle 5.

Tabelle 5: Schubmoduln

				Schubmodul		
Prüfkörper			G [N/mm ²]	G_{mean} [N/mm ²]	G_{SD} [N/mm ²]	Variations-Koeffizient []
FI-1.1	FI-1.1_PK1	GL 32c	621	611	18	3%
	FI-1.1_PK2	GL 32c	590			
	FI-1.1_PK3	GL 32c	621			
FI-2.1	FI-2.1_PK1	GL 32c	605	616	33	5%
	FI-2.1_PK2	GL 32c	591			
	FI-2.1_PK3	GL 32c	653			
FI-2.2	FI-2.2_PK1	GL 32c	587	-	-	-
FI-2.3	FI-2.3_PK1	GL 32c	567	-	-	-
FI-2.4	FI-2.4_PK1	GL 32c	627	-	-	-
FI-3.1	FI-2.2_PK1	GL 32c	590	592	10	2%
	FI-2.4_PK1	GL 32c	583			

Die Versuchsergebnisse (Mittelwerte) sind in der Abb. 18 dargestellt. Im Mittel über alle Versuche betrug der Schubmodul 603 N/mm^2 , der Variationskoeffizient im Mittel 4%. Die Analyse der Versuchsdaten hat zudem ergeben, dass der Schubmodul nicht abhängig von der Grösse des Prüfkörpers bzw. von dessen geometrischen Abmessungen ist (was auch erwartet wurde).

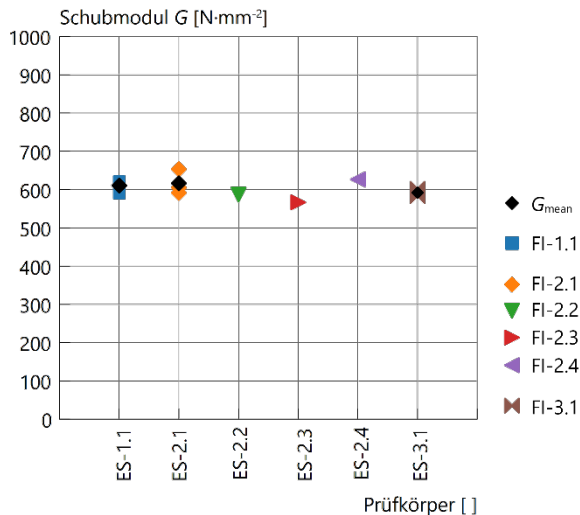


Abb. 18: Einzelwerte (farbig) und Mittelwerte (schwarz) der in den 3-Punkt-Biegeversuchen an Fichten-BSH ermittelten Schubmoduln.

8 Fazit

Aus den 3-Punkt-Biegeversuchen an den Fichten-BSH-Trägern können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- 3-Punkt-Biegeversuche stellen eine verhältnismässig einfach zu realisierende, zu bedienende und auszuwertende Prüfkfiguration dar.
- Für sämtliche untersuchten Schubfeldgrössen von $\alpha = 1.2$, $\alpha = 1.6$, $\alpha = 2.0$ und $\alpha = 2.5$ ergaben sich ausschliesslich Schubbrüche. Die zur Erzeugung der Schubbrüche notwendigen Kräfte (Einzellast in Trägermitte) sind mit ca. 400 kN bis 600 kN moderat bis gering.
- Durch Verstärkung der Krafteinleitungszonen mit eingeklebten Gewindestangen und Vollgewindeschrauben ist es möglich, die notwendigen Kräfte in die Prüfkörper einzuleiten, ohne dass Querdruckversagen im Holz auftrat. Im vorliegenden Fall wurden Gewindestangen System GSA[®] $\varnothing 20 \text{ mm}$ sowie Vollgewindeschrauben $\varnothing 10 \text{ mm}$ eingesetzt. Details zu den Verstärkungen sind im Abschnitt 5 beschrieben.
- Der Mittelwert des Schubmoduls betrug 603 N/mm^2 , der Variationskoeffizient 4%. Der Schubmodul ist unabhängig von Grösse und den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers.
- Der Mittelwert der Schubfestigkeit betrug $f_{v,\text{mean}} = 4.0 \text{ N/mm}^2$, der Variationskoeffizient 19%. Die Schnittart des einzelnen Brettes hat einen grossen Einfluss und beeinflusst stark, in welcher Zone des Trägers der Schubbruch erfolgt. Die Schubfestigkeit ist abhängig von der Grösse bzw. den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers. Im Gegensatz zur Esche ist der Grössen-Volumeneinfluss in der Fichte markanter. Es wurden die folgenden Zusammenhänge ermittelt:
 - Zwischen der Schubfestigkeit und der Fläche des Schubfeldes:

$$f_v = 2053 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.52} \quad \text{für alle } \alpha \text{ -Werte}$$

$$f_v = 39924 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.77} \quad \text{für } \alpha = 1.6$$

- Zwischen der Schubfestigkeit und der Trägerhöhe:
$$f_v = 511 \cdot h^{-0.76} = 4.0 \left(\frac{600}{h} \right)^{0.76} .$$
- Der Mittelwert der Schubspannungen beim Riss betrug $\tau_{\text{Riss,mean}} = 3.7 \text{ N/mm}^2$, der Variationskoeffizient 16%. Es wurden die folgenden Zusammenhänge ermittelt:
 - Zwischen der Schubspannung beim Riss und der Fläche des Schubfeldes:
$$\tau_{\text{Riss}} = 372 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.39} \quad \text{für alle } \alpha\text{-Werte}$$
$$\tau_{\text{Riss}} = 574 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.42} \quad \text{für } \alpha = 1.6$$
 - Zwischen der Schubspannung beim Riss und der Trägerhöhe:
$$\tau_{\text{Riss}} = 51 \cdot h^{-0.41} = 3.7 \left(\frac{600}{h} \right)^{0.41} .$$

FESTLEGUNG DER SCHUBSTEI- FIGKEIT UND SCHUBFESTIG- KEIT VON TRÄGERN, INSB. AUS LAUBHOLZ-BSH

**Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz
Projekt 2019.10**

Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Wald
und
Konferenz für Wald, Wildtiere und Landschaft KWL

Schlussbericht

Teil 4

3-Punkt-Biegeversuche an Eschen-BSH

René Steiger und Pedro Palma
Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen, 8600 Dübendorf

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	64
2	MATERIAL	64
3	DIMENSIONIERUNG DES PRÜFAUFBAUS	64
4	ABMESSUNGEN UND ANZAHL DER PRÜFKÖRPER	65
5	VERSTÄRKUNG DER KRAFTEINLEITUNGSZONEN DER PRÜFKÖRPER	66
6	VERSUCHE	68
6.1	VERSUCHSAUFBAU	68
6.2	MESSGRÖSSEN	69
6.3	BELASTUNGSPROGRAMM	72
7	ERGEBNISSE	73
7.1	MASSEN, ROHDICHTEN, BRUCHLASTEN UND VERSAGENSARTEN	73
7.2	SCHUBFESTIGKEIT	73
7.3	SCHUBMODULN	78
8	FAZIT	80

1 Einleitung

Im Rahmen der Hauptversuche wurden 3-Punkt-Biegeversuche an 9 Eschen-BSH-Trägern der Festigkeitsklasse GL48c) mit Höhen von 480, 600 und 800 mm und einem α -Wert (= Verhältnis der Länge des Schubfeldes zur Trägerhöhe) von 1.6 durchgeführt, um die Vergleichbarkeit mit Ergebnissen aus Versuchen an gleichartigen Fichten-BSH-Trägern sowie mit den asymmetrischen 4-Punkt-Biegeversuchen an den Eschen-BSH-Trägern (siehe Teil 5 des Berichts) zu ermöglichen.

2 Material

Die Eschenbretter, welche zur Herstellung der BSH-Träger verwendet wurden, wiesen eine Dicke von 44 mm auf und wurden durch die Neue Holzbau AG beim Sägewerk Beer in Meiringen eingekauft. Etwa 2/3 der Lamellen stammten aus dem Kanton Obwalden, der Rest aus der Region Meiringen. Die Bretter wurden gemäss den Festigkeitssortierregeln der Neuen Holzbau AG sortiert. Die Sortierung erfolgte visuell unter Erfassung der Merkmale Schnittart, Äste (Grösse und Lage), Rindeneinwuchs, Schrägfasrigkeit, Risse und Jahrringbreite. Zur Klassierung der Bretter in Zugfestigkeitsklassen (T-Klassen) wurde zusätzlich ein TimberGrader (Brookhuis) eingesetzt, mit welchem der dynamische E-Modul der einzelnen Bretter bestimmt wurde. Die Rohdichte war kein Einzelkriterium bei der Sortierung, wurde jedoch bei der Berechnung des dynamischen E-Moduls berücksichtigt.

Die Prüfkörper wurden sodann durch die Neue Holzbau AG als kombinierte Eschen-BSH-Träger der Festigkeitsklasse GL 48c "Spezial" hergestellt. "Spezial" bedeutet, dass sämtliche Träger jeweils 3 Lamellen der Festigkeitsklasse T50 (charakteristischer Wert der Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung $f_{t,0,k} = 50 \text{ N/mm}^2$) ohne Keilzinkenstösse auf der Biegezugseite aufwiesen, um zu verhindern, dass die Träger auf Biegung versagen, bevor ein Schubbruch eintritt. Die restlichen Lamellen in den Prüfkörpern entsprachen der Festigkeitsklasse T33 (charakteristischer Wert der Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung $f_{t,0,k} = 33 \text{ N/mm}^2$). Die Lamellendicke betrug bei sämtlichen Prüfkörpern 40 mm. Zur Herstellung der 3 Prüfkörpertypen waren also 12 (Trägerhöhe 480 mm), bzw. 15 ($h = 600 \text{ mm}$) bzw. 20 Lamellen ($h = 800 \text{ mm}$) nötig.

Die Keilzinkenstösse wurden mit dem Henkel-1K-PUR-Klebstoff Loctite HB S109 verklebt und die Flächenverklebung der Lamellen erfolgte mit dem Henkel-1-K-PUR-Klebstoff Loctite HB S709. Die BSH-Trägern wurden bei einer Holzfeuchte von 10% unter Anwendung eines Primers verklebt.

Die Prüfkörper wurden eingepackt in luftdichte Kunststoff-Folie an die Empa geliefert. Die Kunststoff-Folie wurde in der Regel erst kurz vor dem Versuch entfernt. An 3 Prüfkörpern waren Vorbereitungsarbeiten für die Dehnungsmessung mittels Bildkorrelation (Digital Image Correlation DIC) nötig. Diese Arbeiten wurden in einem Klimaraum bei einer Raumtemperatur von 22° C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % durchgeführt. Sämtliche Prüfkörper wiesen also zum Zeitpunkt des Versuchs eine Holzfeuchte von 10% auf.

3 Dimensionierung des Prüfaufbaus

Zur Dimensionierung der Prüfeinrichtung (Krafteinleitungsrahmen, Auflager, Hydraulik-Zylinder, Kipphalterungen) und der Verstärkungen der Auflager- und Krafteinleitungszonen der Träger wurde eine Schubfestigkeit (Maximalwert) von 13 N/mm^2 angenommen.

4 Abmessungen und Anzahl der Prüfkörper

Die in den Versuchen geprüften Eschen-BSH-Träger sind vergleichend in der Abb. 1 dargestellt, Detailpläne finden sich in Abb. 2, Abb. 3 und Abb. 4. Von jedem Trägertyp wurden 3 Prüfkörper geprüft. Die Abmessungen der Schubfelder sind in der Tabelle 1 zusammengestellt. Bei sämtlichen Prüfkörpern wies das Verhältnis der Schubfeld-Länge zur Balkenhöhe den konstanten Wert von 1.6 auf.

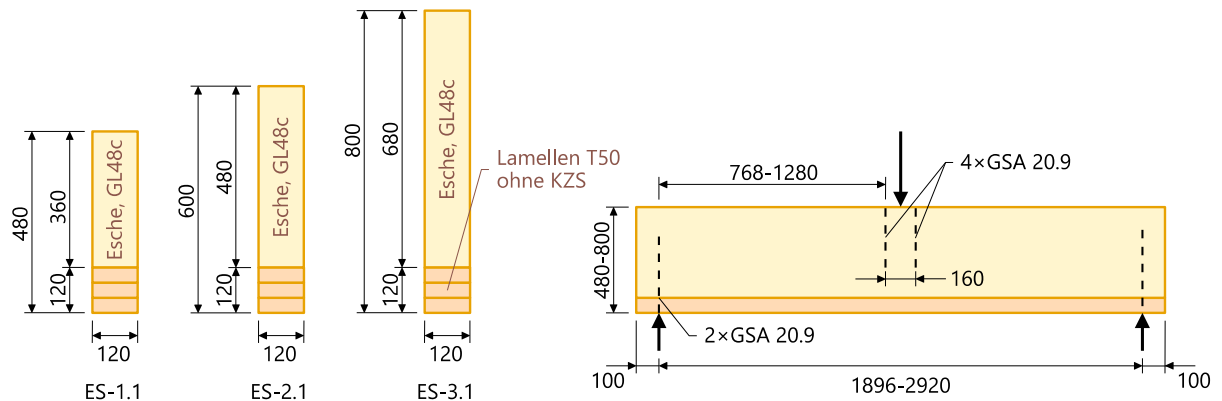


Abb. 1: Überblick über die untersuchten Eschen-BSH-Prüfkörper mit Trägerhöhen 480, 600 und 800 mm und Längen von 1896, 2280 und 2920 mm.

Tabelle 1: Geometrische Abmessungen der Träger und der Schubfelder der Träger ES-1.1, ES-2.1 und ES 3.1

Prüfkörper		Balkenbreite	Balkenhöhe	Länge des Schubfeldes	Verhältnis $\alpha = L_v / h$	Fläche des Schubfeldes	Volumen des Schubfeldes
		b [mm]	h [mm]	L_v [mm]	α [mm/mm]	A_{shear} [mm ²]	Vol_v [m ³]
ES-1.1	GL 48c, 3x	120	480	768	1.6	92160	0.044
ES-2.1	GL 48c, 3x	120	600	960	1.6	115200	0.069
ES-3.1	GL 48c, 3x	120	800	1280	1.6	153600	0.123

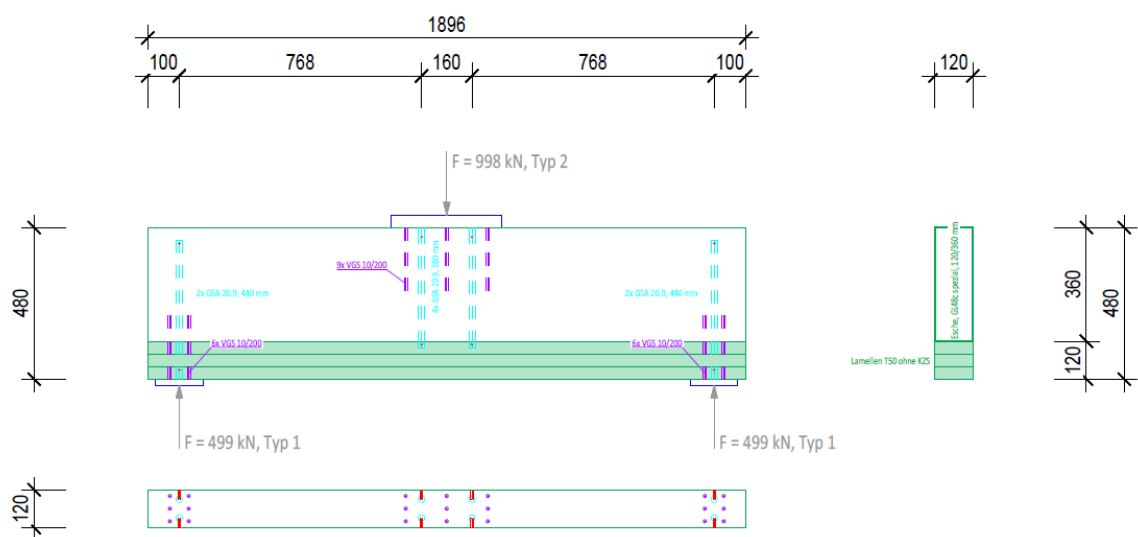


Abb. 2: Prüfkörper des Typs ES-1.1: Breite 120 mm, Höhe 480 mm, Länge 1896 mm, Spannweite 1696 mm. Es wurden 3 Prüfkörper dieses Typs geprüft.

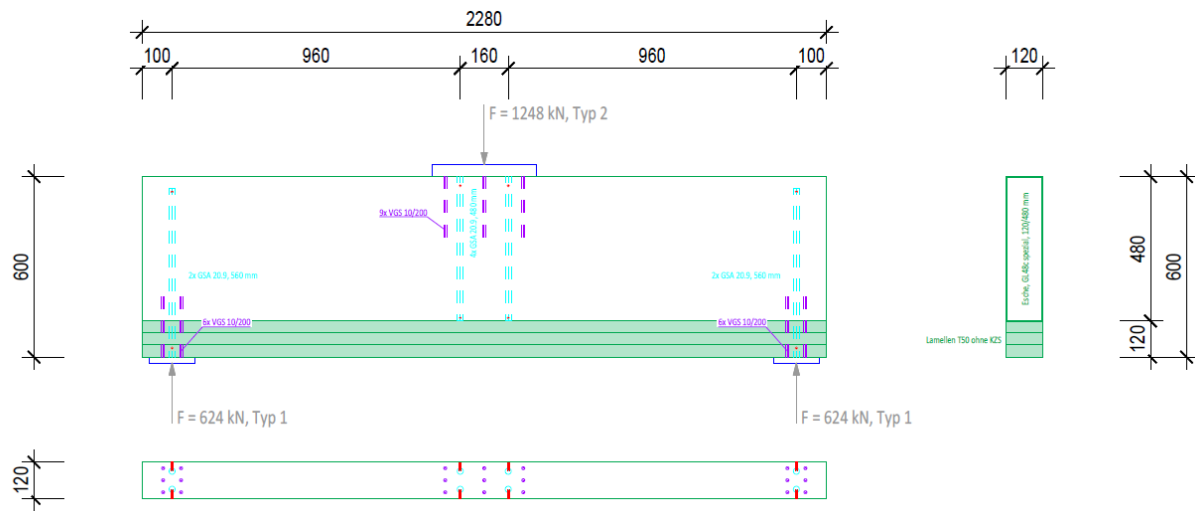


Abb. 3: Prüfkörper des Typs ES-2.1: Breite 120 mm, Höhe 600 mm, Länge 2280 mm, Spannweite 2080 mm. Es wurden 3 Prüfkörper dieses Typs geprüft.

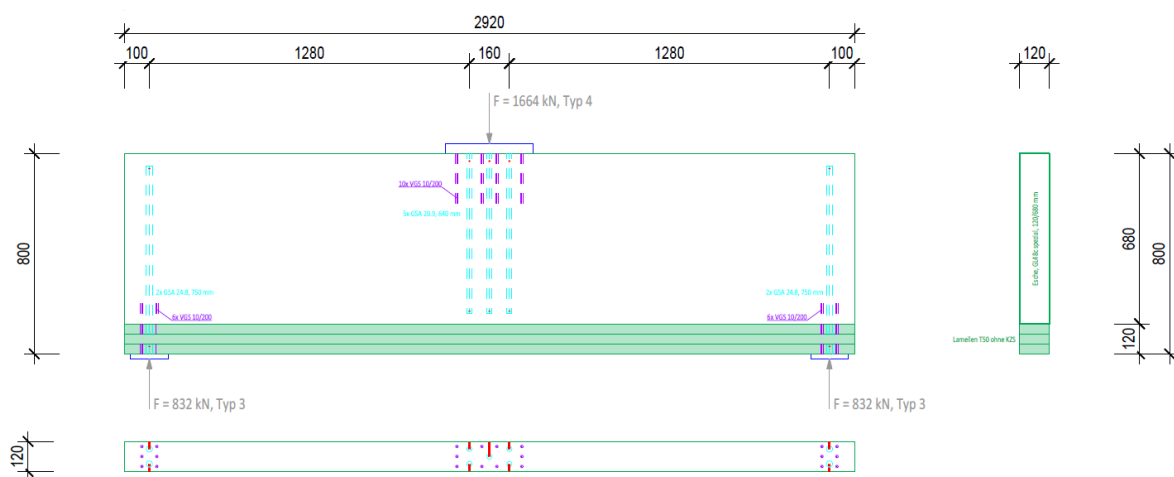


Abb. 4: Prüfkörper des Typs ES-3.1: Breite 120 mm, Höhe 800 mm, Länge 2920 mm, Spannweite 2720 mm. Es wurden 3 Prüfkörper dieses Typs geprüft.

Um bei den Lasteinleitungsstellen die hohen Kräfte in die Träger einleiten zu können, ohne dass das Holz in den Krafteinleitungszonen wegen übermässiger Beanspruchung auf Druck rechtwinklig zur Faserrichtung versagt, wurden die Krafteinleitungszonen durch die Neue Holzbau AG verstärkt. Die entsprechenden Verstärkungen sind im Aufriss in Abb. 2, Abb. 3 und Abb. 4 mit hellblauer (eingeklebte Gewindestangen System GSA®) bzw. violetter Farbe (Vollgewindeschrauben) dargestellt. Es waren die folgenden Verstärkungen nötig:

Prüfkörper Typ ES-1.1 ($h = 480$ mm):

- Auflager: 2 x GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8.8, $L = 440$ mm plus 6 x VGS $\varnothing 10$ mm, $L = 200$ mm
- Zylinder: 4 x GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8.8, $L = 380$ mm plus 9 x VGS $\varnothing 10$ mm, $L = 200$ mm

Prüfkörper Typ ES-2.1 ($h = 600$ mm):

- Auflager: 2 x GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8.8, $L = 560$ mm plus 6 x VGS $\varnothing 10$ mm, $L = 200$ mm
- Zylinder: 4 x GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8.8, $L = 480$ mm plus 9 x VGS $\varnothing 10$ mm, $L = 200$ mm

Prüfkörper Typ ES-3.1 ($h = 800$ mm):

- Auflager: 2 x GSA $\varnothing 24$, Festigkeit 8.8, $L = 750$ mm plus 6 x VGS $\varnothing 10$ mm, $L = 200$ mm
- Zylinder: 5 x GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 12.9, $L = 640$ mm plus 10 x VGS $\varnothing 10$ mm, $L = 200$ mm

Die Abb. 5 zeigt die Verstärkungen im Grundriss.

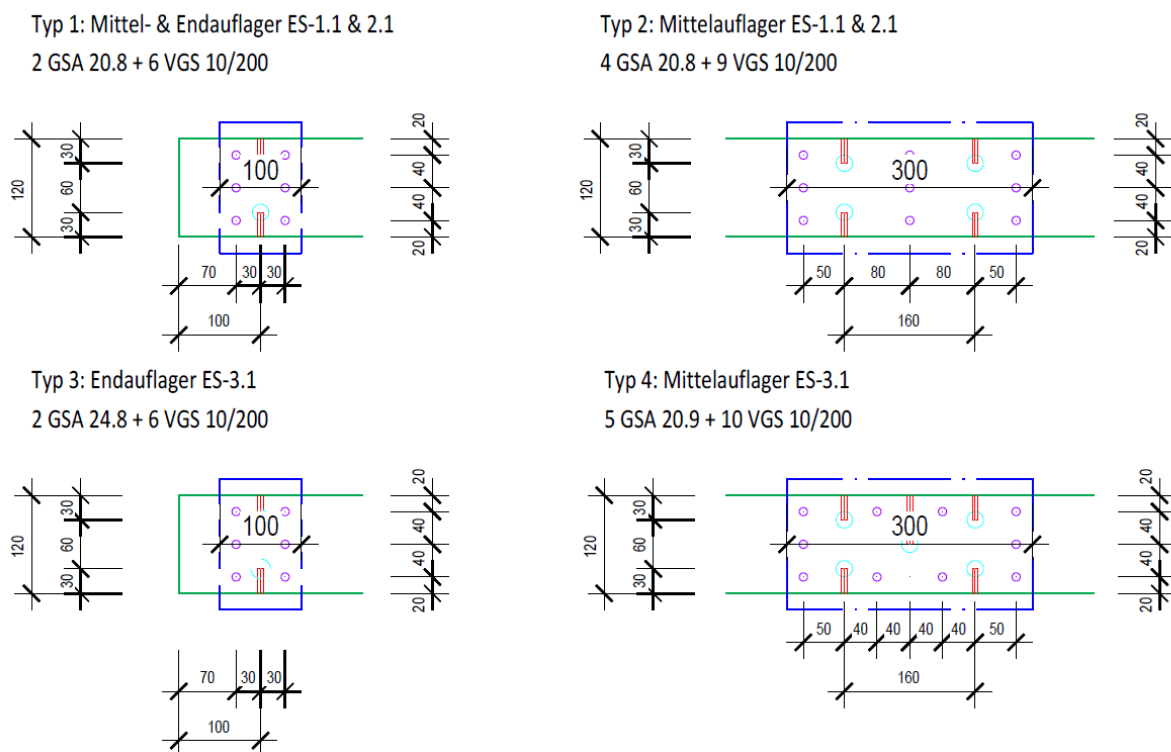


Abb. 5: Verstärkung der Kräfteinleitungszonen mittels eingeklebten Gewindestangen System GSA® und Vollgewindeschrauben zur Verhinderung von Querdruckversagen im Holz.

6 Versuche

6.1 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden auf dem grossen Aufspannfeld der Empa in Dübendorf durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 6, Abb. 7 und Abb. 8 dargestellt.

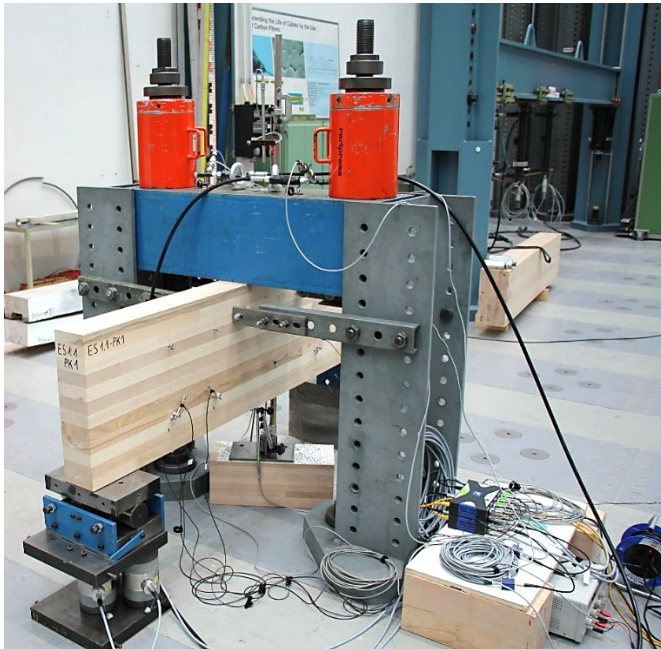


Abb. 6: Versuchsaufbau an der Empa für die 3-Punkt-Biegeversuche an Eschen-BSH.



Abb. 7: Detailbild des Auflagers mit Kraftmessdosen.

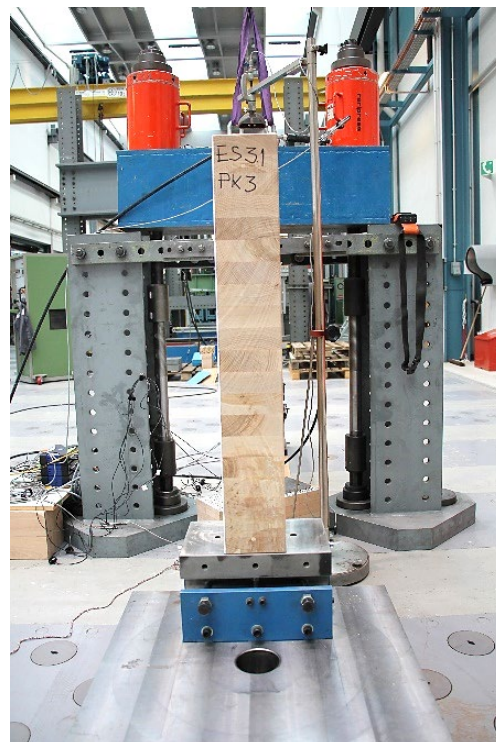


Abb. 8: 800 mm hoher Träger während des Versuchs.

6.2 Messgrößen

Es wurden die folgenden Parameter bestimmt bzw. gemessen:

Vor dem Versuch:

- Abmessungen der Prüfkörper
- Geometrie des Prüfaufbaus (Kontrolle)
- Masse

Während des Versuchs:

- Zylinderkraft (Öldruckmessung)
- Kraft an einem der beiden Auflager (3 Kraftmessdosen)
- Durchbiegung des zur Krafteinleitung eingesetzten Stahlträgers oben
- Durchbiegung des Prüfkörpers in Spannweitenmitte (bis zu einer Kraft von ca. 50 - 60% der geschätzten Bruchlast)
- Schubverformungen mit 4 quadratischen Messkreuzen à 2 Wegaufnehmern in den Diagonalen (Erläuterungen dazu siehe Teil 2 des Berichts). Bei jeweils einem Prüfkörper pro Serie wurde eines der Messkreuze durch eine Bildkorrelationsmessung ersetzt.
- Bruchlast
- Art des Versagens (Schubbruch / Biegebruch) und Rissbild

Die durchgeführten Messungen sind in Abb. 9 bis Abb. 12 dargestellt.

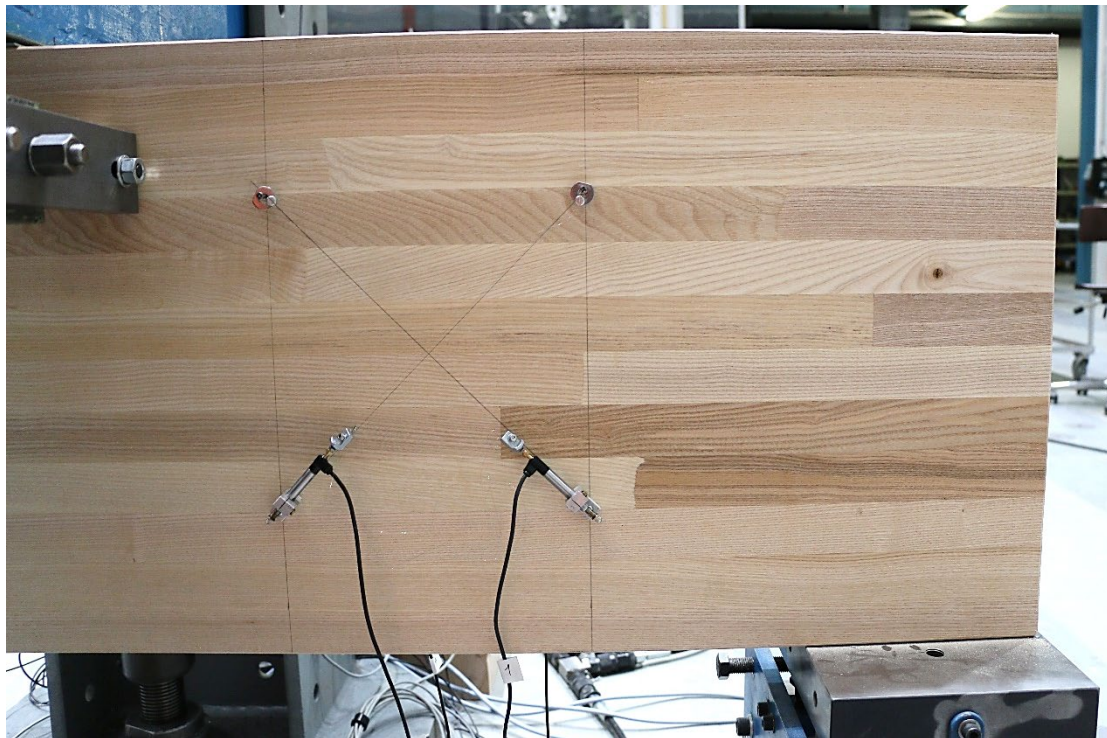


Abb. 9: Messkreuz zur Bestimmung des Schubmoduls.

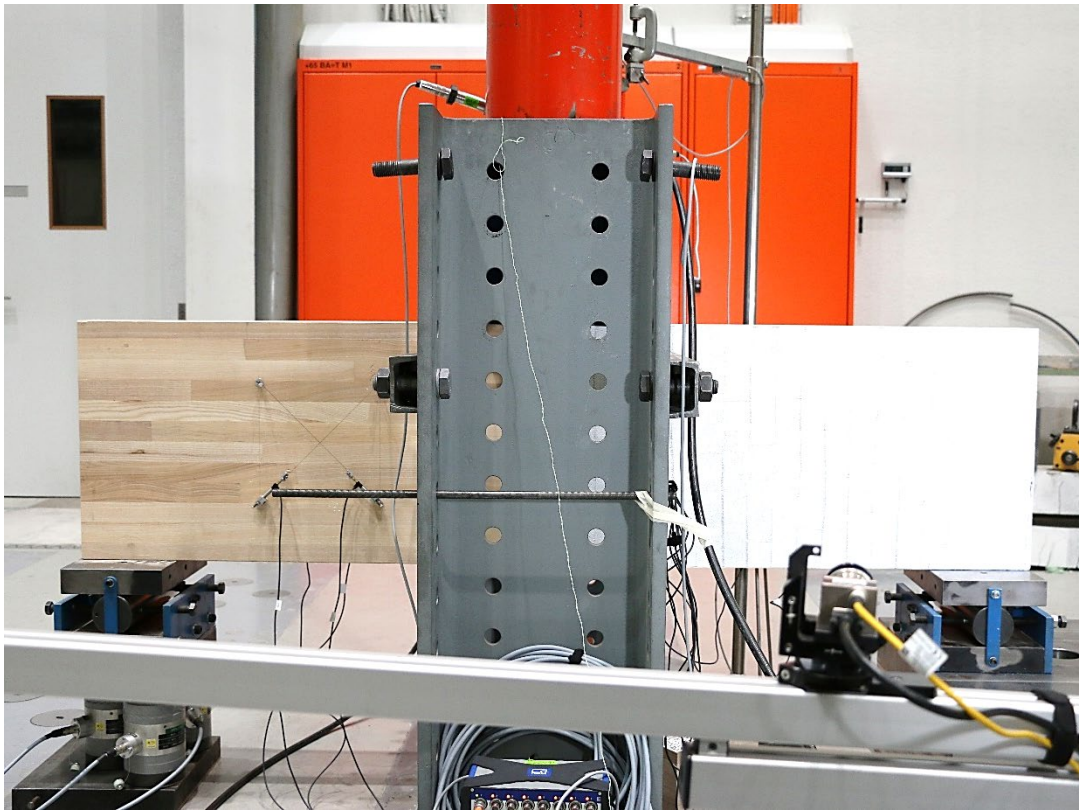


Abb. 10: Messung der Dehnungen, Stauchungen und Verzerrungen mittels Bildkorrelation.

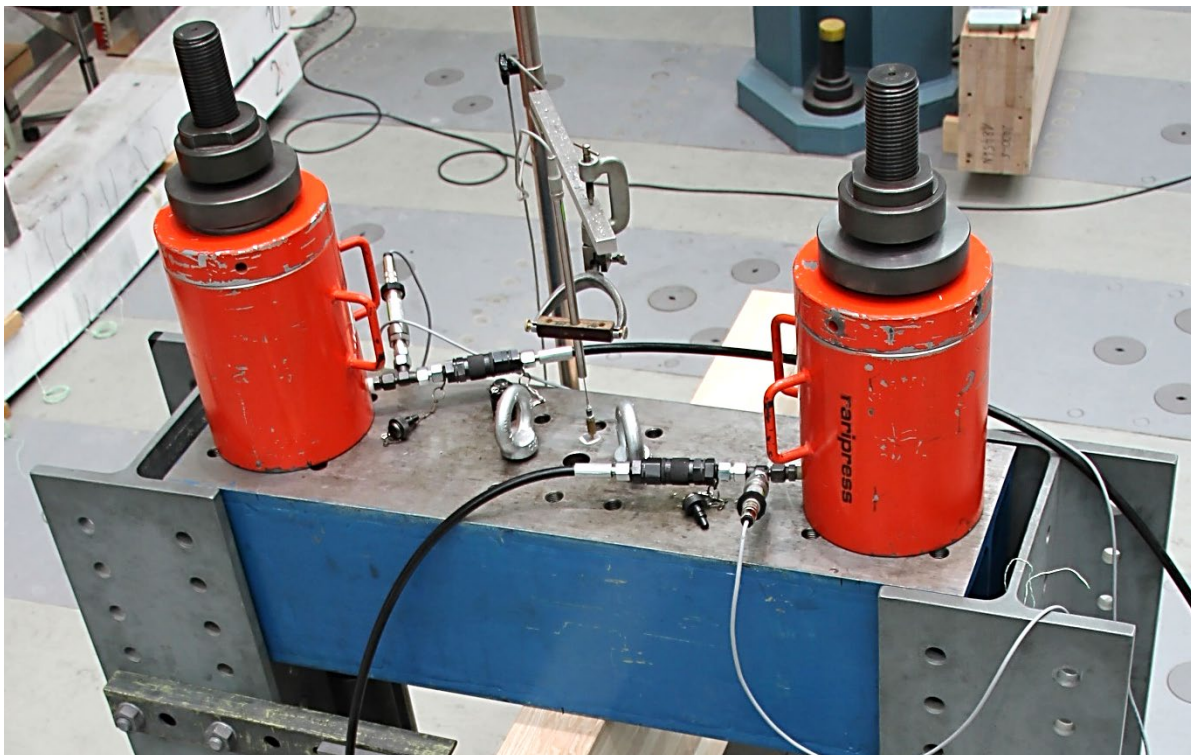


Abb. 11: Messung der Durchbiegung des zur Krafteinleitung eingesetzten Stahlträgers oben.

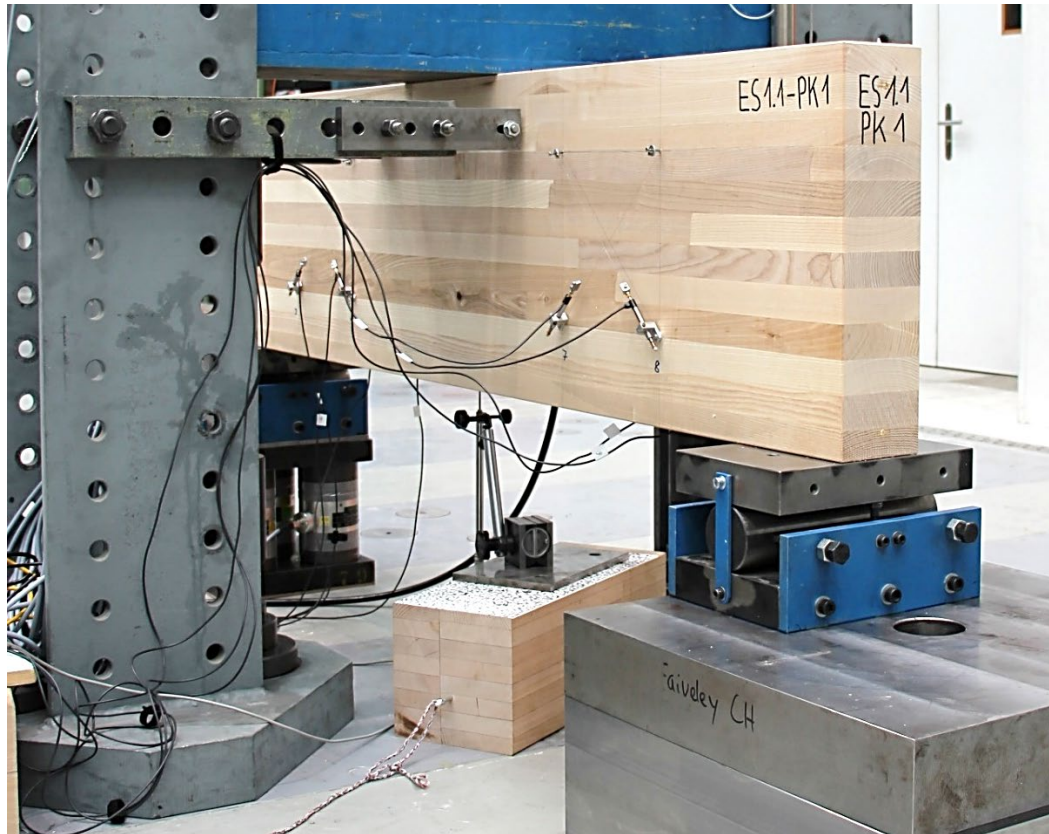


Abb. 12: Messung der Durchbiegung des Prüfkörpers in Spannweitenmitte.

Die Abmessungen und die Positionen der Messkreuze zur Messung der Schubverformungen sind in der Abb. 13 und in der Tabelle 2 zusammengestellt.

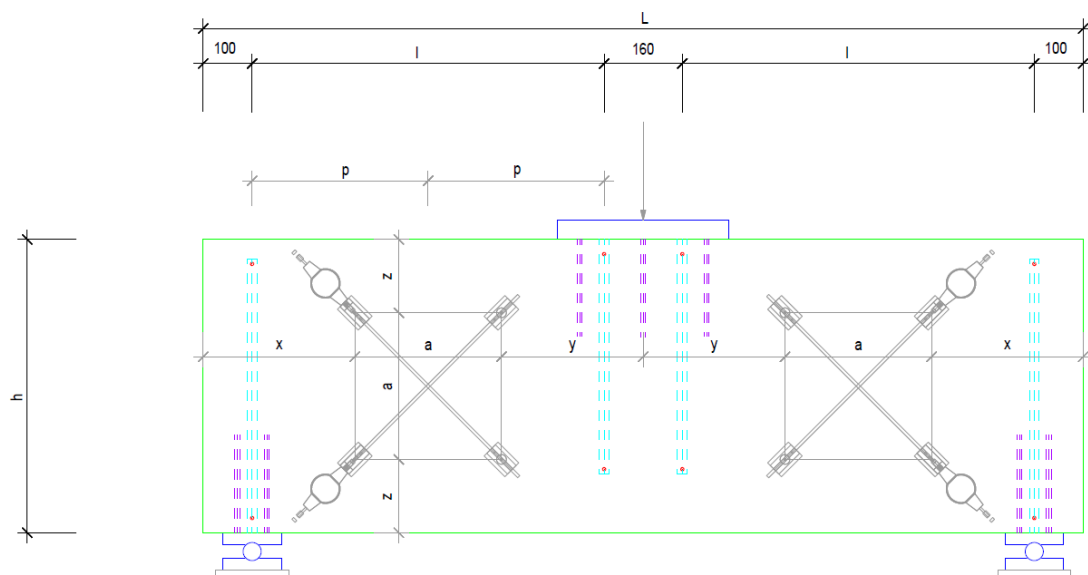


Abb. 13: Darstellung der Abmessungen und der Position der Messkreuze zur Bestimmung des Schubmoduls in parametrisierter Form. Zahlenwerte siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Abmessungen der Träger und der Felder zur Messung der Schubverformungen. (Definition der Parameter siehe Abb. 13).

PK-Typ	Trägerhöhe	Länge [mm]		Messkreuze: Abmessungen und Position [mm]					
	h [mm]	L	l	a	d ¹⁾	p	x	y	z
ES-1.1	480	1896	768	240	339 ²⁾	384	364	344	120
ES-2.1	600	2280	960	300	424	480	430	410	150
ES-3.1	800	2920	1280	400	566 ³⁾	640	540	520	200

¹⁾ Diagonalenlänge

²⁾ 343 mm im Schubfeld mit Bildkorrelationsmessung beim Versuch an den Trägern ES-1.1--3

³⁾ 565 mm im Schubfeld mit Bildkorrelationsmessung beim Versuch an den Trägern ES-3.1--3

6.3 Belastungsprogramm

Die Abb. 14 zeigt das angewendete Belastungsprogramm am Beispiel der Versuche an den Prüfkörpern des Typs ES-1.1. Die Kraft wurde zunächst bis auf einen Wert von 40% der geschätzten Bruchlast gesteigert und auf diesem Niveau während mindestens 180 sec konstant gehalten. Dann wurden die Wegaufnehmer bei den 4 Messkreuzen entfernt, um Beschädigungen zu vermeiden. Anschliessend wurde die Kraft stetig gesteigert, bis sich der Bruch einstellte.

Die Belastung erfolgte kraftgesteuert mit einer Hydraulikpumpe, mit manueller Kraftregulierung über ein Ventil. Der zur Messung der Durchbiegung des Prüfkörpers in Spannweitenmitte eingesetzte, unterhalb des Trägers positioniert Wegaufnehmer wurde bei einer Kraft von ca. 50 – 60% der geschätzten Bruchlast entfernt. Die Durchbiegung des zur Krafteinleitung eingesetzten Stahlträgers wurde während der gesamten Versuchsdauer gemessen. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde so geregelt, dass die Laststeigerung zwischen 40% der geschätzten Bruchlast und dem Erreichen derselben im Mittel eine Zeit von ca. 2 Minuten benötigte.

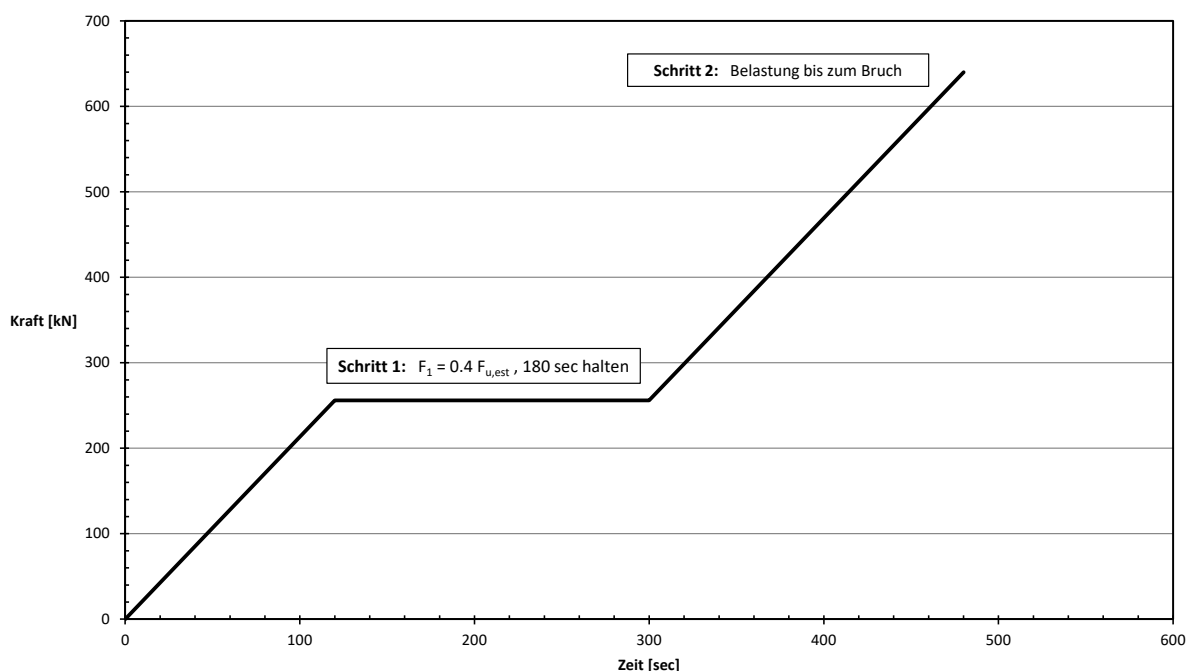


Abb. 14: Belastungsprogramm für die 3-Punkt-Biegeversuche an Eschen-BSH.

7 Ergebnisse

7.1 Massen, Rohdichten, Bruchlasten und Versagensarten

Die Bruchlasten und Versagensarten sind in der Tabelle 3 zusammengestellt. In der Abb. 15 ist ein typischer Schubbruch dargestellt.

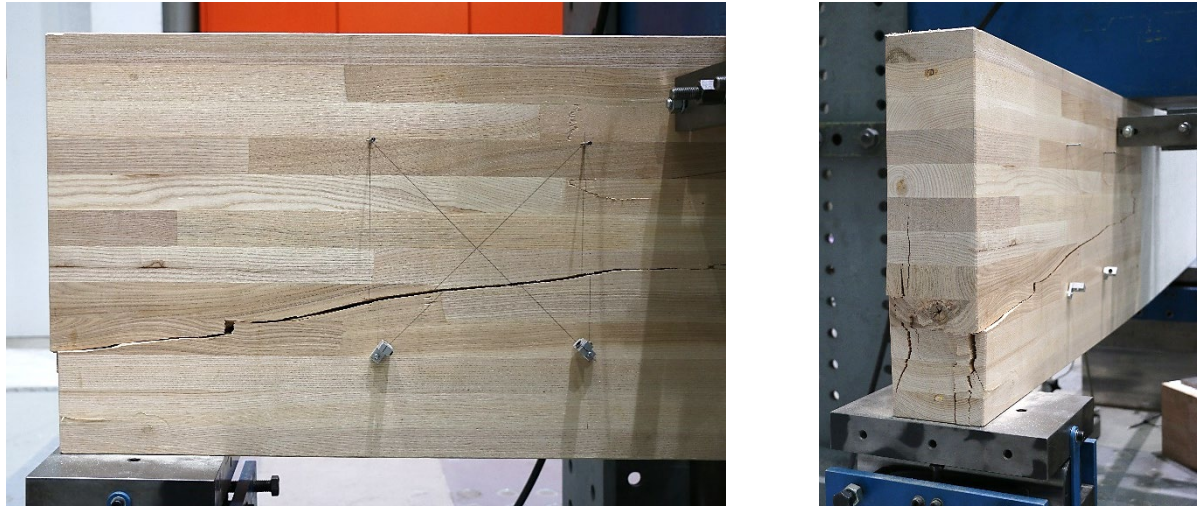


Abb. 15: Beispiel eines typischen Schubbruchs (Prüfkörper ES-1.1--3).

Tabelle 3: Massen, Rohdichten, Bruchlasten und Versagensarten der Eschen-BSH-Träger

PK	M_{Brutto} [kg]	V_{Stahl} [mm ³]	m_{Stahl} [kg]	m_{Holz} [kg]	$\rho_{\text{Holz},10\%}$ [kg/m ³]	F_u [kN]	Bruchart [-]
ES-1.1--1	80	1360310	10.7	69.3	643	640	Schubbruch
ES-1.1--2	80	1360310	10.7	69.3	643	892	Schubbruch
ES-1.1--3	77	1360310	10.7	66.3	615	910	Schubbruch
ES-2.1--1	115	1636770	12.8	102.2	629	946	Schubbruch
ES-2.1--2	114	1636770	12.8	101.2	622	858	Schubbruch
ES-2.1--3	115	1636770	12.8	102.2	629	1180	Schubbruch
ES-3.1--1	209	2708053	21.3	187.7	676	1358	Schubbruch
ES-3.1--2	200	2708053	21.3	178.7	644	1146	Schubbruch
ES-3.1--3	205	2708053	21.3	183.7	662	1141	Schubbruch

7.2 Schubfestigkeit

In der Tabelle 4 sind die den Bruchlasten und die Lage des Bruchs angegeben. Die aus den Bruchlasten errechneten Schub- und Biegespannungen sind in der Tabelle 5 zusammengestellt. Die Schubspannung wurde sowohl am Ort des Schubbruchs errechnet (was der eigentlichen Schubfestigkeit entspricht), als auch als maximaler Wert in halber Höhe des Trägers (Abb. 16 und Erläuterungen dazu im Teil 2 des Berichts). Die zum Zeitpunkt des Schubversagens wirkende Biegespannung wurde mit einem Hebelarm gleich der Hälfte der Spannweite berechnet.

Tabelle 4: Bruchlasten sowie Lage des Bruchs

PK	h [mm]	F_u [kN]	Lage des Bruchs [-]
ES-1.1--1	480	640	Seite Kraftmessdosen in der 4. Lamelle von unten
ES-1.1--2		892	Seite Kraftmessdosen in der Klebfuge zw. der 5. & 6. Lamelle von unten
ES-1.1--3		910	Seite Kraftmessdosen beginnend auf der Oberseite der 3. Lamelle und an der Unterseite der 5. Lamelle von unten, sich ausbreitend gegen die Balkenmitte bis zur 6. Lamelle von unten. Die Lamelle 4 enthält ein sehr kurzes astreiches Stück am Balkenende.
ES-2.1--1	600	946	Seite ohne Kraftmessdosen in Klebfuge zw. 8. & 9. Lamelle von unten
ES-2.1--2		858	Seite Kraftmessdosen in der 7. Lamelle von unten und in der Klebfuge zwischen der 8. & 9. Lamelle von unten
ES-2.1--3		1180	Seite ohne Kraftmessdosen in der 6. Lamelle von unten und praktisch gleichzeitiger teilweiser Biegebruch in Spannweitenmitte
ES-3.1--1	800	1358	Schubbruch Seite Kraftmessdosen in der 7. & 8. Lamelle von unten
ES-3.1--2		1146	Schubbruch Seite Kraftmessdosen in der 14. & 15. Lamelle von unten, Bruch z.T. in der Klebfuge
ES-3.1--3		1141	Schubbruch Seite Kraftmessdosen in den Lamellen 14 & 15 von unten und in der Klebfuge zwischen diesen Lamellen

Tabelle 5: Schubfestigkeiten, Schubspannungen und Biegespannungen beim Bruch

Prüfkörper	Schubfestigkeit				Schubspannung τ_{Riss} *		Maximale Biegespannung im Träger** $\sigma_{m,\max}$	
	f_v	$f_{v,\text{mean}}$	$f_{v,\text{SD}}$	COV***	τ_{Riss}	$\tau_{\text{Riss,mean}}$	$\sigma_{m,\max}$	$\sigma_{m,\max,\text{mean}}$
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
ES-1.1_PK1	GL 48c	8.41			7.43		59.4	
ES-1.1	ES-2.1_PK2	GL 48c	11.7	10.7	2.0	18%	11.4	9.2
	ES-3.1_PK3	GL 48c	11.9				82.7	75.3
					8.90		83.9	
ES-2.1	ES-2.1_PK1	GL 48c	9.91				68.7	
	ES-2.1_PK2	GL 48c	8.98	10.4	1.7	16%	8.89	10.0
	ES-2.1_PK3	GL 48c	12.3				62.3	72.1
					11.2		85.2	
ES-3.1	ES-3.1_PK1	GL 48c	10.7				72.6	
	ES-3.1_PK2	GL 48c	9.06	9.6	0.9	10%	7.61	8.3
	ES-3.1_PK3	GL 48c	9.08				61.6	65.3
					7.63		61.8	

* Schubspannung an der Stelle des Schubrisses.

** Es sind keine Biegebrüche aufgetreten, d. h. $f_m \geq \sigma_{m,\max}$

*** Variationskoeffizient

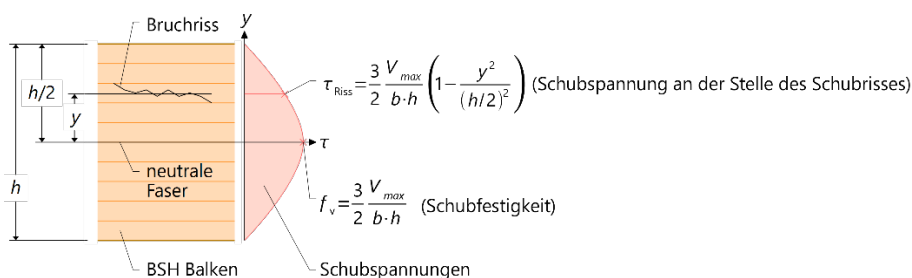


Abb. 16: Berechnung der maximalen Schubspannung und der Schubspannung beim Riss.

Die Versuchsergebnisse (Mittelwerte) sind in der Abb. 17 **Error! Reference source not found.** dargestellt. Im Mittel über alle Versuche betrug die Schubfestigkeit $f_{v,\text{mean}} = 10.2 \text{ N/mm}^2$, der Variationskoeffizient im Mittel 14%.

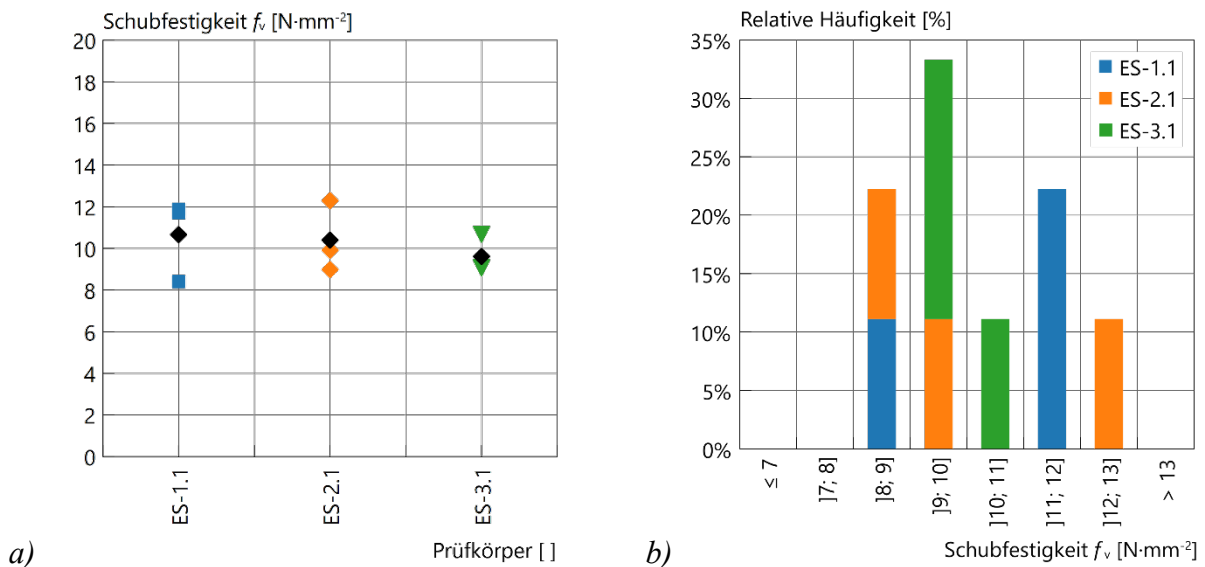


Abb. 17: Schubfestigkeit f_v bei den 4-Punkt-Biegeversuchen: a) in den 4-Punkt-Biegeversuchen an Eschen-BSH ermittelte Einzelwerte (farbig) und Mittelwerte (schwarz) der Schubfestigkeit f_v ; b) Histogramm der Schubfestigkeit f_v

In der Abb. 18 ist eine Auswertung (Histogramm) betreffend Lage des Schubbruchs bezogen auf die Trägerhöhe dargestellt. Es ist erkennbar, dass in den meisten Fällen die Schubbrüche oberhalb der neutralen Achse des Trägers auftraten.

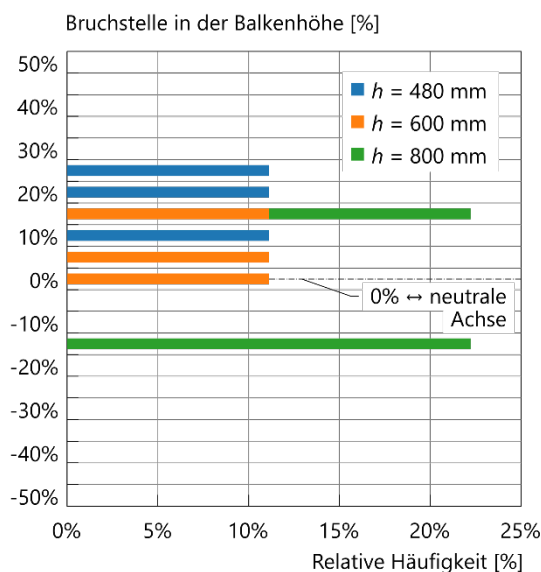
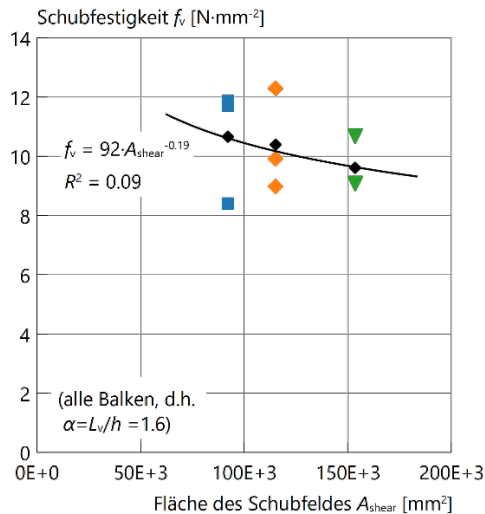
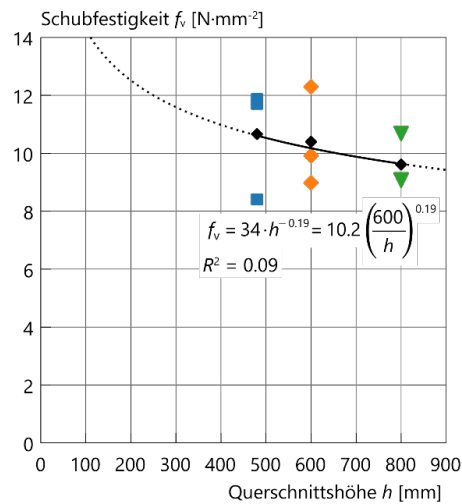


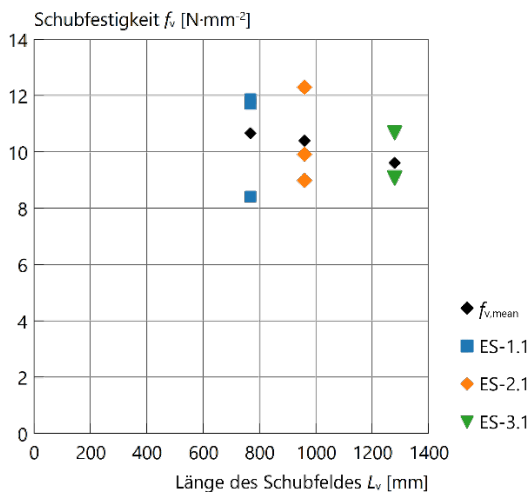
Abb. 18: Histogramme der Lage der Bruchstelle y_{Riss} .



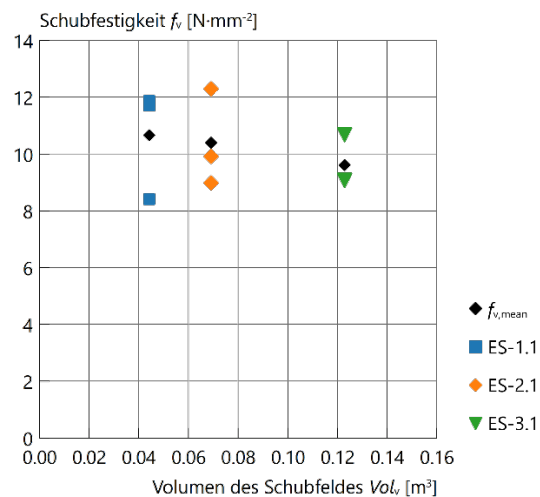
a)



b)



c)



d)

Abb. 19: Schubfestigkeit in Funktion der Fläche des Schubfelds (a), der Querschnittshöhe (b), der Länge des Schubfelds (c) und dem Volumen des Schubfelds (d).

In der Abb. 19 ist die Schubfestigkeit f_v in Funktion der Fläche des Schubfelds A_{shear} (Abb. 19a), der Querschnittshöhe h (Abb. 19b), der Länge des Schubfelds L_v (Abb. 19c) und dem Volumen des Schubfelds Vol_v (Abb. 19d) dargestellt. Der Zusammenhang zwischen der Schubfestigkeit und der Fläche des Schubfelds lässt sich mit folgender Funktion beschreiben:

$$f_v = 92 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.19}.$$

Der Zusammenhang zwischen der Schubfestigkeit und der Trägerhöhe lässt sich beschreiben mit der Funktion:

$$f_v = 34 \cdot h^{-0.19}.$$

Der Zusammenhang lässt sich auch als Funktion der Referenzträgerhöhe von $h = 600$ mm formulieren:

$$f_v = 34 \cdot h^{-0.19} = \underbrace{10.2}_{\left(\frac{34}{600^{0.19}}\right)} \left(\frac{600}{h}\right)^{0.19}.$$

In der Abb. 20 ist die Schubspannungen am Ort des Schubbruchs τ_{Riss} in Funktion der Fläche des Schubfelds A_{shear} (Abb. 20a), der Querschnittshöhe h (Abb. 20b), der Länge des Schubfelds L_v (Abb. 20c) und dem Volumen des Schubfelds Vol_v (Abb. 20d) dargestellt.

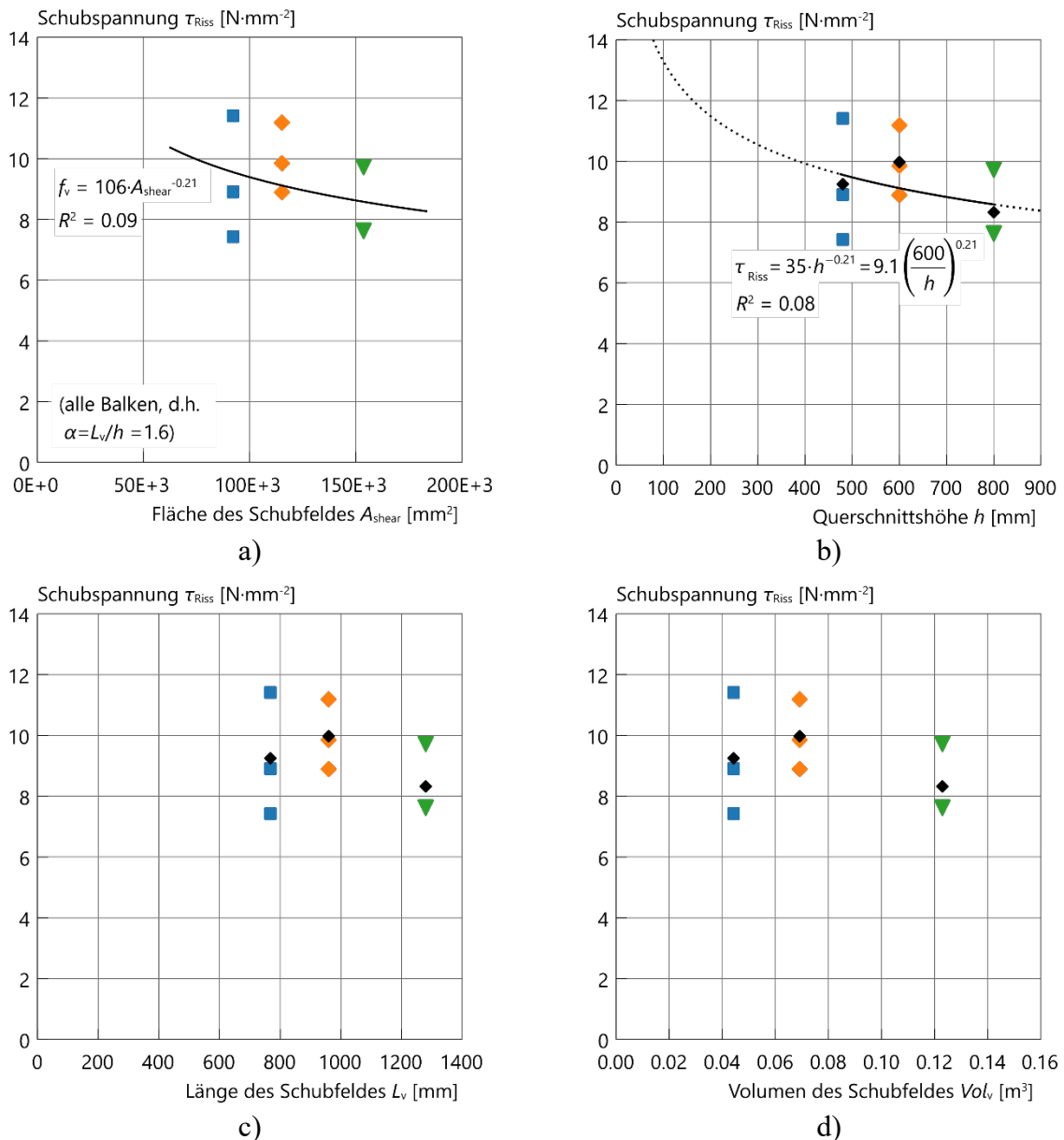


Abb. 20: Schubspannung beim Riss in Funktion der Fläche des Schubfeldes (a), der Querschnittshöhe (b), der Länge des Schubfeldes (c) und dem Volumen des Schubfeldes (d).

Der Zusammenhang zwischen der Schubspannung am Ort des Schubbruchs und der Fläche des Schubfeldes kann mittels folgender Funktion beschrieben werden:

$$\tau_{\text{Riss}} = 106 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.21}.$$

Der Zusammenhang zwischen der Schubspannung am Ort des Schubbruchs τ_{Riss} und der Trägerhöhe h lässt sich beschreiben mit der Funktion:

$$\tau_{\text{Riss}} = 35 \cdot h^{-0.21}.$$

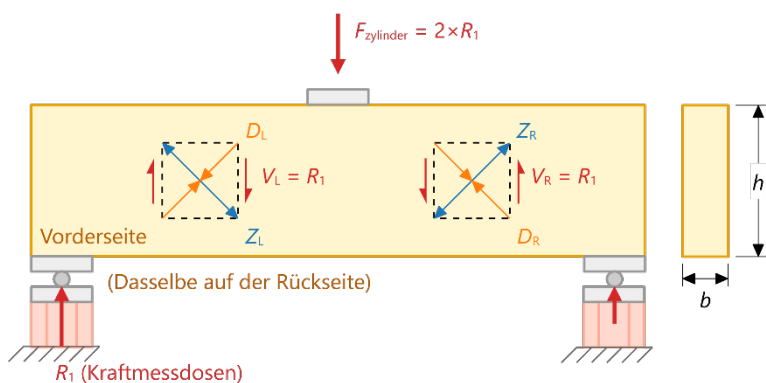
Der Zusammenhang lässt sich auch als Funktion der Referenzträgerhöhe von $h = 600$ mm formulieren:

$$\tau_{\text{Riss}} = 35 \cdot h^{-0.21} = \underbrace{9.1}_{\left(\frac{35}{600^{0.21}}\right)} \left(\frac{600}{h}\right)^{0.21}.$$

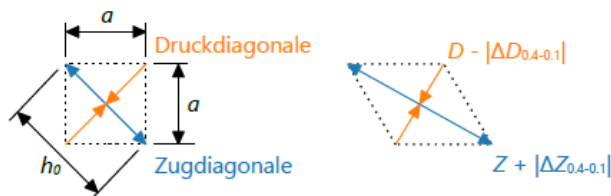
Im Mittel über alle Versuche betrug die Schubspannung am Ort des Schubbruchs $\tau_{\text{Riss}} = 9.2 \text{ N/mm}^2$, der Variationskoeffizient im Mittel 16%.

7.3 Schubmoduln

Die Schubmoduln wurden, wie in der Abb. 21 dargestellt, berechnet. Die Tabelle 6 enthält die aus den Messungen abgeleiteten Schubmoduln. Die kursiv gedruckten Schubmoduln wurden aus Daten der Bildkorrelationsmessung ermittelt.



Berechnung des Schubmoduls G



$$G = \frac{(G_{\text{Links,Vorderseite}} + G_{\text{Links,Rückseite}} + G_{\text{Rechts,Vorderseite}} + G_{\text{Rechts,Rückseite}})}{4}$$

$$G_{\text{L/R/V/R}} = \alpha \frac{h_0}{b \cdot h} \frac{V_{0.4} - V_{0.1}}{\underbrace{|\Delta Z_{0.4-0.1}| + |\Delta D_{0.4-0.1}|}_{L_{\text{R/V/R}}}}$$

mit:

$$\alpha = \frac{3}{2} - \frac{h_0^2}{4 \cdot h^2} \quad \text{nach EN 408, 11.2.3(7)}$$

h_0 ursprüngliche Länge der Messdiagonale
 $b \cdot h$ Querschnittabmessungen
 $V_{0.4} - V_{0.1}$ Schubkraft im jew. Bereich bei Laststufe 0.1 und 0.4

Abb. 21: Ermittlung der Schubmoduln aus den Messungen der Längenveränderungen der Diagonalen der Messkreuze. Zahlenwerte siehe Tabelle 6.

Die Versuchsergebnisse (Mittelwerte) sind in der Abb. 22 dargestellt. Im Mittel über alle Versuche betrug der Schubmodul 1159 N/mm^2 , der Variationskoeffizient im Mittel 14%. Wie die Abb. 23 zeigt und wie dies auch zu erwarten war, ist der Schubmodul nicht abhängig von der Grösse des Prüfkörpers bzw. von dessen geometrischen Abmessungen. Die Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeiten der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze sind im Anhang A zu diesem Teil 4 des Berichts zu finden.

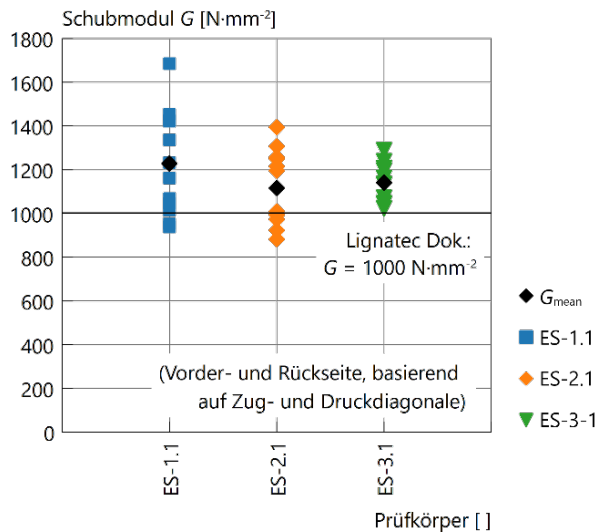
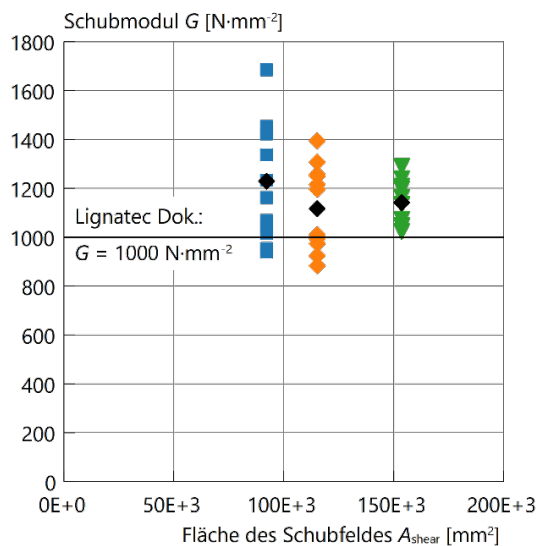
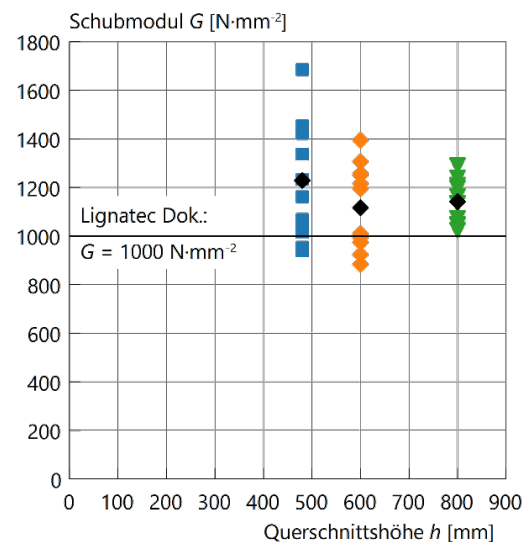


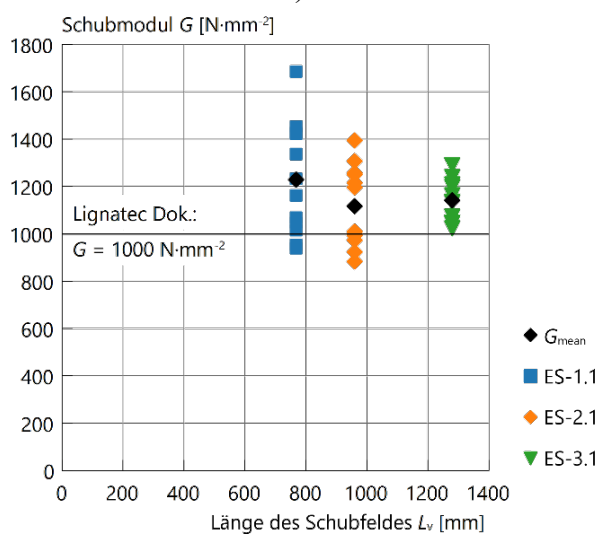
Abb. 22: In den 3-Punkt-Biegeversuchen an Eschen-BSH ermittelte Schubmoduln (Mittelwerte sämtlicher Messungen pro Träger).



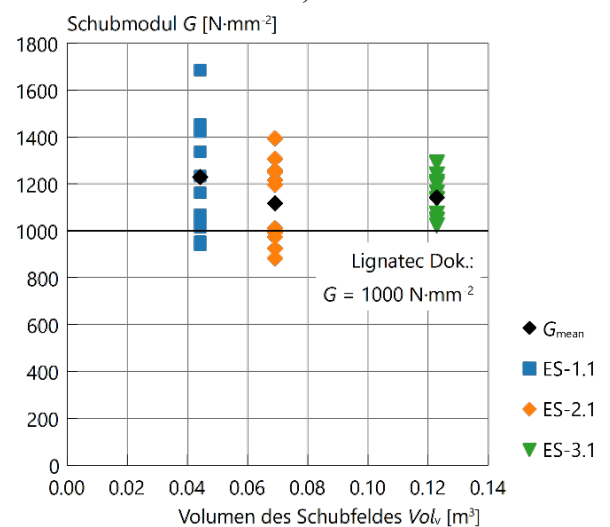
a)



b)



c)



d)

Abb. 23: Schubmoduln in Funktion der Fläche des Schubfelds (a), der Querschnittshöhe (b), der Länge des Schubfelds (c) und dem Volumen des Schubfelds (d).

Tabelle 6: Schubmoduln

Prüfkörper			Schubmodul					Variations-Koeffizient []
			G_V	G_R	$G_{V-R,mean}$	G_{mean}	G_{SD}	
			Vorderseite [N/mm ²]	Rückseite [N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	
ES-1.1	ES-1.1_PK1	GL 40c	1057.5	1556.2	1307			
	ES-1.1_PK2	GL 40c	946.1	1437.8	1192	1228	237	19%
	ES-1.1_PK3	GL 40c	1088.5	1284.6	1187			
ES-2.1	ES-2.1_PK1	GL 40c	948.2	1251.4	1100			
	ES-2.1_PK2	GL 40c	937.8	1325.5	1132	1117	171	15%
	ES-2.1_PK3	GL 40c	1004.9	1232.7	1119			
ES-3.1	ES-3.1_PK1	GL 40c	1090.0	1264.8	1177			
	ES-3.1_PK2	GL 40c	1058.6	1180.5	1120	1132	88	8%
	ES-3.1_PK3	GL 40c	1023.3	1172.1	1098			

8 Fazit

Aus den 3-Punkt-Biegeversuchen an den Eschen-BSH-Trägern können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- 3-Punkt-Biegeversuche stellen eine verhältnismässig einfach zu realisierende, zu bedienende und auszuwertende Prüfkfiguration dar.
- Für eine Schubfeldgrösse von $\alpha = 1.6$ ergaben sich ausschliesslich Schubbrüche, sofern darauf geachtet wird, dass die Lamellen in der Biegezugzone der Prüfkörper eine gute Qualität und keine Keilzinkungen aufweisen. Bei einer Schubfeldgrösse von $\alpha = 1.6$ weisen die Prüfkörper mit Längen von ca. 1.90 m (Trägerhöhe $h = 480$ mm), ca. 2.30 m ($h = 600$ mm) und ca. 2.90 m ($h = 800$ mm) nicht zu grosse und doch praxisgerechte Abmessungen auf. Allerdings sind die zur Erzeugung der Schubbrüche notwendigen Kräfte (Einzellast in Trägermitte) mit ca. 750 kN (Trägerhöhe $h = 480$ mm), ca. 1000 kN ($h = 600$ mm) und ca. 1250 kN ($h = 800$ mm) hoch.
- Durch Verstärkung der Krafteinleitungszonen mit eingeklebten Gewindestangen und Vollgewindeschrauben ist es möglich, Kräfte von mindestens 1250 kN in die Prüfkörper einzuleiten, ohne dass Querdruckversagen im Holz auftritt. Im vorliegenden Fall wurden Gewindestangen System GSA® $\varnothing 20$ mm und Vollgewindeschrauben $\varnothing 10$ mm eingesetzt. Details zu den Verstärkungen sind im Abschnitt 5 beschrieben.
- Der Mittelwert des Schubmoduls betrug 1159 N/mm^2 , der Variationskoeffizient 14%. Der Schubmodul ist unabhängig von Grösse und den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers.
- Der Mittelwert der Schubfestigkeit betrug $f_{v,mean} = 10.2 \text{ N/mm}^2$, der Variationskoeffizient 14%. Die Schubfestigkeit ist abhängig von der Grösse bzw. den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers. Es wurden die folgenden Zusammenhänge ermittelt:
 - Zwischen der Schubfestigkeit und der Fläche des Schubfeldes:

$$f_v = 92 \cdot A_{shear}^{-0.19}$$

- Zwischen der Schubfestigkeit und der Trägerhöhe:
$$f_v = 34 \cdot h^{-0.19} \quad \text{bzw.} \quad f_v = 10.2 \left(\frac{600}{h} \right)^{0.19}.$$
- Der Mittelwert der Schubspannung am Ort des Schubbruchs betrug $\tau_{\text{Riss,mean}} = 9.2 \text{ N/mm}^2$, der Variationskoeffizient 16%. Die Schubspannung am Ort des Schubbruchs ist abhängig von der Grösse bzw. den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers. Es wurden die folgenden Zusammenhänge ermittelt:
 - Zwischen der Schubspannung am Ort des Schubbruchs und der Fläche des Schubfeldes:
$$\tau_{\text{Riss}} = 106 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.21}$$
 - Zwischen der Schubspannung am Ort des Schubbruchs und der Trägerhöhe:
$$\tau_{\text{Riss}} = 35 \cdot h^{-0.21} \quad \text{bzw.} \quad \tau_{\text{Riss}} = 9.1 \left(\frac{600}{h} \right)^{0.21}.$$

FESTLEGUNG DER SCHUBSTEIFIGKEIT UND SCHUBFESTIGKEIT VON TRÄGERN, INSB. AUS LAUBHOLZ-BSH

**Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz
Projekt 2019.10**

Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Wald
und
Konferenz für Wald, Wildtiere und Landschaft KWL

Schlussbericht

Anhang A zum Teil 4

Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeit der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze

Pedro Palma
Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen, 8600 Dübendorf

Inhaltsverzeichnis

A.1	ÜBERSICHTSTABELLE	86
A.2	LAST-VERSCHIEBUNGS-KURVEN UND STEIFIGKEITEN	87
A.2.1	VERSUCHSREIHE ES-1.1.....	87
A.2.2	VERSUCHSREIHE ES-2.1.....	88
A.2.3	VERSUCHSREIHE ES-2.2.....	89

A.1 Übersichtstabelle

Die Steifigkeiten der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Steifigkeit der Zug- und Druckdiagonalen in den Messkreuzen.

Prüfkörper		$K_{\text{Zug,mean}}$ [kN/mm ²]	Steifigkeit		
			$K_{\text{Druck,mean}}$ [kN/mm ²]	$K_{\text{Zug,mean}}/K_{\text{Druck,mean}}$ [kN/mm ²]	
ES-1	PK1	316.5	311.3	284.1	0.90
	PK2	304.1		261.4	0.86
	PK3	313.4		278.7	0.89
ES-2	PK1	282.3	288.7	248.5	0.88
	PK2	287.2		256.8	0.89
	PK3	296.5		260.4	0.88
ES-3	PK1	306.9	293.2	277.7	0.90
	PK2	283.2		264.1	0.93
	PK3	289.5		260.2	0.90

A.2 Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeiten

A.2.1 Versuchsreihe ES-1.1

Die Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeiten der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze sind in Abb. 1 dargestellt. Die dargestellten Kurven sind Mittelwerte der Zug- oder Druckdiagonalen (auf der Vorder- und Rückseite sowie auf der linken und rechten Seite).

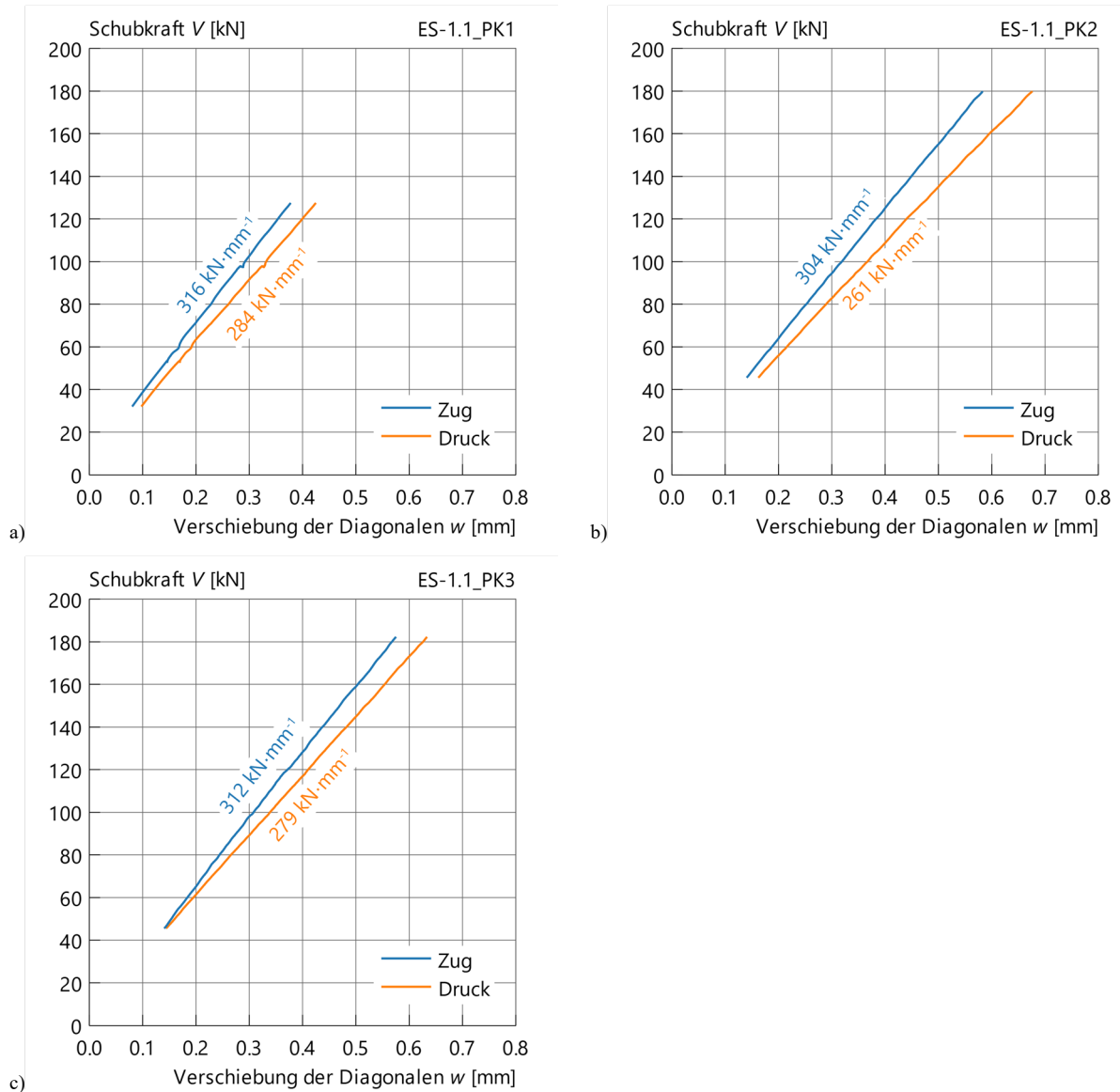


Abb. 1: Last-Verschiebungs-Kurven der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze: a) Prüfkörper ES-1.1_PK1, b) ES-1.1_PK2; c) ES-1.1_PK3.

A.2.2 Versuchsreihe ES-2.1

Die Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeiten der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze sind in Abb. 2 dargestellt. Die dargestellten Kurven sind Mittelwerte der Zug- oder Druckdiagonalen (auf der Vorderseite und auf der Rückseite).

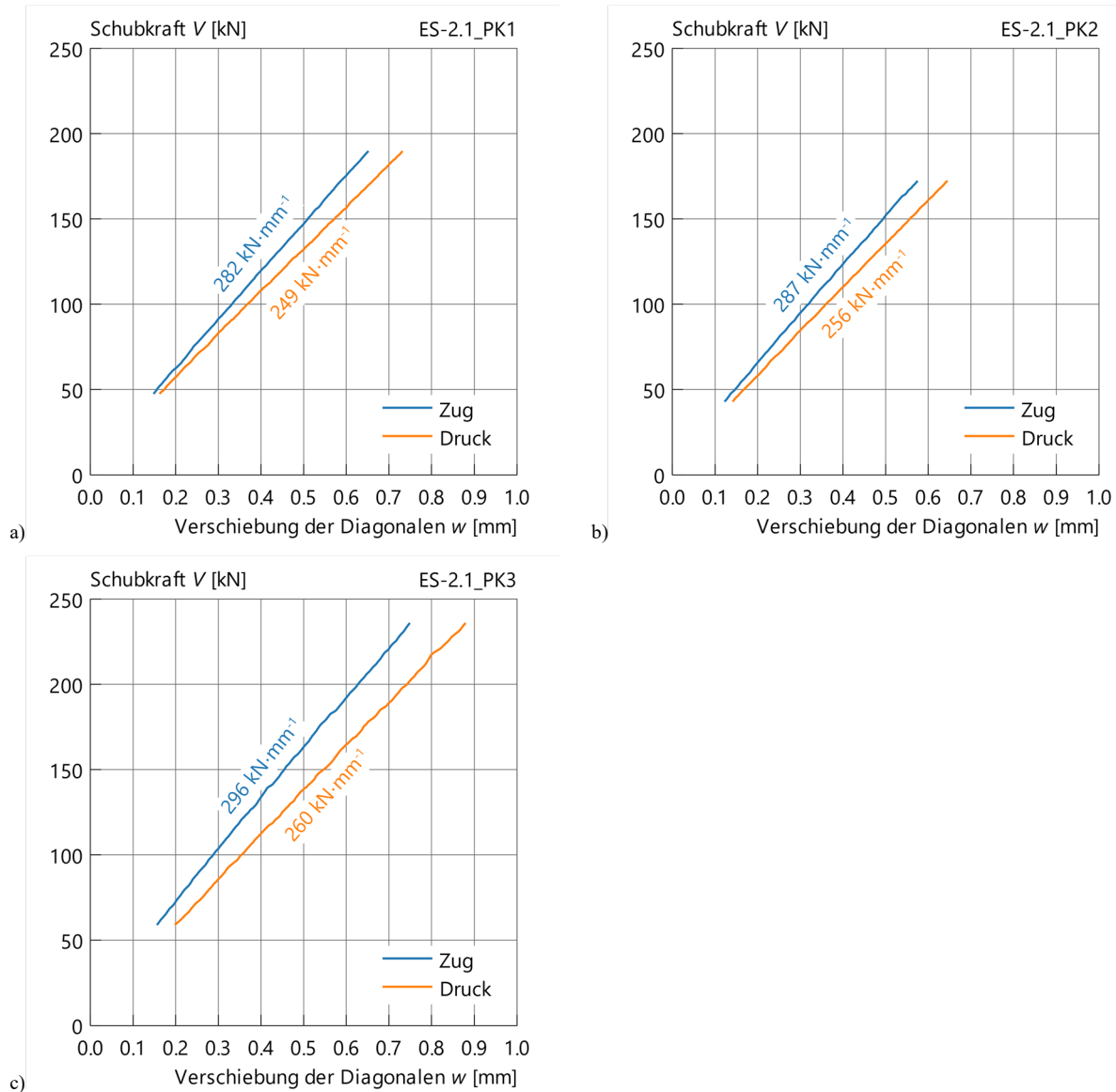


Abb. 2: Last-Verschiebungs-Kurven der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze: a) Prüfkörper ES-2.1_PK1, b) ES-2.1_PK2; c) ES-2.1_PK3.

A.2.3 Versuchsreihe ES-2.2

Die Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeiten der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze sind in Abb. 3 dargestellt. Die dargestellten Kurven sind Mittelwerte der Zug- oder Druckdiagonalen (auf der Vorderseite und auf der Rückseite).

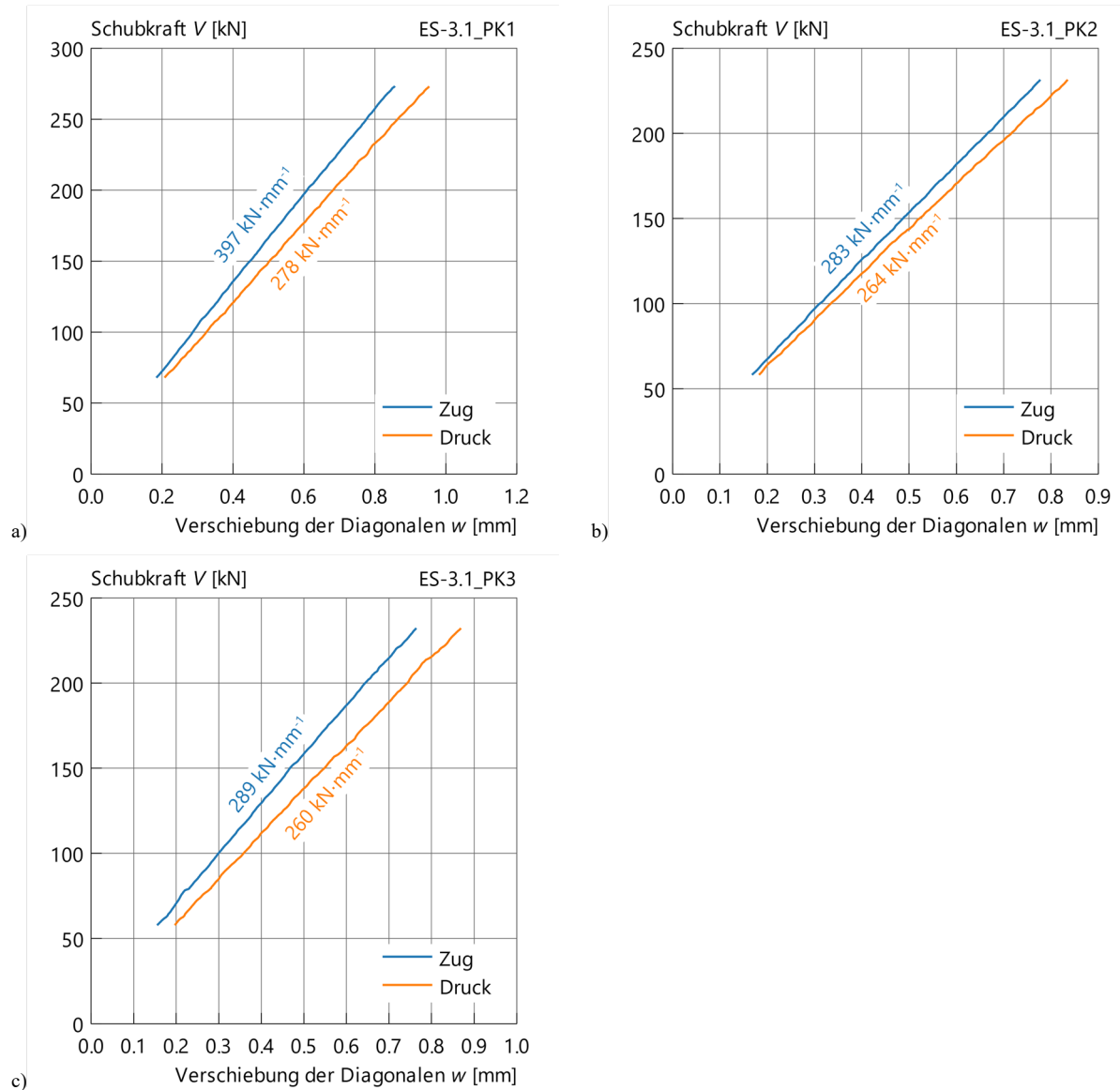


Abb. 3: Last-Verschiebungs-Kurven der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze: a) Prüfkörper ES-3.1_PK1, b) ES-3.1_PK2; c) ES-3.1_PK3.

FESTLEGUNG DER SCHUBSTEI- FIGKEIT UND SCHUBFESTIG- KEIT VON TRÄGERN, INSB. AUS LAUBHOLZ-BSH

**Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz
Projekt 2019.10**

Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Wald
und
Konferenz für Wald, Wildtiere und Landschaft KWL

Schlussbericht Teil 5 4-Punkt-Biegeversuche an Eschen-BSH

Pedro Palma und René Steiger
Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen, 8600 Dübendorf

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	94
2	MATERIAL	94
3	DIMENSIONIERUNG DES PRÜFAUFBAUS	94
4	ABMESSUNGEN UND ANZAHL DER PRÜFKÖRPER	95
5	VERSTÄRKUNG DER KRAFTEINLEITUNGSZONEN DER PRÜFKÖRPER	97
6	VERSUCHE	98
6.1	VERSUCHSAUFBAU	98
6.2	MESSGRÖSSEN	99
6.3	BELASTUNGSPROGRAMM	102
7	ERGEBNISSE	103
7.1	MASSEN UND ROHDICHTEN	103
7.2	BRUCHVERSUCHE	104
7.3	ABHÄNGIGKEIT VON SCHUBFESTIGKEIT UND SCHUBSPANNUNG AM ORT DES SCHUBBRUCHS VON DEN GEOMETRISCHEN ABMESSUNGEN DER PRÜFKÖRPER	107
7.4	SCHUBMODULN	111
8	FAZIT	114

1 Einleitung

Im Rahmen der Hauptversuche wurden 4-Punkt-Biegeversuche an 26 Eschen-BSH-Trägern der Festigkeitsklassen GL 40c und GL 48c mit einer Höhe von 480, 600 und 800 mm und α -Werten (= Verhältnis der Länge des Schubfeldes zur Trägerhöhe) von 1.2, 1.6, 2.0 und 2.5 durchgeführt, um die Vergleichbarkeit mit Ergebnissen aus 3-Punkt-Biegeversuchen an Fichten- und Eschen-BSH-Trägern (siehe Teile 3 und 4 des Berichts) zu ermöglichen.

2 Material

Die Eschenbretter, welche zur Herstellung der BSH-Träger verwendet wurden, wiesen eine Dicke von 44 mm auf und wurden durch die Neue Holzbau AG beim Sägewerk Beer in Meiringen eingekauft. Etwa 2/3 der Lamellen stammten aus dem Kanton Obwalden, der Rest aus der Region Meiringen. Die Bretter wurden gemäss den Festigkeitssortierregeln der Neuen Holzbau AG sortiert. Die Sortierung erfolgte visuell unter Erfassung der Merkmale Schnittart, Äste (Grösse und Lage), Rindeneinwuchs, Schrägfasrigkeit, Risse und Jahrringbreite. Zur Klassierung der Bretter in Zugfestigkeitsklassen (T-Klassen) wurde zusätzlich ein TimberGrader (Brookhuis) eingesetzt, mit welchem der dynamische E-Modul der einzelnen Bretter bestimmt wurde. Die Rohdichte war kein Einzelkriterium bei der Sortierung, wurde jedoch bei der Berechnung des dynamischen E-Moduls berücksichtigt.

Die Prüfkörper der Typen ES-1.3, ES-1.4, ES-2.2, ES-2.3, ES-2.4, ES-3.2 und ES-3.3 wurden durch die Neue Holzbau AG als kombinierte Eschen-BSH-Träger der Festigkeitsklasse GL 40c hergestellt, die Prüfkörper des Typs ES-2.5 als kombinierte Eschen-BSH-Träger der Festigkeitsklasse GL 48c "Spezial". "Spezial" bedeutet, dass sämtliche Träger jeweils 3 Lamellen der Festigkeitsklasse T50 (charakteristischer Wert der Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung $f_{t,0,k} = 50 \text{ N/mm}^2$) ohne Keilzinkenstösse auf der Biegezugseite im Bereich der Trägermitte aufwiesen, um zu verhindern, dass die Träger auf Biegung versagen, bevor ein Schubbruch eintritt. Die restlichen Lamellen in den Prüfkörpern entsprachen der Festigkeitsklasse T33 (charakteristischer Wert der Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung $f_{t,0,k} = 33 \text{ N/mm}^2$). Die Lamellendicke betrug bei sämtlichen Prüfkörpern 40 mm. Zur Herstellung der 8 Prüfkörpertypen waren also 12 ($h = 480 \text{ mm}$), bzw. 15 ($h = 600 \text{ mm}$), bzw. 20 Lamellen ($h = 800 \text{ mm}$) nötig.

Die Keilzinkenstösse wurden mit dem Henkel-1K-PUR-Klebstoff Loctite HB S109 verklebt und die Flächenverklebung der Lamellen erfolgte mit dem Henkel-1-K-PUR-Klebstoff Loctite HB S709 bei einer Holzfeuchte von 10% unter Anwendung eines Primers.

Die Prüfkörper wurden eingepackt in luftdichte Kunststoff-Folie an die Empa geliefert. Die Kunststoff-Folie wurde in der Regel erst kurz vor dem Versuch entfernt. An 8 Prüfkörpern waren Vorbereitungsarbeiten für die Dehnungsmessung mittels Bildkorrelation (Digital Image Correlation DIC) nötig. Diese Arbeiten wurden in einem Klimaraum bei einer Raumtemperatur von 22° C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50% durchgeführt. Sämtliche Prüfkörper wiesen zum Zeitpunkt des Versuchs eine Holzfeuchte von 10% auf.

3 Dimensionierung des Prüfaufbaus

Zur Dimensionierung der Prüfeinrichtung (Krafteinleitungsrahmen, Auflager, Hydraulik-Zylinder, Kipphalterungen) und der Verstärkungen der Auflager- und Krafteinleitungszonen der Träger wurde eine Schubfestigkeit (Maximalwert) von 13 N/mm^2 angenommen.

4 Abmessungen und Anzahl der Prüfkörper

Die in den Versuchen geprüften Eschen-BSH-Träger sind vergleichend in der Abb. 1 dargestellt, Detailpläne finden sich in Abb. 2 bis Abb. 9. Mit Ausnahme der Prüfserie ES-2.3, wo 5 Prüfkörper geprüft wurden, wurden von jedem Trägertyp 3 Prüfkörper geprüft. Die Abmessungen der Schubfelder sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

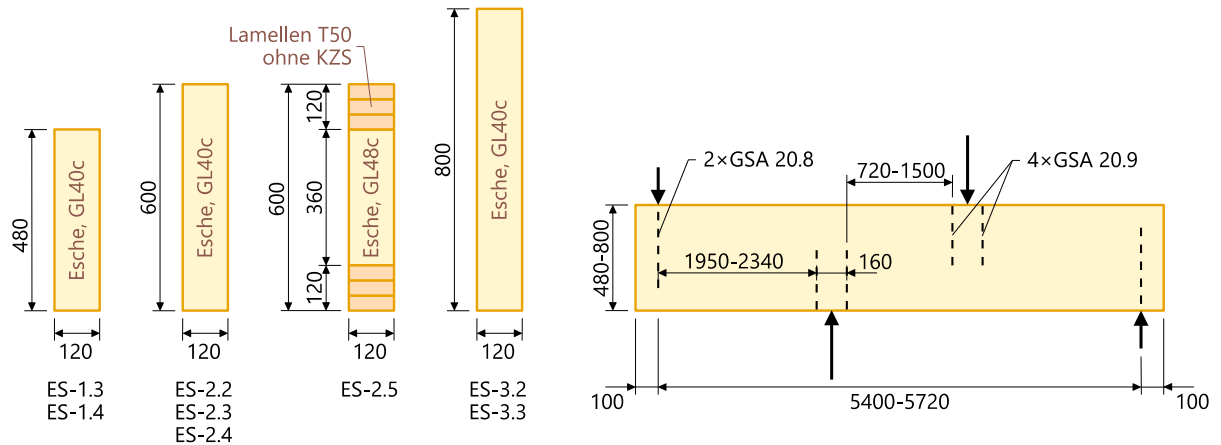


Abb. 1: Überblick über die untersuchten Eschen-BSH-Prüfkörper mit Trägerhöhen 480, 600 und 800 mm und Längen von 5600 und 5920 mm.

Tabelle 1: Geometrische Abmessungen der Träger und der Schubfelder der Träger.

Prüfkörper		Balkenbreite	Balkenhöhe	Länge des Schubfeldes	Verhältnis $\alpha = L_v / h$	Fläche des Schubfeldes	Volumen des Schubfeldes
		b	h	L_v	α	A_{shear}	Vol_v
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm/mm]	[mm ²]	[m ³]
ES-1.3	GL 40c, ×3	120	480	768	1.6	92160	0.044
ES-1.4	GL 40c, ×3	120	480	960	2.0	115200	0.055
ES-2.2	GL 40c, ×3	120	600	720	1.2	86400	0.052
ES-2.3	GL 40c, ×5	120	600	960	1.6	115200	0.069
ES-2.4	GL 40c, ×3	120	600	1200	2.0	144000	0.086
ES-2.5	GL 48c, ×3	120	600	1500	2.5	180000	0.108
ES-3.2	GL 40c, ×3	120	800	960	1.2	115200	0.092
ES-3.3	GL 40c, ×3	120	800	1280	1.6	153600	0.123

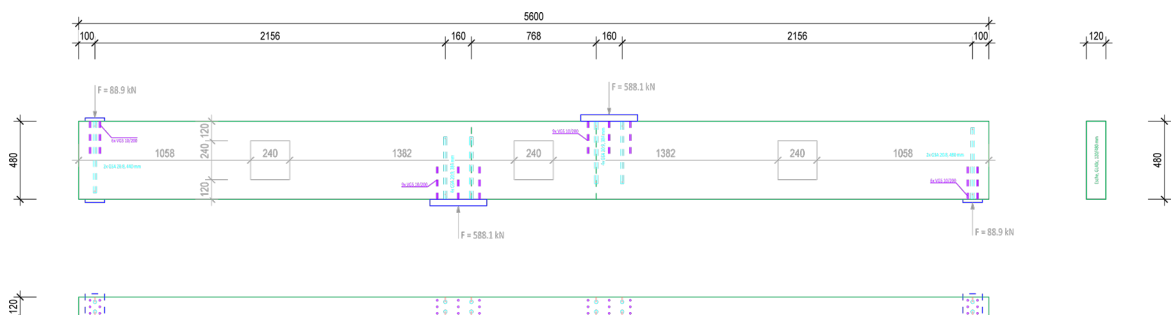


Abb. 2: Prüfkörper des Typs ES-1.3: Breite 120 mm, Höhe 480 mm, Länge 5600 mm, Länge des inneren Schubfeldes 768 mm. Es wurden 3 Prüfkörper dieses Typs geprüft.

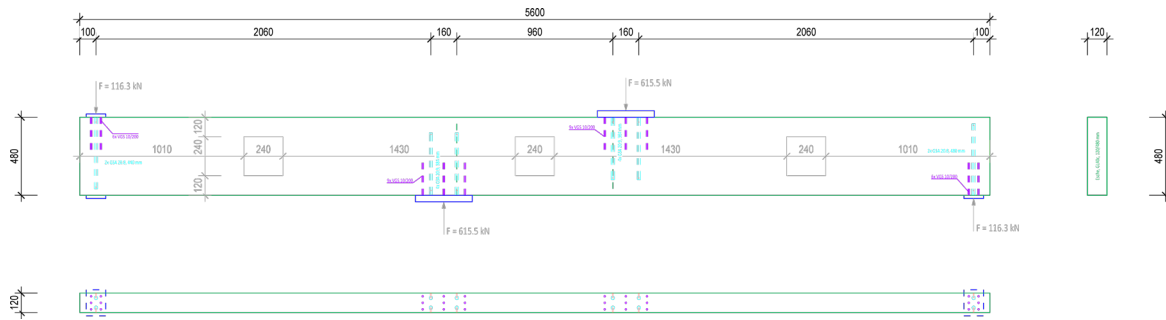


Abb. 3: Prüfkörper des Typs ES-1.4: Breite 120 mm, Höhe 480 mm, Länge 5600 mm, Länge des inneren Schubfeldes 960 mm. Es wurden 3 Prüfkörper dieses Typs geprüft.

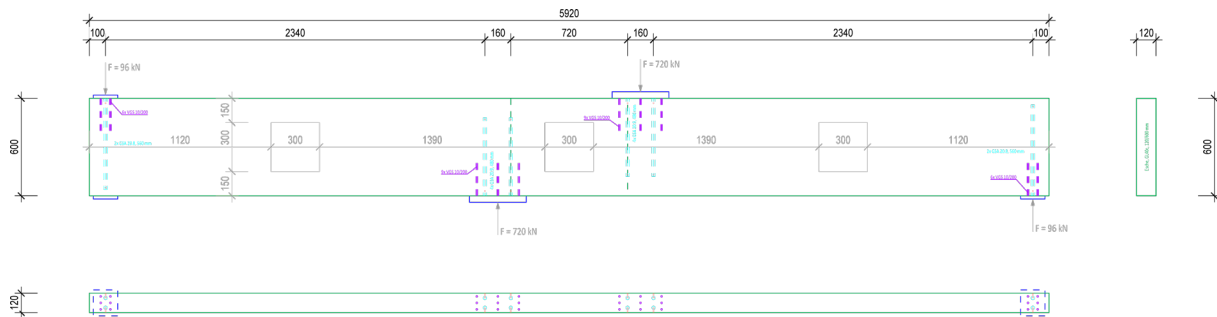


Abb. 4: Prüfkörper des Typs ES-2.2: Breite 120 mm, Höhe 600 mm, Länge 5920 mm, Länge des inneren Schubfeldes 720 mm. Es wurden 3 Prüfkörper dieses Typs geprüft.

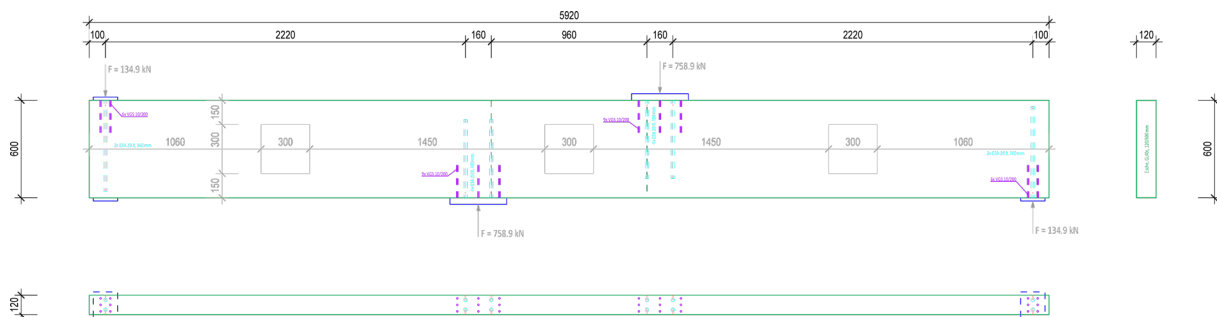


Abb. 5: Prüfkörper des Typs ES-2.3: Breite 120 mm, Höhe 600 mm, Länge 5920 mm, Länge des inneren Schubfeldes 960 mm. Es wurden 5 Prüfkörper dieses Typs geprüft.

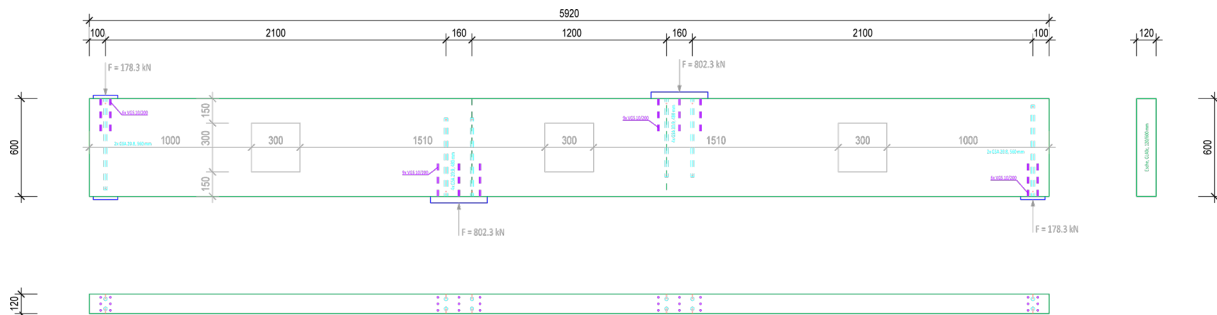


Abb. 6: Prüfkörper des Typs ES-2.4: Breite 120 mm, Höhe 600 mm, Länge 5920 mm, Länge des inneren Schubfeldes 1200 mm. Es wurden 3 Prüfkörper dieses Typs geprüft.

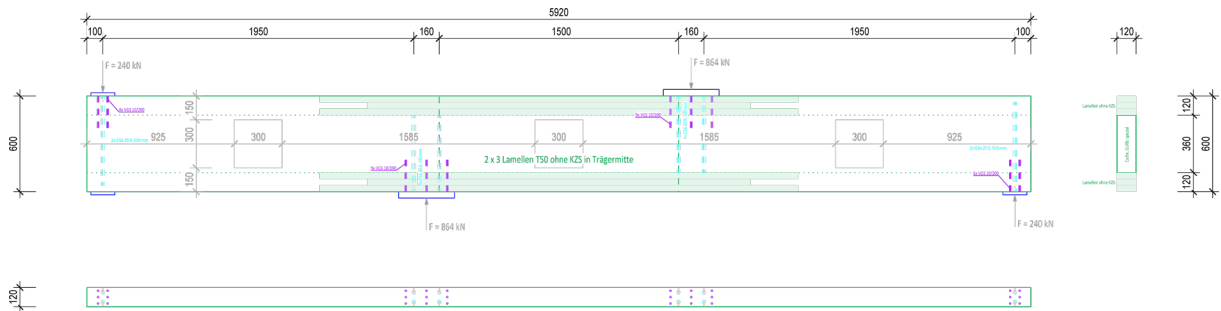


Abb. 7: Prüfkörper des Typs ES-2.5: Breite 120 mm, Höhe 600 mm, Länge 5920 mm, Länge des inneren Schubfeldes 1500 mm. Es wurden 3 Prüfkörper dieses Typs geprüft.

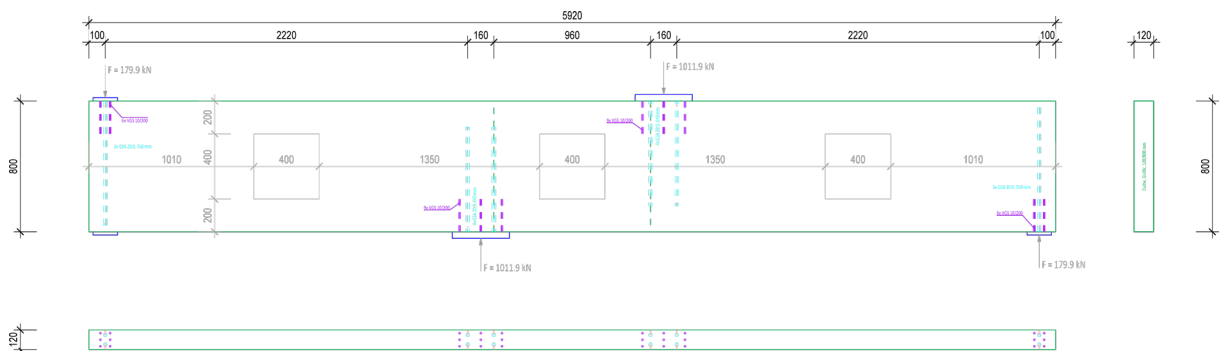


Abb. 8: Prüfkörper des Typs ES-3.2: Breite 120 mm, Höhe 800 mm, Länge 5920 mm, Länge des inneren Schubfeldes 960 mm. Es wurden 3 Prüfkörper dieses Typs geprüft.

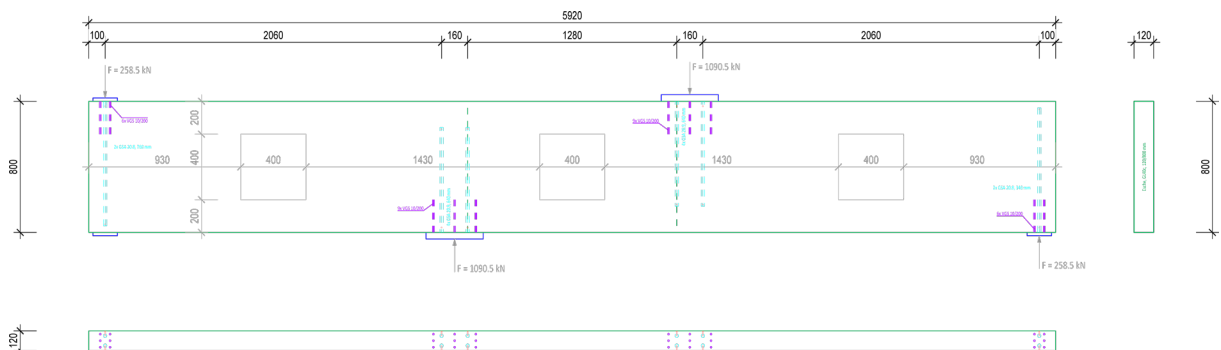


Abb. 9: Prüfkörper des Typs ES-3.3: Breite 120 mm, Höhe 800 mm, Länge 5920 mm, Länge des inneren Schubfeldes 1280 mm. Es wurden 3 Prüfkörper dieses Typs geprüft.

5 Verstärkung der Krafteinleitungszonen der Prüfkörper

Um bei den Lasteinleitungsstellen die hohen Kräfte in die Träger einleiten zu können, ohne dass das Holz in den Krafteinleitungszonen wegen übermässiger Beanspruchung auf Druck rechtwinklig zur Faserrichtung versagt, wurden die Krafteinleitungszonen durch die Neue Holzbau AG verstärkt. Die Verstärkungen sind im Aufriss in Abb. 2 bis Abb. 9 mit hellblauer (eingeklebte Gewindestangen System GSA®) bzw. violetter Farbe (Vollgewindeschrauben) dargestellt und im Grundriss in der Abb. 10. Es waren die folgenden Verstärkungen nötig:

Prüfkörper Typen ES-1.3 und ES-1.4 ($h = 480 \text{ mm}$):

- Äussere Lastpunkte: 2 GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8.8, $L = 480 \text{ mm}$ & 6 VGS $\varnothing 10 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$
- Innere Lastpunkte: 4 GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 12.9, $L = 384 \text{ mm}$ & 9 VGS $\varnothing 10 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$

Prüfkörper Typen ES-2.2, 2.3, 2.4, und ES-2.5 ($h = 600$ mm):

- Äussere Lastpunkte: 2 GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8,8, $L = 560$ mm & 6 VGS $\varnothing 10$ mm, $L = 200$ mm
- Innere Lastpunkte: 4 GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 12.9, $L = 480$ mm & 9 VGS $\varnothing 10$ mm, $L = 200$ mm

Prüfkörper Typen ES-3.2, und ES-3.3 ($h = 800$ mm):

- Äussere Lastpunkte: 2 GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 8,8, $L = 760$ mm & 6 VGS $\varnothing 10$ mm, $L = 200$ mm
- Innere Lastpunkte: 4 GSA $\varnothing 20$, Festigkeit 12.9, $L = 640$ mm & 9 VGS $\varnothing 10$ mm, $L = 200$ mm

Typ 1: Endauflager

2 GSA 20.8 + 6 VGS 10/200

Typ 2: Mittelaflager

4 GSA 20.9 + 9 VGS 10/200

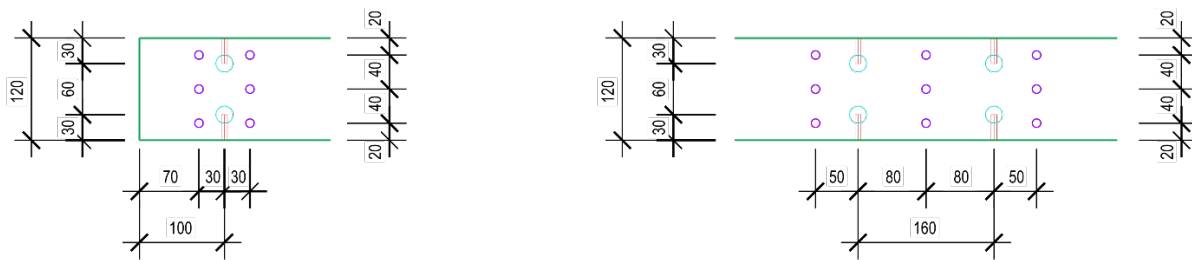


Abb. 10: Verstärkung der Krafteinleitungszonen mit eingeklebten Gewindestangen System GSA® und Vollgewindeschrauben zur Verhinderung von Querdruckversagen im Holz.

6 Versuche

6.1 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden auf dem grossen Aufspannfeld der Empa in Dübendorf durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 11 und Abb. 12 dargestellt. Details zum Kräftegleichgewicht vor und während der Versuche sind im Anhang B zu diesem Teil 5 des Berichts zu finden.

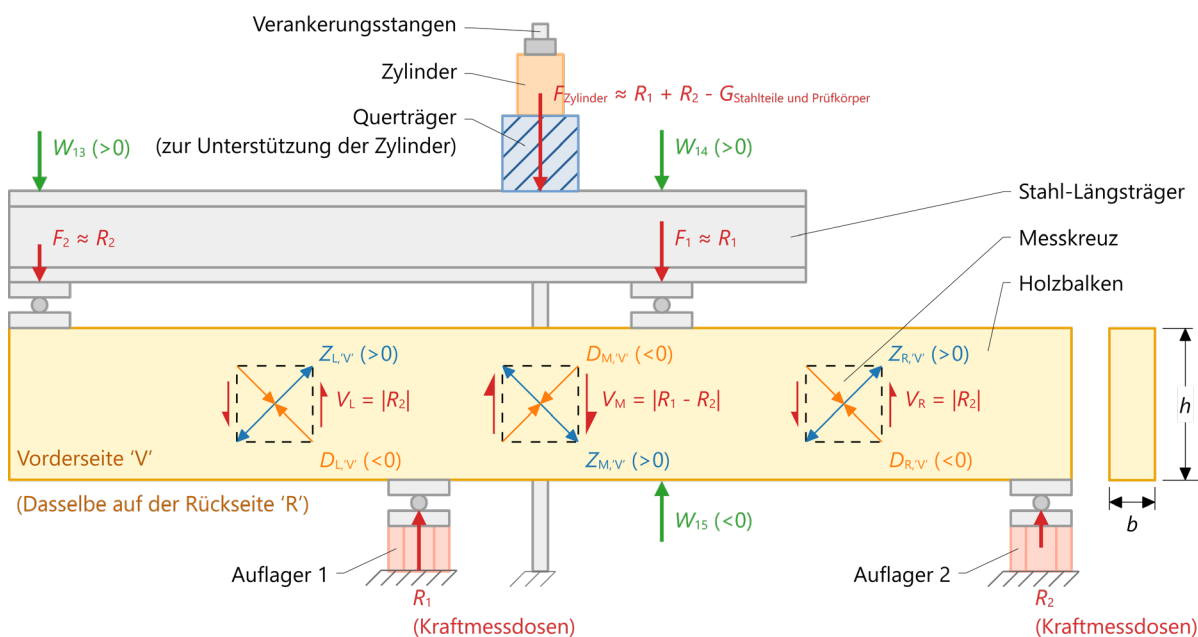


Abb. 11: Versuchsaufbau an der Empa für die 4-Punkt-Biegeversuche an Eschen-BSH. Externe Kräfte sind mit "F" oder "R" dargestellt, Schub-Schnittkräfte mit "V", vertikale Verschiebungen mit "W" und Verschiebungen in den Schubfelddiagonalen mit "Z" oder "D" (Zug oder Druck).

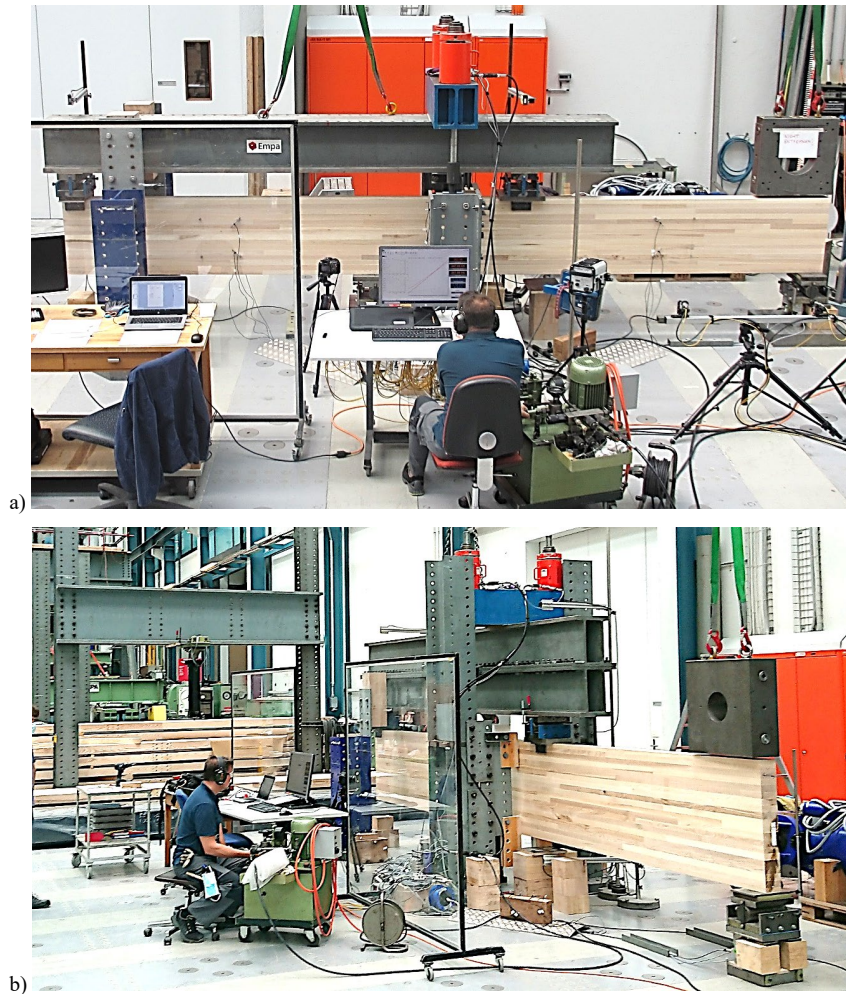


Abb. 12: Versuchsaufbau an der Empa für die 4-Punkt-Biegeversuche an Eschen-BSH: a) Versuchs-Typ ES-3.1 und ES-3.2; b) Versuchs-Typ 3.3.

6.2 Messgrößen

Es wurden die folgenden Parameter bestimmt bzw. gemessen:

Vor dem Versuch:

- Abmessungen der Prüfkörper
- Geometrie des Prüfaufbaus (Kontrolle)
- Masse

Während des Versuchs:

- Zylinderkraft (Öldruckmessung)
- Kraft an beiden Auflagern (2×3 Kraftmessdosen) (siehe Abb. 13)
- Durchbiegung des zur Krafteinleitung eingesetzten Stahlträgers oben, auf beiden Lastseiten F_1 und F_2 (siehe Abb. 14)
- Durchbiegung der Unterseite des Trägers auf der Lastseite F_1 (siehe Abb. 14)
- Schubverformungen mit 6 quadratischen Messkreuzen à 2 Wegaufnehmern in den Diagonalen (Abb. 15) (siehe auch Teil 2 des Berichts). Bei einem Prüfkörper pro Serie wurde eines der Messkreuze durch eine Bildkorrelationsmessung ersetzt (Abb. 16).
- Bruchlast
- Art des Versagens (Schubbruch / Biegebruch) und Rissbild

Die Abmessungen und die Positionen der Messkreuze zur Messung der Schubverformungen sind in Abb. 2 bis Abb. 9 und in der Abb. 17 zusammengestellt.

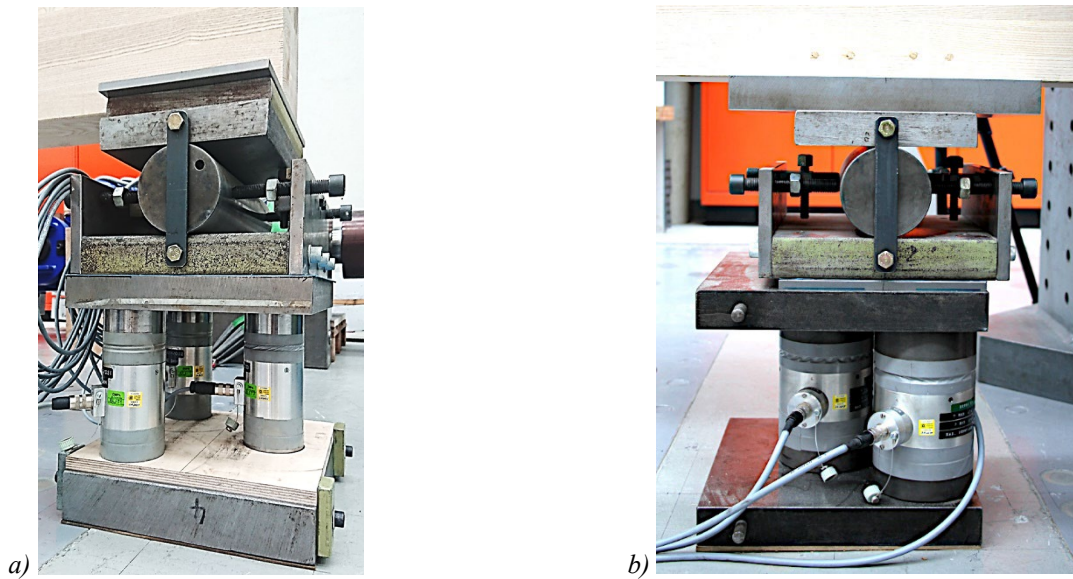


Abb. 13: Detailbild des Auflagers mit Kraftmessdosen: a) Endauflager (Reaktionskraft R_2); b) Mittelaflager (Reaktionskraft R_1).

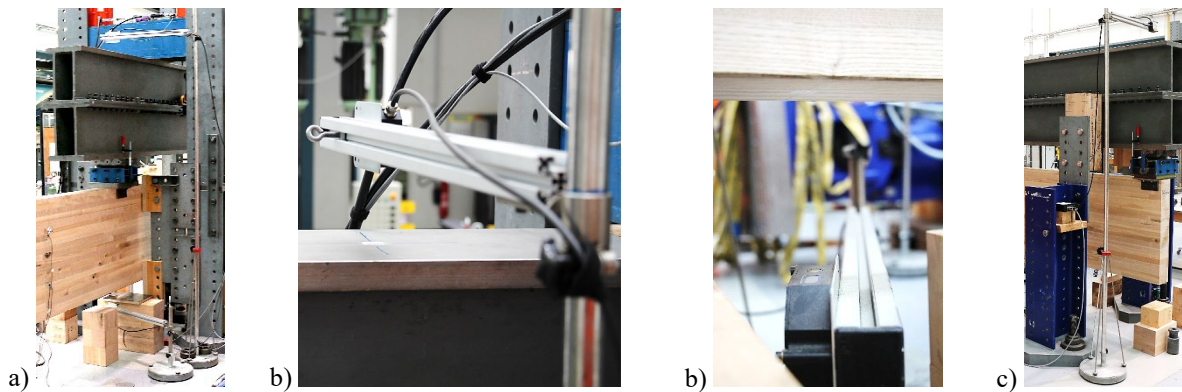


Abb. 14: Gemessene vertikale Verschiebungen: a) Lastseite F_1 (oben und unten); b) Lastseite F_1 (Detail, oben); c) Lastseite F_1 (Detail, unten); c) Lastseite F_2 (oben).

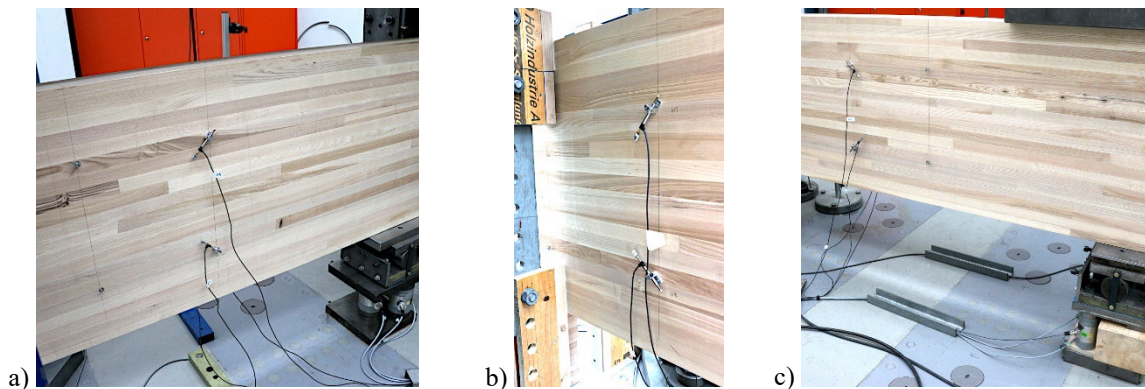


Abb. 15: Messkreuze zur Bestimmung des Schubmoduls: a) Endschubfeld (linke Seite, Vorderseite); c) Mittelschubfeld (Rückseite); c) Endschubfeld (rechte Seite, Vorderseite).

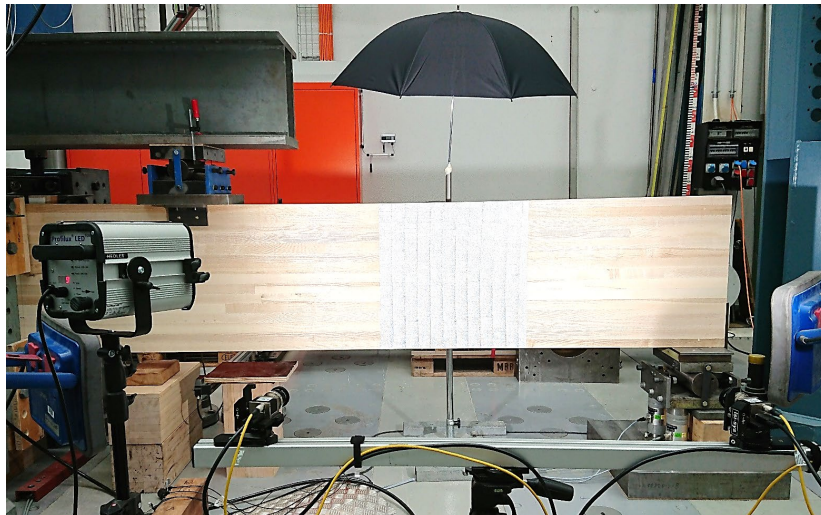


Abb. 16: Messung der Dehnungen, Stauchungen und Verzerrungen mittels Bildkorrelation.

Die Abmessungen und die Positionen der Messkreuze zur Messung der Schubverformungen sind in Abb. 2 bis Abb. 9 und in der Abb. 17 graphisch dargestellt, die Tabelle 1 enthält die zugehörigen Werte der Parameter.

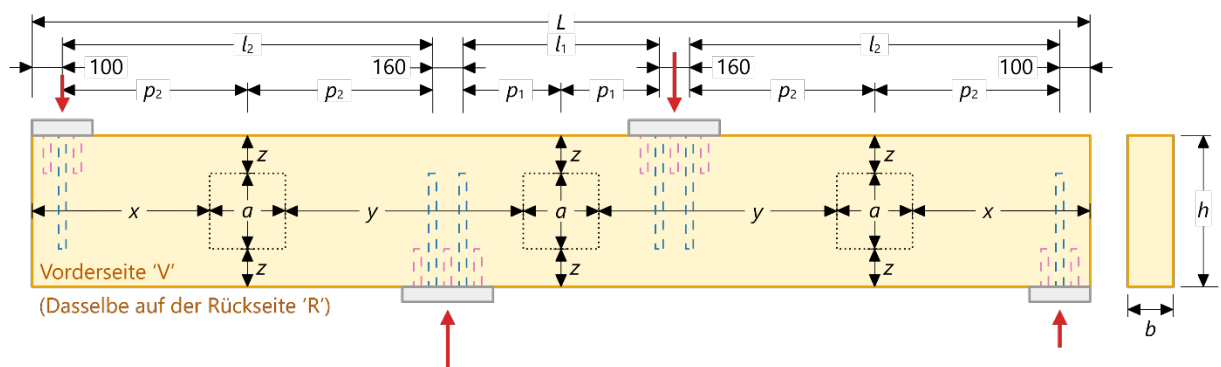


Abb. 17: Abmessungen und der Position der Messkreuze zur Bestimmung des Schubmoduls in parametrisierter Form. Zahlenwerte siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Abmessungen der Prüfkörper und der Felder zur Messung der Schubverformungen. (Definition der Parameter siehe Abb. 17).

PK-Typ	Balken- höhe	Länge				Messkreuze: Abmessungen und Position					
	h	L	l_1	l_2	a	d ¹⁾	p_1	p_2	x	y	z
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
ES-1.3	480	5600	768	2156	240	339	384	1078	1058	1382	120
ES-1.4	480	5600	960	2060	240	339	480	1030	1010	1430	120
ES-2.2	600	5920	720	2340	300	424	360	1170	1120	1390	150
ES-2.3	600	5920	960	2220	300	424	480	1110	1060	1450	150
ES-2.4	600	5920	1200	2100	300	424	600	1050	1000	1510	150
ES-2.5	600	5920	1500	1950	300	424	750	975	925	1585	150
ES-3.2	800	5920	960	2220	400	566	480	1110	1100	1350	200
ES-3.3	800	5920	1280	2060	400	566	640	1030	930	1430	200

¹⁾ Diagonalenlänge

6.3 Belastungsprogramm

Die Abb. 18 und die Tabelle 3 zeigen das angewendete Belastungsprogramm. Die Kraft wurde zunächst bis auf einen Wert von 40% der geschätzten Bruchlast gesteigert und auf diesem Niveau während mindestens 180 sec konstant gehalten. Dann wurde die Kraft auf den Ausgangswert reduziert ("Schubmodulversuch" in Abb. 18). Anschliessend wurden die Daten zum Schubmodul ausgewertet und die Wegaufnehmer bei den 4 Messkreuzen entfernt, um Beschädigungen zu vermeiden. Im letzten Belastungsschritt wurde die Kraft stetig gesteigert, bis sich der Bruch einstellte ("Bruchversuch" in Abb. 18).

Die Belastung erfolgte kraftgesteuert mit einer Hydraulikpumpe, mit manueller Kraftregulierung über ein Ventil. Der zur Messung der Durchbiegung des Prüfkörpers eingesetzte, unterhalb des Trägers positionierte Wegaufnehmer, wurde bei einer Kraft von ca. 50 – 60% der geschätzten Bruchlast entfernt. Die Durchbiegung des zur Krafteinleitung eingesetzten Stahlträgers wurde während der gesamten Versuchsdauer gemessen. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde so geregelt, dass die Bruchlast im Mittel nach ca. 2 Minuten erreicht wurde.

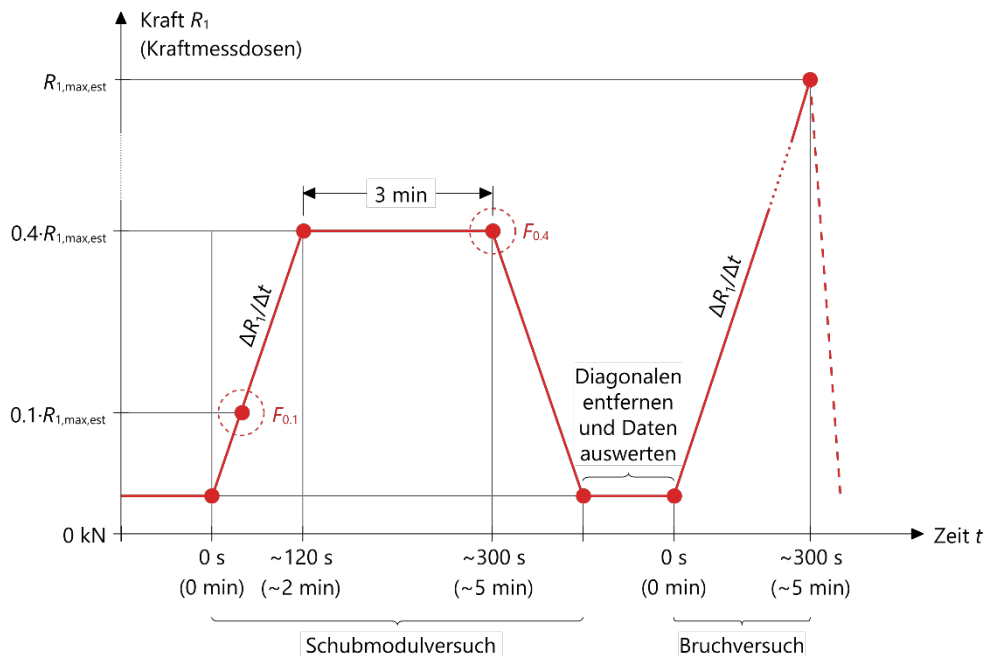


Abb. 18: Belastungsprogramm (graphisch) für die 4-Punkt-Biegeversuche an Eschen-BSH.

Tabelle 3: Belastungsprogramm (Wertetabelle) für die 4-Punkt-Biegeversuche an Eschen-BSH.

Prüfkörper	Geschätzte Schubfestigkeit und Kräfte			Ziel-Belastungsgeschwindigkeit
	$f_{v,est}$ [N/mm ²]	$V_{max,est}$ [kN]	$R_{1,max,est}$ [kN]	$\Delta R_1/\Delta t$ [kN/s]
ES-1.3	13	499	603	2.0
ES-1.4 PK1	10	384	485	1.6
ES-1.4 PK2-3	13	499	630	2.1
ES-2.2	12	576	681	2.3
ES-2.3	12	576	716	2.4
ES-2.4	12	576	756	2.5
ES-2.5	12	576	812	2.7
ES-3.2	10	640	796	2.7
ES-3.3 PK1	12	768	1026	3.7
ES-3.3 PK2-3	10	640	855	2.9

7 Ergebnisse

7.1 Massen und Rohdichten

Die Massen und Rohdichten der Prüfkörper sind in der Tabelle 4 zusammengestellt. Die durchschnittliche Holzfeuchte aller Prüfkörper betrug $\omega_{\text{Holz}} = 10\%$ (der Variationskoeffizient betrug 6.5%) und die durchschnittliche Holzdichte $\rho_{\text{Holz},10\%,\text{mean}} = 664 \text{ kg/m}^3$ (der Variationskoeffizient betrug 2.5%). Das Histogramm der Rohdichte $\rho_{\text{Holz},10\%}$ bei einer Referenz-Holzfeuchte von $\omega = 10\%$ ist in der Abb. 19 dargestellt.

Tabelle 4: Massen und Rohdichten der Eschen-BSH-Träger.

Prüfkörper			Prüfdatum [TT.MM.JJJJ]	Brutto	Stahl		Holz		
				Masse m_{Brutto} [mm ³]	Volumen Vol_{Stahl} [mm ³]	Masse m_{Stahl} [kg]	Masse m_{Holz} [kg]	Feuchte ω_{Holz} [%]	Dichte $\rho_{\text{Holz},10\%}$ [kg/m ³] $\rho_{\text{Holz},10\%,\text{mean}}$ [kg/m ³]
ES-1.3	PK1	GL 40c	27.05.2021	229	2123188	16.7	212	9.9%	663
	PK2	GL 40c	31.05.2021	234			217	9.8%	680
	PK3	GL 40c	26.05.2021	222			205	9.3%	645
ES-1.4	PK1	GL 40c	17.05.2021	225			208	10.2%	649
	PK2	GL 40c	19.05.2021	228			211	10.3%	658
	PK3	GL 40c	20.05.2021	227			210	9.9%	657
ES-2.2	PK1	GL 40c	03.06.2021	297	2549767	20.0	277	9.9%	654
	PK2	GL 40c	07.06.2021	298			278	9.4%	660
	PK3	GL 40c	09.06.2021	305			285	9.9%	673
ES-2.3	PK1	GL 40c	18.06.2021	304			284	9.4%	674
	PK2	GL 40c	21.06.2021	291			271	10.4%	637
	PK3	GL 40c	22.06.2021	308			288	9.8%	681
	PK4	GL 40c	24.06.2021	295			275	11.7%	638
	PK5	GL 40c	29.06.2021	289			269	11.2%	627
ES-2.4	PK1	GL 40c	15.06.2021	300			280	10.1%	660
	PK2	GL 40c	16.06.2021	297			277	8.8%	662
	PK3	GL 40c	11.06.2021	308			288	9.6%	682
ES-2.5	PK1	GL 48c spezial	30.06.2021	297			277	10.7%	649
	PK2	GL 48c spezial	01.07.2021	301			281	10.7%	659
	PK3	GL 48c spezial	05.07.2021	300			280	9.6%	663
ES-3.2	PK1	GL 40c	16.09.2021	411	3260732	25.6	385	9.2%	688
	PK2	GL 40c	20.09.2021	404			378	9.3%	674
	PK3	GL 40c	22.09.2021	411			385	10.0%	682
ES-3.3	PK1	GL 40c	08.09.2021	413			387	10.7%	681
	PK2	GL 40c	10.09.2021	412			386	9.6%	687
	PK3	GL 40c	15.09.2021	404			378	10.2%	668

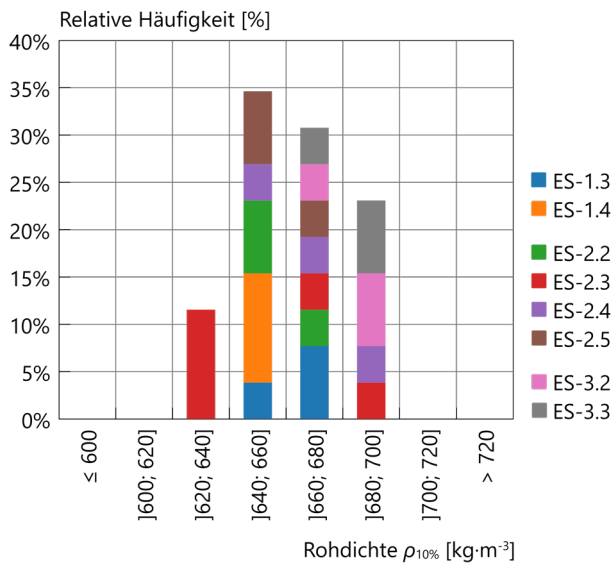


Abb. 19: Histogramme der Rohdichte $\rho_{Holz, 10\%}$ der Eschen-BSH-Träger.

7.2 Bruchversuche

In der Tabelle 5 sind die Bruchlasten und die Lage des Bruchs angegeben. Die aus den Bruchlasten errechneten Schub- und Biegespannungen sind in der Tabelle 6 zusammengestellt. Die Schubspannungen wurden sowohl am Ort des Schubbruchs (τ_{Riss}) als auch in halber Höhe des Trägers (f_v , was der tatsächlichen Schubfestigkeit entspricht) errechnet (Abb. 20). Erläuterungen dazu siehe Teil 2 dieses Berichts. Die Einzel- und Mittelwerte der Schubfestigkeit, ermittelt aus den 4-Punkt-Biegeversuchen an Eschen-BSH, sind in der Abb. 21a dargestellt. Das Histogramm der Schubfestigkeit ist in der Abb. 21b dargestellt. Im Mittel über alle Versuche betrug die Schubfestigkeit $f_{v, mean} = 12.2 \text{ N/mm}^2$, der Variationskoeffizient im Mittel 15%. Die Abb. 1 zeigt in einem Histogramm die Lage der in den Versuchen aufgetretenen Schubbrüche in Bezug auf die Trägerhöhe. Es ist erkennbar, dass die Schubbrüche sowohl oberhalb als auch unterhalb der neutralen Achse der Träger aufgetreten sind.

Die zum Zeitpunkt des Schubversagens herrschende Biegespannung wurde mit einer Kraft gleich der Auflagerreaktion R_2 und einem Hebelarm von $l_2 + 160/2$ errechnet (siehe Abb. 11 und Abb. 17).

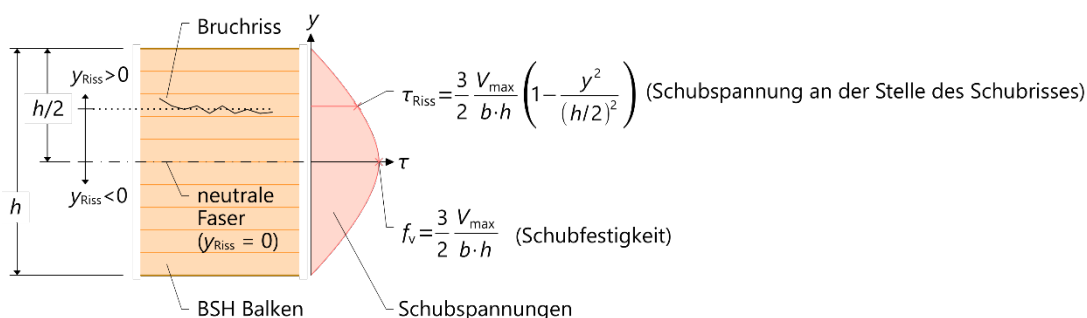


Abb. 20: Schubfestigkeit f_v , Lage des Bruchs y_{Riss} und Schubspannung am Ort des Schubbruchs τ_{Riss} .

Tabelle 5: Bruchlasten sowie Lage des Bruchs.

Prüfkörper			Balken- höhe h [mm]	Lagerreaktionen ¹⁾ R_1 und R_2		Schubkraft		Lage des Bruchs ²⁾ y_{Riss} [mm]
				$R_{1,\text{max}}$ [kN]	$R_{2,\text{max}}$ [kN]	V_{max} [kN]	$V_{\text{max,mean}}$ [kN]	
ES-1.3	PK1	GL 40c	480	595	99	496	441	-74
	PK2	GL 40c		536	89	448		72
	PK3	GL 40c		453	74	379		-47
ES-1.4	PK1	GL 40c		676	142	534	473	81
	PK2	GL 40c		524	107	417		38
	PK3	GL 40c		587	120	467		35
ES-2.2	PK1	GL 40c	600	818	123	694	665	-62
	PK2	GL 40c		837	128	709		-38
	PK3	GL 40c		700	107	593		-49
ES-2.3	PK1	GL 40c		832	160	672	684	-89
	PK2	GL 40c		751	145	606		15
	PK3	GL 40c		960	186	774		0
	PK4	GL 40c		866	168	698		-37
	PK5	GL 40c		718	139	579		14
ES-2.4	PK1	GL 40c		705	165	540	617	-48
	PK2	GL 40c		868	205	663		31
	PK3	GL 40c		795	187	607		56
ES-2.5	PK1	GL 48c spezial		863	248	615	602	³⁾ -215
	PK2	GL 48c spezial		862	248	614		20
	PK3	GL 48c spezial		811	234	577		46
ES-3.2	PK1	GL 40c	800	749	137	611	630	123
	PK2	GL 40c		768	142	626		-91
	PK3	GL 40c		801	148	653		1
ES-3.3	PK1	GL 40c		760	183	577	660	34
	PK2	GL 40c		916	222	693		124
	PK3	GL 40c		934	225	709		121

1) Siehe Abb. 11.

2) Siehe Abb. 20.

3) Ein erster Schubriss ergab sich in der Nähe der hochfesten Brettlagen, welche zwecks Sicherstellung einer ausreichenden Biegefestigkeit eingebaut worden waren, sehr kurz bevor ein zweiter Schubriss in der Nähe der neutralen Achse eintrat. Die Reihenfolge der Risse ist nur erkennbar, wenn man die Videos des Versuchs bei sehr langsamer Wiedergabe analysiert.

Tabelle 6: Schubfestigkeiten f_v , Schubspannungen τ_{Riss} und Biegespannungen σ_m beim Bruch sowie Lage des Bruchs.

Prüfkörper			Schubfestigkeit				Schubspannung ²⁾		Maximale Biegespannung ³⁾	
			f_v	$f_{v,\text{mean}}$	$f_{v,\text{SD}}$	CoV ¹⁾	τ_{Riss}	$\tau_{\text{Riss,mean}}$	$\sigma_{m,\text{max}}$	$\sigma_{m,\text{max,mean}}$
			[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
ES-1.3	PK1	GL 40c	12.9				11.7		48.0	
	PK2	GL 40c	11.7	11.5	1.5	13%	10.6	10.6	43.0	42.3
	PK3	GL 40c	9.9				9.5		36.0	
ES-1.4	PK1	GL 40c	13.9				12.3		66.1	
	PK2	GL 40c	10.9	12.3	1.5	12%	10.6	11.6	49.6	57.2
	PK3	GL 40c	12.2				11.9		55.8	
ES-2.2	PK1	GL 40c	14.5				13.8		41.4	
	PK2	GL 40c	14.8	13.9	1.3	9%	14.5	13.4	43.0	40.2
	PK3	GL 40c	12.4				12.0		36.1	
ES-2.3	PK1	GL 40c	14.0				12.7		51.2	
	PK2	GL 40c	12.6				12.6		46.4	
	PK3	GL 40c	16.1	13.9	1.6	12%	16.1	13.5	59.6	51.0
	PK4	GL 40c	14.5				14.3		53.7	
	PK5	GL 40c	12.1				12.0		44.3	
ES-2.4	PK1	GL 40c	11.2				11.0		49.9	
	PK2	GL 40c	13.8	12.6	1.3	10%	13.7	12.3	62.0	56.2
	PK3	GL 40c	12.7				12.2		56.7	
ES-2.5	PK1	GL 48c spezial	12.8				⁴⁾ 6.3		69.9	
	PK2	GL 48c spezial	12.8	12.5	0.5	5%	12.7	10.2	69.9	68.6
	PK3	GL 48c spezial	12.0				11.7		66.0	
ES-3.2	PK1	GL 40c	9.6				8.6		24.7	
	PK2	GL 40c	9.8	9.8	0.3	3%	9.3	9.4	25.5	25.6
	PK3	GL 40c	10.2				10.2		26.7	
ES-3.3	PK1	GL 40c	9.0				9.0		30.6	
	PK2	GL 40c	10.8	10.3	1.1	11%	9.8	9.6	37.2	35.1
	PK3	GL 40c	11.1				10.1		37.6	

1) Variationskoeffizient.

2) Schubspannung an der Stelle des Schubrisses.

3) Es sind keine Biegebrüche aufgetreten, d. h. $f_m \geq \sigma_{m,\text{max}}$.

4) Ein erster Schubriss ergab sich in der Nähe der hochfesten Brettlagen, welche zwecks Sicherstellung einer ausreichenden Biegefestigkeit eingebaut worden waren, sehr kurz bevor ein zweiter Schubriss in der Nähe der neutralen Achse eintrat. Die Reihenfolge der Risse ist nur erkennbar, wenn man die Videos des Versuchs bei sehr langsamer Wiedergabe analysiert.

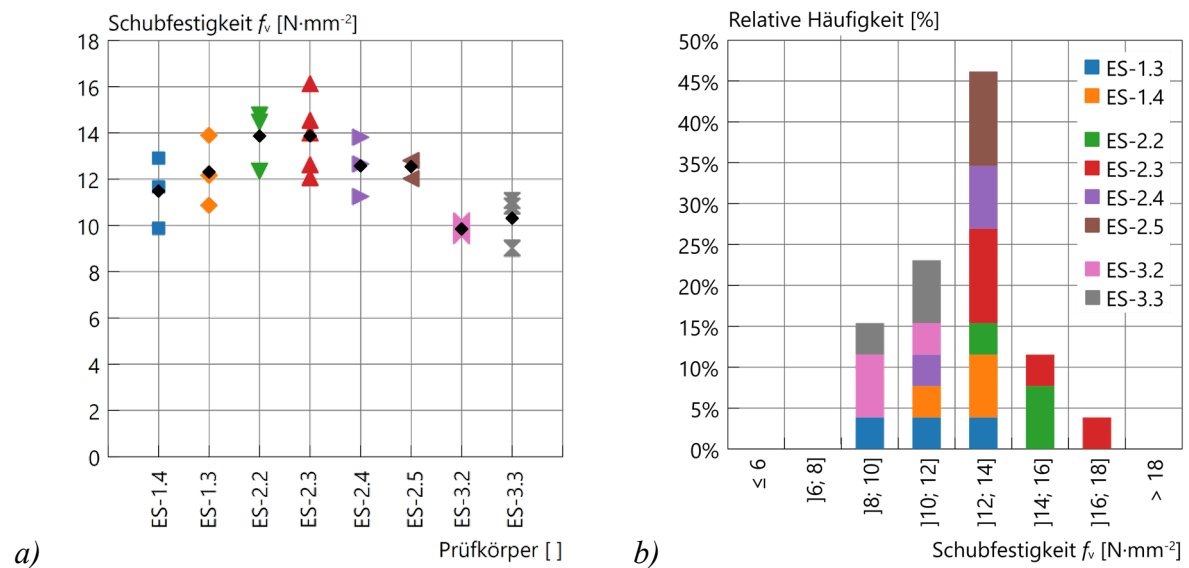


Abb. 21: Schubfestigkeit f_v bei den 4-Punkt-Biegeversuchen: a) in den 4-Punkt-Biegeversuchen an Eschen-BSH ermittelte Einzelwerte (farbig) und Mittelwerte (schwarz) der Schubfestigkeit f_v ; b) Histogramm der Schubfestigkeit f_v .

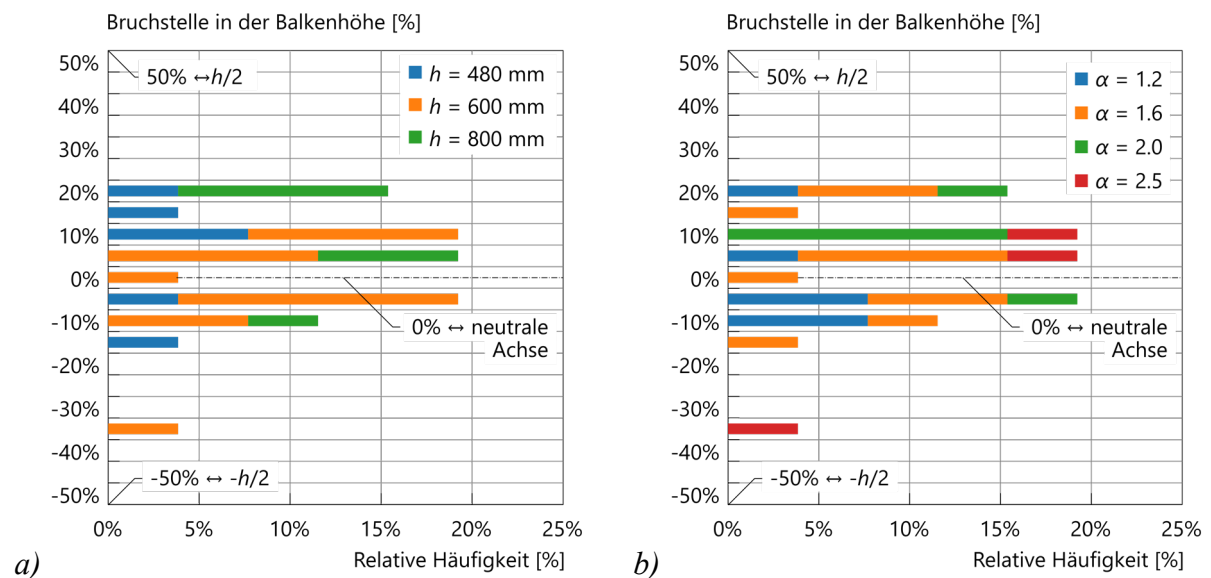


Abb. 22: Histogramme der Lage der Bruchstelle y_{Riss} .

7.3 Abhängigkeit von Schubfestigkeit und Schubspannung am Ort des Schubbruchs von den geometrischen Abmessungen der Prüfkörper

In der Abb. 23 ist die Schubfestigkeit f_v in Funktion der Fläche des Schubfelds (Abb. 23a), der Querschnittshöhe (Abb. 23b), der Länge des Schubfelds (Abb. 23c) und dem Volumen des Schubfelds (Abb. 23d) dargestellt. Der Zusammenhang zwischen der Schubfestigkeit und der Fläche des Schubfelds kann mittels folgender Funktion beschrieben werden:

$$f_v = 45 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.11}$$

Der Zusammenhang zwischen der Schubfestigkeit und der Trägerhöhe lässt sich beschreiben mit der Funktion:

$$f_v = 127 \cdot h^{-0.37}.$$

Dieser Zusammenhang lässt sich auch als Funktion der Referenzträgerhöhe von $h = 600$ mm formulieren:

$$f_v = 127 \cdot h^{-0.37} = \underbrace{12.2}_{\left(\frac{127}{600^{0.37}}\right)} \left(\frac{600}{h}\right)^{0.37}.$$

Es kann kein deutlicher Einfluss des Verhältnisses $\alpha = L_v/$ auf die Schubfestigkeit festgestellt werden (Abb. 24a). Eine mit zunehmender Prüfkörpergrösse deutlich geringere Schubfestigkeit ist nur bei Trägern mit dem Verhältnis $\alpha = 1.2$ zu beobachten (Abb. 24b-e).

In der Abb. 25 ist die Schubspannungen am Ort des Schubbruchs τ_{Riss} in Funktion der Fläche des Schubfelds (Abb. 25a), der Querschnittshöhe (Abb. 25b), der Länge des Schubfelds (Abb. 25c) und dem Volumen des Schubfelds (Abb. 25d) dargestellt. Der Zusammenhang zwischen der Schubspannung am Ort des Schubbruchs und der Fläche des Schubfelds kann mit folgender Funktion beschrieben werden:

$$\tau_{\text{Riss}} = 343 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.29}$$

Der Zusammenhang zwischen der Schubspannung am Ort des Schubbruchs und der Trägerhöhe lässt sich beschreiben mit der Funktion:

$$\tau_{\text{Riss}} = 106 \cdot h^{-0.35}.$$

Dieser Zusammenhang lässt sich auch als Funktion der Referenzträgerhöhe von $h = 600$ mm formulieren:

$$\tau_{\text{Riss}} = 106 \cdot h^{-0.35} = \underbrace{11.3}_{\left(\frac{106}{600^{0.35}}\right)} \left(\frac{600}{h}\right)^{0.35}.$$

Die Regressionsparameter sind durch die sehr geringe Schubspannung $\tau_{\text{Riss}} = 6.3 \text{ N/mm}^2$ des Prüfkörpers ES-2.5 PK1 erheblich beeinflusst (Abb. 25a-b). Wenn dieser Wert vernachlässigt wird, ergeben sich Regressionsparameter, welcher besser mit denjenigen von oben ($f_v =$ Funktion (A_{shear}) und $f_v =$ Funktion (h)) übereinstimmen:

$$\tau_{\text{Riss}} = 49 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.12}$$

und

$$\tau_{\text{Riss}} = 117 \cdot h^{-0.36} = \underbrace{11.7}_{\left(\frac{117}{600^{0.36}}\right)} \left(\frac{600}{h}\right)^{0.36}.$$

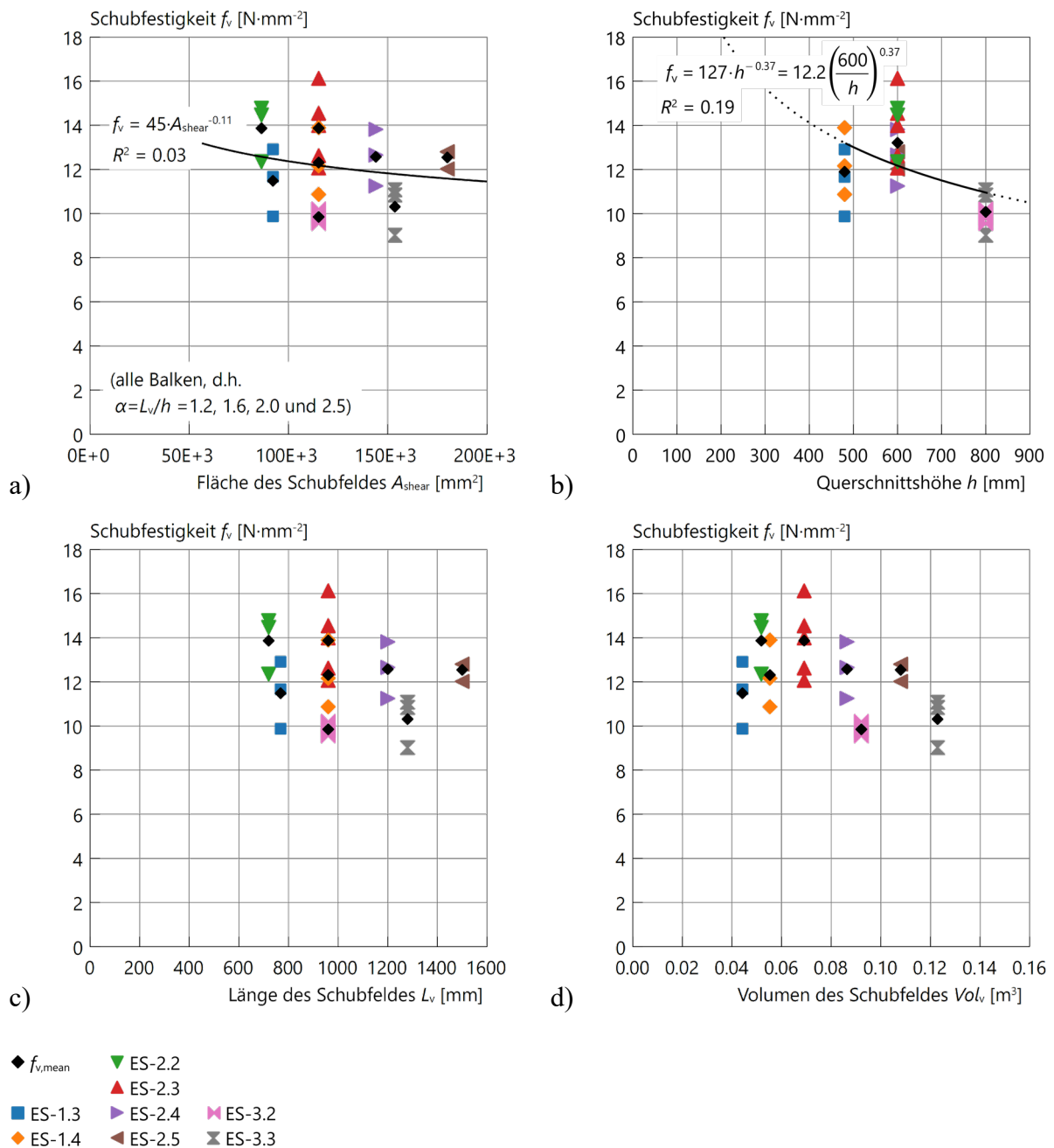


Abb. 23: Schubfestigkeit f_v in Funktion der Fläche des Schubfeldes (a), der Querschnittshöhe (b), der Länge des Schubfeldes (c) und dem Volumen des Schubfeldes (d).

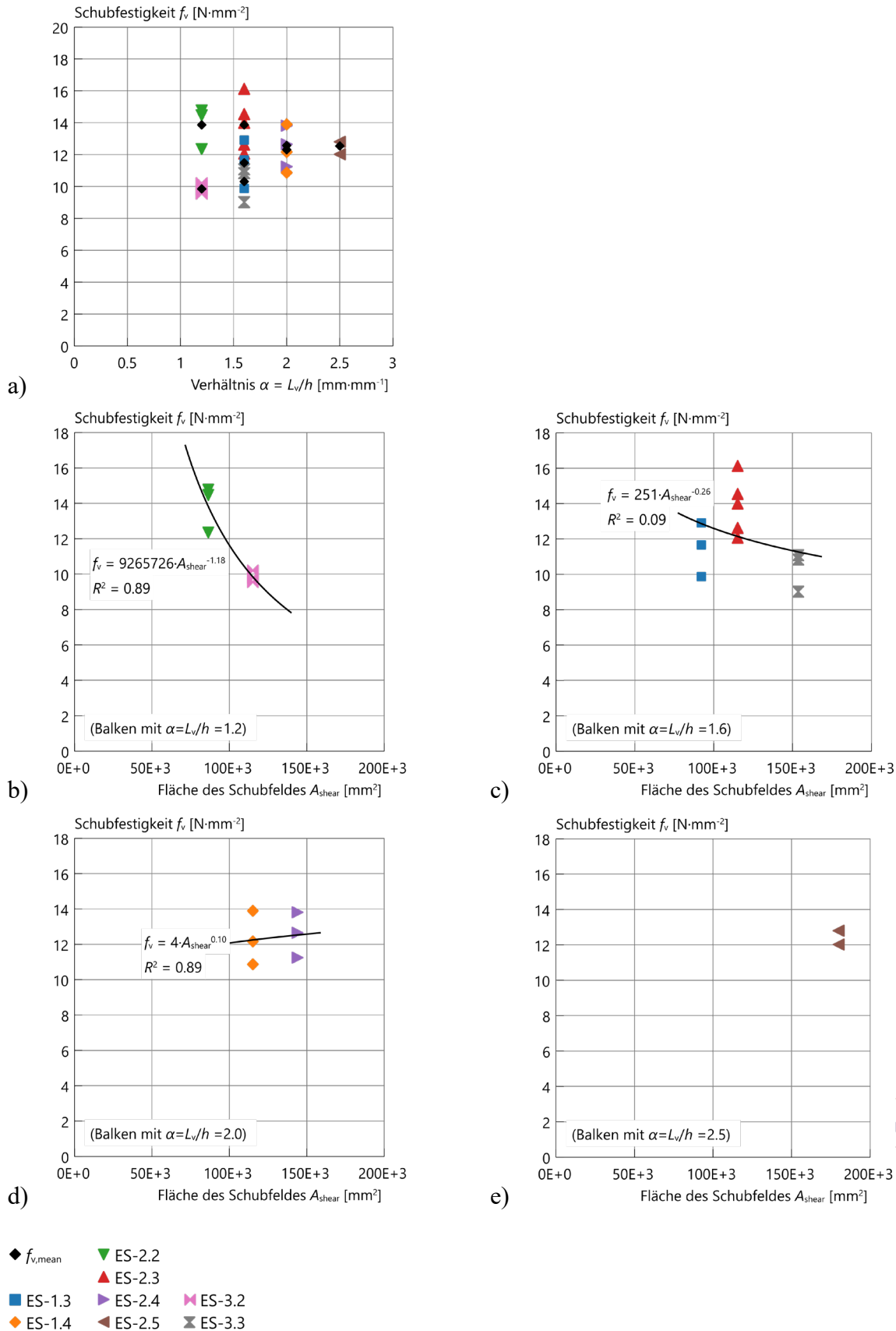


Abb. 24: Schubfestigkeit f_v in Funktion der Verhältnis $\alpha = L_v/h$ (a), der Fläche des Schubfeldes für $\alpha = 1.2$ (b), der Fläche des Schubfeldes für $\alpha = 1.6$ (c), der Fläche des Schubfeldes für $\alpha = 2.0$ (d), der Fläche des Schubfeldes für $\alpha = 2.5$ (e).

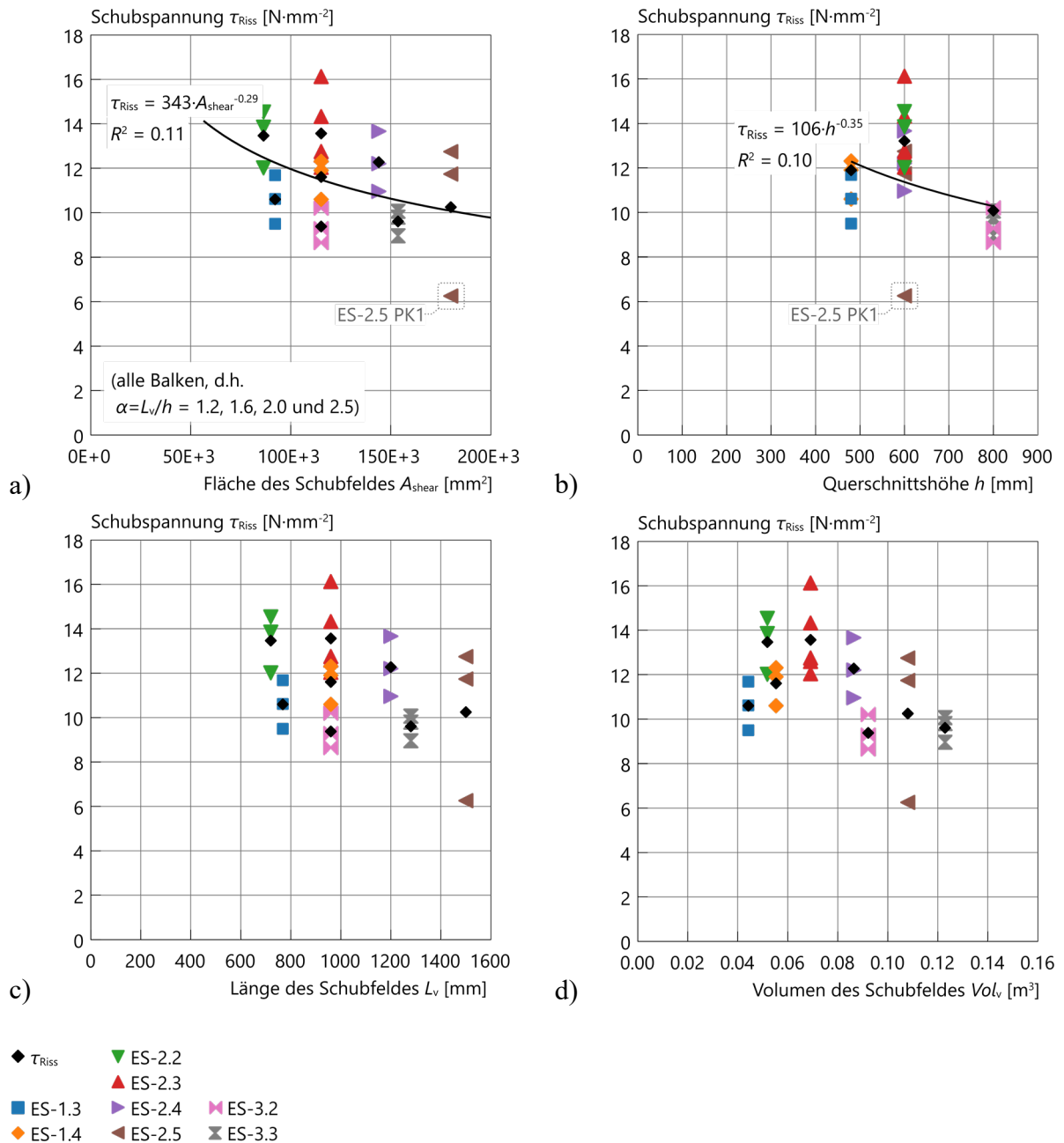
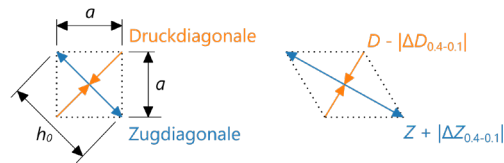


Abb. 25: Schubspannungen am Ort des Schubbruchs τ_{Riss} in Funktion der Fläche des Schubfeldes (a), der Querschnittshöhe (b), der Länge des Schubfeldes (c) und dem Volumen des Schubfeldes (d).

7.4 Schubmoduln

Die Schubmoduln wurden, wie in der Abb. 26 dargestellt, berechnet. Die Tabelle 7 enthält die aus den Messungen abgeleiteten Schubmoduln. Zur Berechnung der tabellierten Werte wurden nur die Diagonalen im mittleren Schubfeld berücksichtigt. Im Mittel ergab sich über alle Versuche ein Schubmodul von $G_{mean} = 1120 \text{ N/mm}^2$. Der Variationskoeffizient betrug im Mittel 6%. Wie die Abb. 28 zeigt und wie dies auch zu erwarten war, ist der Schubmodul nicht abhängig von der Grösse des Prüfkörpers bzw. von dessen geometrischen Abmessungen. Die Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeiten der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze sind im Anhang A zu diesem Teil 5 des Berichts zu finden.



$$G = \alpha \frac{h_0}{b \cdot h} \frac{V_{0,4} - V_{0,1}}{|\Delta Z_{0,4-0,1}| + |\Delta D_{0,4-0,1}|}$$

$$\alpha = \frac{3}{2} \frac{h_0^2}{4 \cdot h^2} \quad (\text{nach EN 408, 11.2.3(7)})$$

h_0 ursprüngliche Länge der Messdiagonale [mm]
 $b \cdot h$ Querschnittabmessungen [mm]
 $V_{0,4} - V_{0,1}$ Schubkraft im jew. Bereich bei Laststufe $F_{0,1}$ und $F_{0,4}$ [kN]
 $|\Delta Z_{0,4-0,1}| = |Z_{0,4} - Z_{0,1}|$ Zugdehnung im jew. Bereich bei Laststufe $F_{0,1}$ und $F_{0,4}$ [mm]
 $|\Delta D_{0,4-0,1}| = |D_{0,4} - D_{0,1}|$ Druckstauchung im jew. Bereich bei Laststufe $F_{0,1}$ und $F_{0,4}$ [mm]

Abb. 26: Ermittlung der Schubmoduln aus den Messungen der Längenveränderungen der Diagonalen der Messkreuze. Schub-Schnittkräfte V und Verschiebungen in den Schubfelddiagonalen Z und D (Zug oder Druck) in Abb. 11. Laststufen F_{01} und F_{04} in Abb. 18.

Tabelle 7: Schubmoduln.

Prüfkörper			Vorderseite 'V' ¹⁾	Rückseite 'R' ¹⁾	Mittelwerte		Variations- koeffizient
			$G_{M,V}$	$G_{M,R}$	$G_{M,V-R,mean}$	$G_{M,V-R,mean}$	
			[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	
ES-1.3	PK1	GL 40c	1087	1165	1126	1097	5%
	PK2	GL 40c	1125	1119	1122		
	PK3	GL 40c	1005	1080	1042		
ES-1.4	PK1	GL 40c	1137	1137	1137	1108	4%
	PK2	GL 40c	1088	1095	1091		
	PK3	GL 40c	1157	1035	1096		
ES-2.2	PK1	GL 40c	1027	1134	1081	1105	4%
	PK2	GL 40c	1093	1165	1129		
	PK3	GL 40c	1090	1122	1106		
ES-2.3	PK1	GL 40c	1249	1225	1237	1124	12%
	PK2	GL 40c	1094	1095	1095		
	PK3	GL 40c	1344	1199	1272		
	PK4	GL 40c	1078	1062	1070		
	PK5	GL 40c	958	933	946		
ES-2.4	PK1	GL 40c	1114	1088	1101	1124	4%
	PK2	GL 40c	1140	1087	1114		
	PK3	GL 40c	1193	1121	1157		
ES-2.5	PK1	GL 48c spezial	1127	1103	1115	1092	3%
	PK2	GL 48c spezial	1068	1043	1056		
	PK3	GL 48c spezial	1130	1083	1107		
ES-3.2	PK1	GL 40c	1224	1192	1208	1173	6%
	PK2	GL 40c	1145	1076	1111		
	PK3	GL 40c	1258	1140	1199		
ES-3.3	PK1	GL 40c	1197	1122	1159	1134	5%
	PK2	GL 40c	1077	1068	1073		
	PK3	GL 40c	1212	1126	1169		

1) Siehe Abb. 11.

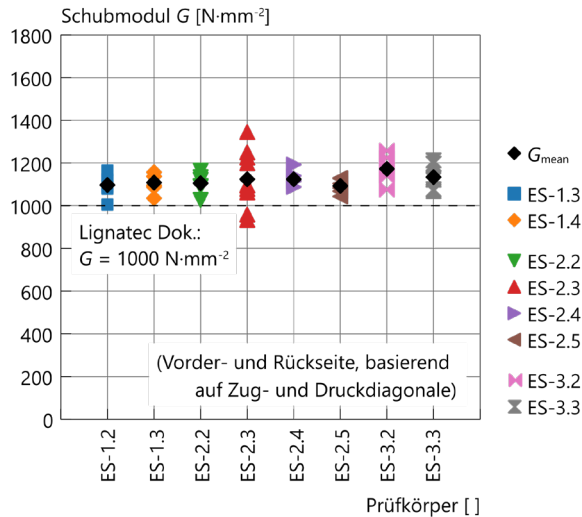


Abb. 27: In den 4-Punkt-Biegeversuchen an Eschen-BSH ermittelte Schubmoduln (Mittelwerte sämtlicher Messungen pro Träger).

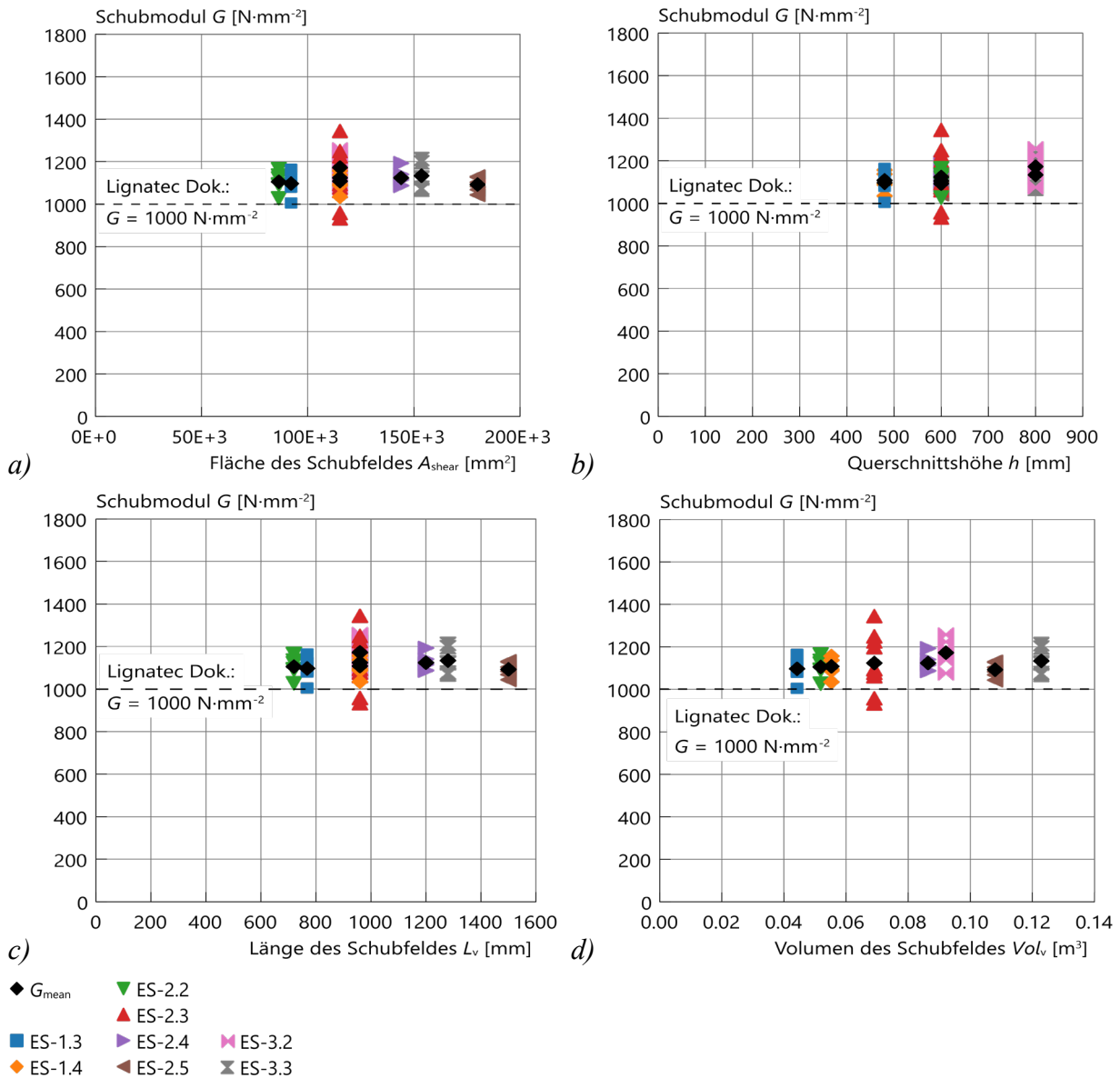


Abb. 28: Schubmoduln in Funktion der Fläche des Schubfeldes (a), der Querschnittshöhe (b), der Länge des Schubfeldes (c) und dem Volumen des Schubfeldes (d).

8 Fazit

Aus den 4-Punkt-Biegeversuchen an den Eschen-BSH-Trägern können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- 4-Punkt-Biegeversuche stellen eine komplexere Prüfkonfiguration in der Durchführung, Bedienung und Auswertung dar als 3-Punkt-Biegeversuche. Die Hauptschwierigkeit besteht darin, die richtigen (planmässigen) Kräfte an beiden Belastungsstellen aufzubringen, so dass beide Belastungspunkte die gleichen vertikalen Verschiebungen erfahren.
- Die Kräfte, die an beiden Belastungsstellen wirken, sind sehr unterschiedlich, was bei einem Versuchskonzept mit zwei separaten Krafteinleitungen Hydraulik-Zylinder mit unterschiedlichen Kapazitäten erfordert (die Kraft bei der äusseren Belastungsstelle beträgt zwischen 15 und 30 % der Kraft bei der mittleren Stelle). Der alternative Ansatz, welcher in der vorliegenden Untersuchung verfolgt wurde, besteht darin, eine einzige Belastungsstelle in der Mitte zu haben und die Kräfte über einen steifen Verteilbalken in den Prüfkörper einzuleiten. Dieser Ansatz erfordert nur einen Zylinder, jedoch mit einer höheren Kapazität (>1000 kN). Der Verteilbalken muss sehr steif sein. Wenn sein Gewicht nicht optimal auf das Gewicht der Prüfkörper abgestimmt ist, kann dies dazu führen, dass der nur mit dem Verteilbalken belastete Prüfkörper ohne in den Zylindern wirkende Kräfte abhebt. Diese Tendenz besteht insbesondere, wenn die Länge des inneren Schubfeldes sehr klein ist. All diese Aspekte machen den Versuchsaufbau und das Verfahren komplexer und die Versuche zeitaufwändiger, weshalb die 4-Punkt-Biegeprüfung ausschliesslich für Forschungszwecke zu empfehlen ist.
- Durch Verstärkung der Krafteinleitungszonen mit eingeklebten Gewindestangen und Vollgewindeschrauben ist es möglich, Kräfte von mindestens 960 kN in die Prüfkörper einzuleiten, ohne dass Querdruckversagen im Holz auftritt. Im vorliegenden Fall wurden Gewindestangen System GSA[®] $\varnothing$ 20 mm und Vollgewindeschrauben $\varnothing$ 10 mm eingesetzt. Details zu den Verstärkungen sind im Abschnitt 5 beschrieben.
- In allen 26 Versuchen trat Schubversagen auf, auch in den Versuchen mit den höchsten Biegespannungen (ES-2.5). Aus dieser Sicht funktioniert die 4-Punkt-Prüfungsconfiguration sehr gut. Erste Schubrisse haben sich stets im mittleren Schubfeld eingestellt und haben sich in einigen Fällen über die mittlere Zone hinaus ausgebreitet.
- Die Schubkräfte in den äusseren Schubfeldern sind viel kleiner als im mittleren Schubfeld (deutlich unter 40 % der Maximallast). Daher streuen die Schubmoduln, die aus den Verschiebungen der Diagonalen in diesen äusseren Feldern berechnet werden, stärker und sind weniger zuverlässig. Die äusseren Schubfelder sind aufgrund des geringen Spannungsniveaus für Bildkorrelationsanalysen (DIC) nicht sehr geeignet.
- Der Mittelwert des Schubmoduls aus allen 26 Versuchen betrug $G_{\text{mean}} = 1122$ N/mm² (bei den 3-Punkt-Prüfungen betrug er 1162 N/mm²), der Variationskoeffizient 6% (bei den 3-Punkt-Prüfungen betrug er 6%). Der Schubmodul ist unabhängig von der Grösse und den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers.
- Der Mittelwert der Schubfestigkeit betrug $f_v = 12.2$ N/mm² (bei den 3-Punkt-Prüfungen betrug er 10.2 N/mm²), der Variationskoeffizient 15% (bei den 3-Punkt-Prüfungen betrug er 14%). Die Schubfestigkeit ist abhängig von der Grösse bzw. den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers. Allerdings ist der Grösseneinfluss bei Weitem nicht so gut erkennbar, wie bei den 3-Punkt-Biegeversuchen. Es wurden die folgenden Zusammenhänge ermittelt:

- Zwischen der Schubfestigkeit und der Fläche des Schubfeldes:

$$f_v = 45 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.11}.$$
- Zwischen der Schubfestigkeit und der Trägerhöhe:

$$f_v = 127 \cdot h^{-0.37} \quad \text{bzw.} \quad f_v = 12.2 \left(\frac{600}{h} \right)^{0.37}.$$
- Der Mittelwert der Schubspannung am Ort des Schubbruchs betrug $\tau_{\text{Riss,mean}} = 11.5 \text{ N/mm}^2$ (bei den 3-Punkt-Prüfungen betrug er 9.2 N/mm^2). Die Schubspannung am Ort des Schubbruchs ist abhängig von der Grösse bzw. den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers. Allerdings ist der Grösseneinfluss bei Weitem nicht so gut erkennbar, wie bei den 3-Punkt-Biegeversuchen. Es wurden (unter Vernachlässigung der sehr tiefen Schubspannung $\tau_{\text{Riss}} = 6.3 \text{ N/mm}^2$ des Prüfkörpers ES-2.5 PK1) die folgenden Zusammenhänge ermittelt:
 - Zwischen der Schubspannung am Ort des Schubbruchs und der Fläche des Schubfeldes:

$$\tau_{\text{Riss}} = 49 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.12}$$
 - Zwischen der Schubspannung am Ort des Schubbruchs und der Trägerhöhe:

$$\tau_{\text{Riss}} = 117 \cdot h^{-0.36} \quad \text{bzw.} \quad \tau_{\text{Riss}} = 11.7 \left(\frac{600}{h} \right)^{0.36}.$$
- Die geringeren Schubfestigkeiten, welche bei den 3-Punkt-Biegeversuchen ermittelt wurden, könnten dadurch erklärt werden, dass bei den 3-Punkt-Versuchen bei jeder Prüfung zwei Schubfelder getestet werden; das Schwächere dieser beiden Felder wird zuerst versagen; das andere Schubfeld ist stärker als das Schubfeld, in welchem der Bruch aufgetreten ist; die ermittelten Schubfestigkeiten sind daher konservative Werte; bei den 4-Punkt-Untersuchungen wird nur ein Schubfeld pro Prüfung geprüft; die ermittelte Schubfestigkeit ist daher ein realistischerer und weniger konservativer Wert. Daraus kann abgeleitet werden, dass sich die 4-Punkt-Biegeprüfung ausschliesslich für Forschungszwecke eignet, während die 3-Punkt-Biegeprüfung in der werkseigenen Produktionskontrolle eingesetzt werden kann.
- Es konnte kein deutlicher Einfluss des Verhältnisses α auf die Schubfestigkeit festgestellt werden. Eine mit zunehmender Prüfkörpergrösse deutlich geringere Schubfestigkeit konnte nur bei den Trägern mit dem Verhältnis $\alpha = 1.2$ (kurzes Schubfeld) beobachtet werden.

FESTLEGUNG DER SCHUBSTEIFIGKEIT UND SCHUBFESTIGKEIT VON TRÄGERN, INSB. AUS LAUBHOLZ-BSH

**Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz
Projekt 2019.10**

Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Wald
und
Konferenz für Wald, Wildtiere und Landschaft KWL

Schlussbericht

Anhang A zum Teil 5

Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeit der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze

Pedro Palma
Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen, 8600 Dübendorf

Inhaltsverzeichnis

A.1	ÜBERSICHTSTABELLE	120
A.2	LAST-VERSCHIEBUNGS-KURVEN UND STEIFIGKEITEN	121
A.2.1	VERSUCHSREIHE ES-1.3.....	121
A.2.2	VERSUCHSREIHE ES-1.4.....	122
A.2.3	VERSUCHSREIHE ES-2.2.....	123
A.2.4	VERSUCHSREIHE ES-2.3.....	124
A.2.5	VERSUCHSREIHE ES-2.4.....	125
A.2.6	VERSUCHSREIHE ES-2.5.....	126
A.2.7	VERSUCHSREIHE ES-3.2.....	127
A.2.8	VERSUCHSREIHE ES-3.3.....	128

A.1 Übersichtstabelle

Die Steifigkeiten der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Steifigkeit der Zug- und Druckdiagonalen in den Messkreuzen.

Prüfkörper			Steifigkeit				
			$K_{\text{Zug,mean}}$ [kN/mm ²]		$K_{\text{Druck,mean}}$ [kN/mm ²]	$K_{\text{Zug,mean}}/K_{\text{Druck,mean}}$ [kN/mm ²]	
ES-1	ES-1.3	PK1	293.3	282.4	274.0	0.93	
		PK2	296.6		270.3	0.91	
		PK3	267.0		262.6	0.98	
	ES-1.4	PK1	288.7	284.3	0.98		
		PK2	275.6	279.2	280.6	1.01	
		PK3	273.2	278.1	1.02		
ES-2	ES-2.2	PK1	290.3	302.0	253.7	0.87	
		PK2	311.4		259.5	256.0	0.83
		PK3	304.2		254.7	0.84	
	ES-2.3	PK1	325.2	291.9	298.8	0.92	
		PK2	289.6		262.0	0.90	
		PK3	326.5		311.6	270.5	0.95
		PK4	285.7		255.0	268.7	0.89
		PK5	250.7		225.0	0.90	
	ES-2.4	PK1	289.0	292.0	265.2	0.92	
		PK2	285.7		272.7	273.3	0.95
		PK3	301.3		282.0	0.94	
	ES-2.5	PK1	275.9	275.7	283.9	1.03	
		PK2	275.9		256.7	273.9	0.93
		PK3	275.4		281.0	1.02	
ES-3	ES-3.2	PK1	335.7	312.9	278.2	0.83	
		PK2	304.5		253.4	270.8	0.83
		PK3	340.7		280.9	269.9	0.82
	ES-3.3	PK1	302.5	280.7	0.93		
		PK2	288.2	298.8	251.7	269.1	0.87
		PK3	305.8	274.9	0.90		

A.2 Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeiten

A.2.1 Versuchsreihe ES-1.3

Die Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeiten der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze sind in Abb. 1 dargestellt. Die dargestellten Kurven sind Mittelwerte der Zug- oder Druckdiagonalen (auf der Vorderseite und auf der Rückseite).

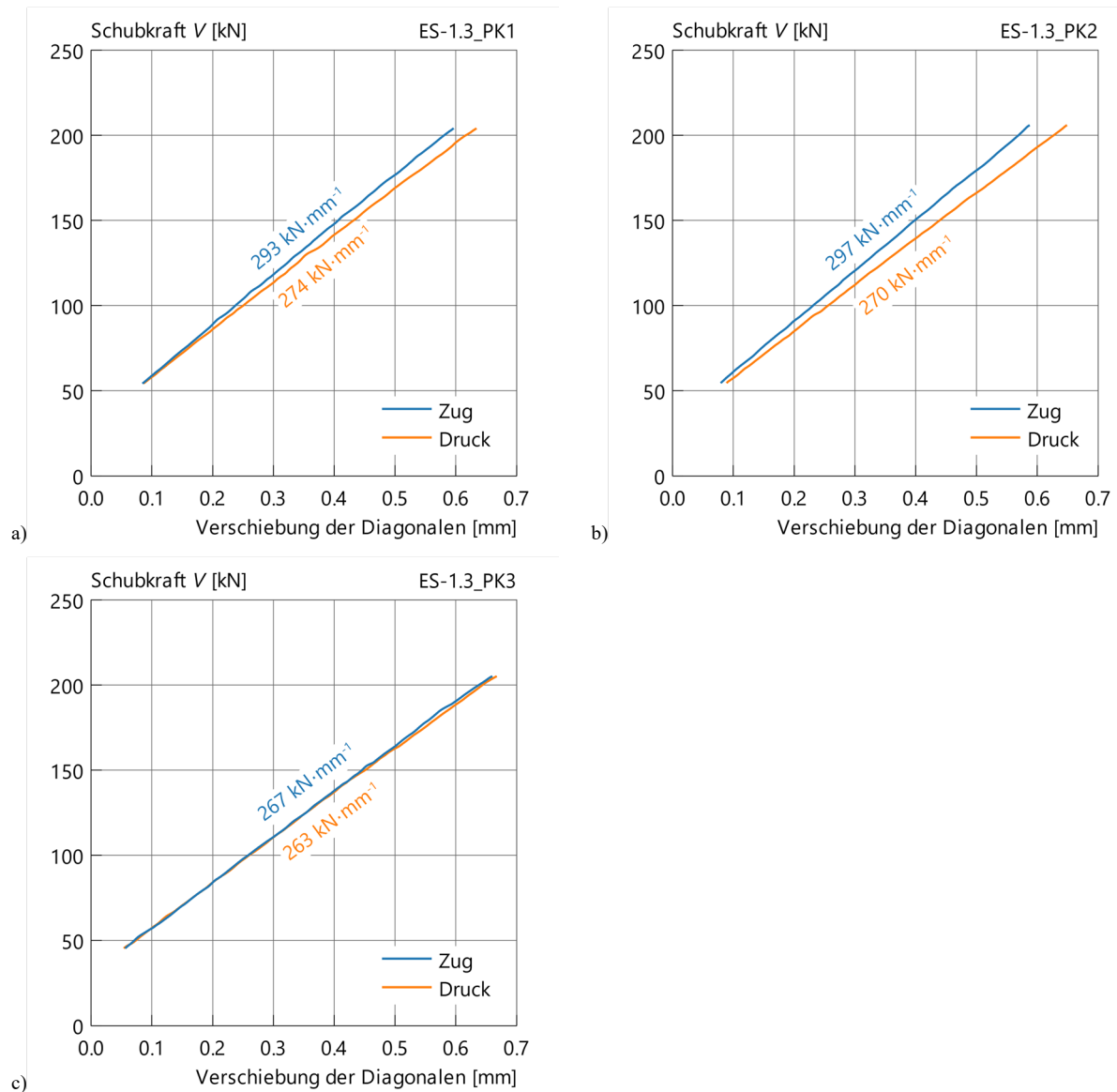


Abb. 1: Last-Verschiebungs-Kurven der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze: a) Prüfkörper ES-1.3_PK1, b) ES-1.3_PK2; c) ES-1.3_PK3.

A.2.2 Versuchsreihe ES-1.4

Die Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeiten der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze sind in Abb. 2 dargestellt. Die dargestellten Kurven sind Mittelwerte der Zug- oder Druckdiagonalen (auf der Vorderseite und auf der Rückseite).

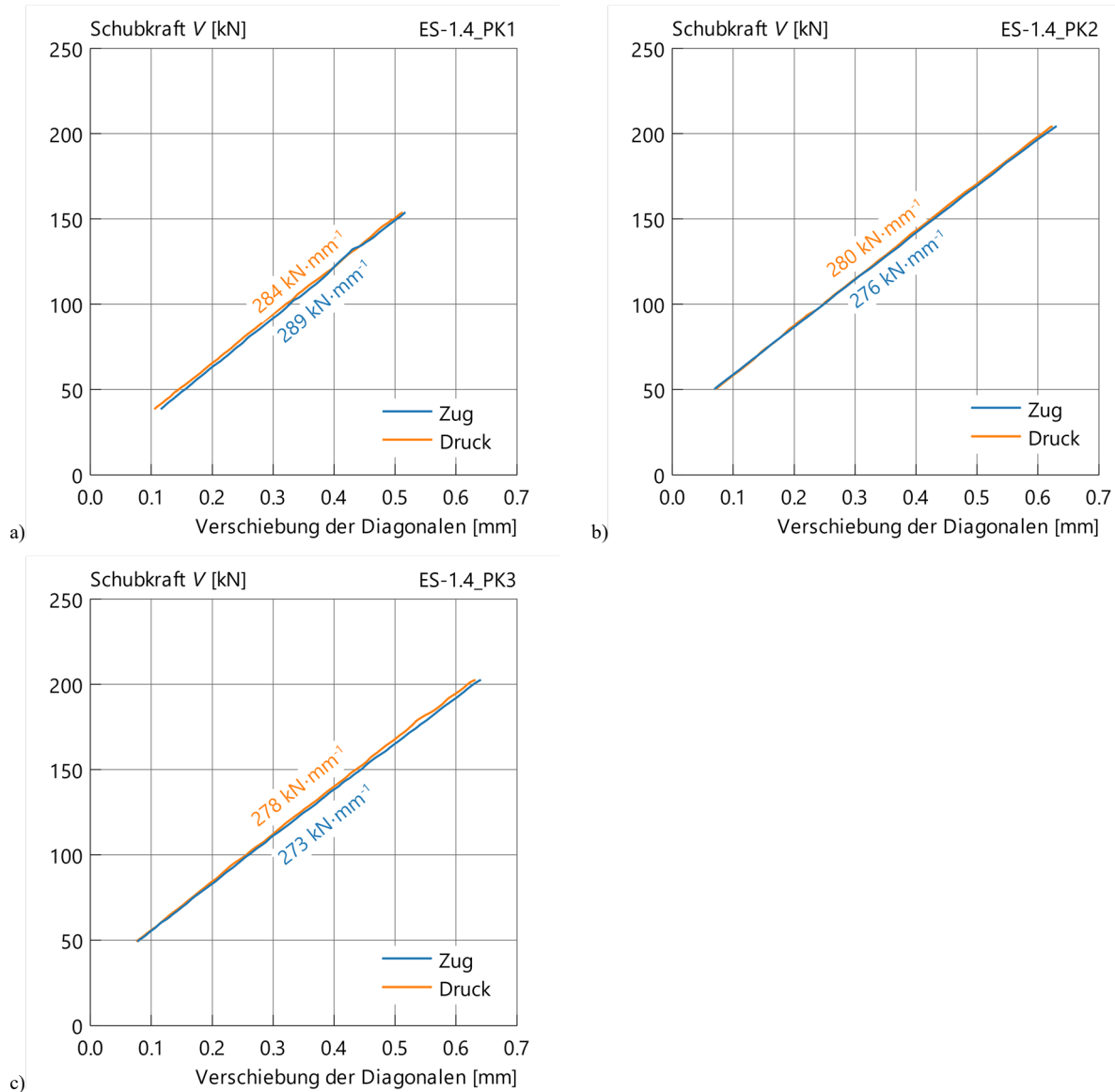


Abb. 2: Last-Verschiebungs-Kurven der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze: a) Prüfkörper ES-1.4_PK1, b) ES-1.4_PK2; c) ES-1.4_PK3.

A.2.3 Versuchsreihe ES-2.2

Die Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeiten der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze sind in Abb. 3 dargestellt. Die dargestellten Kurven sind Mittelwerte der Zug- oder Druckdiagonalen (auf der Vorderseite und auf der Rückseite).

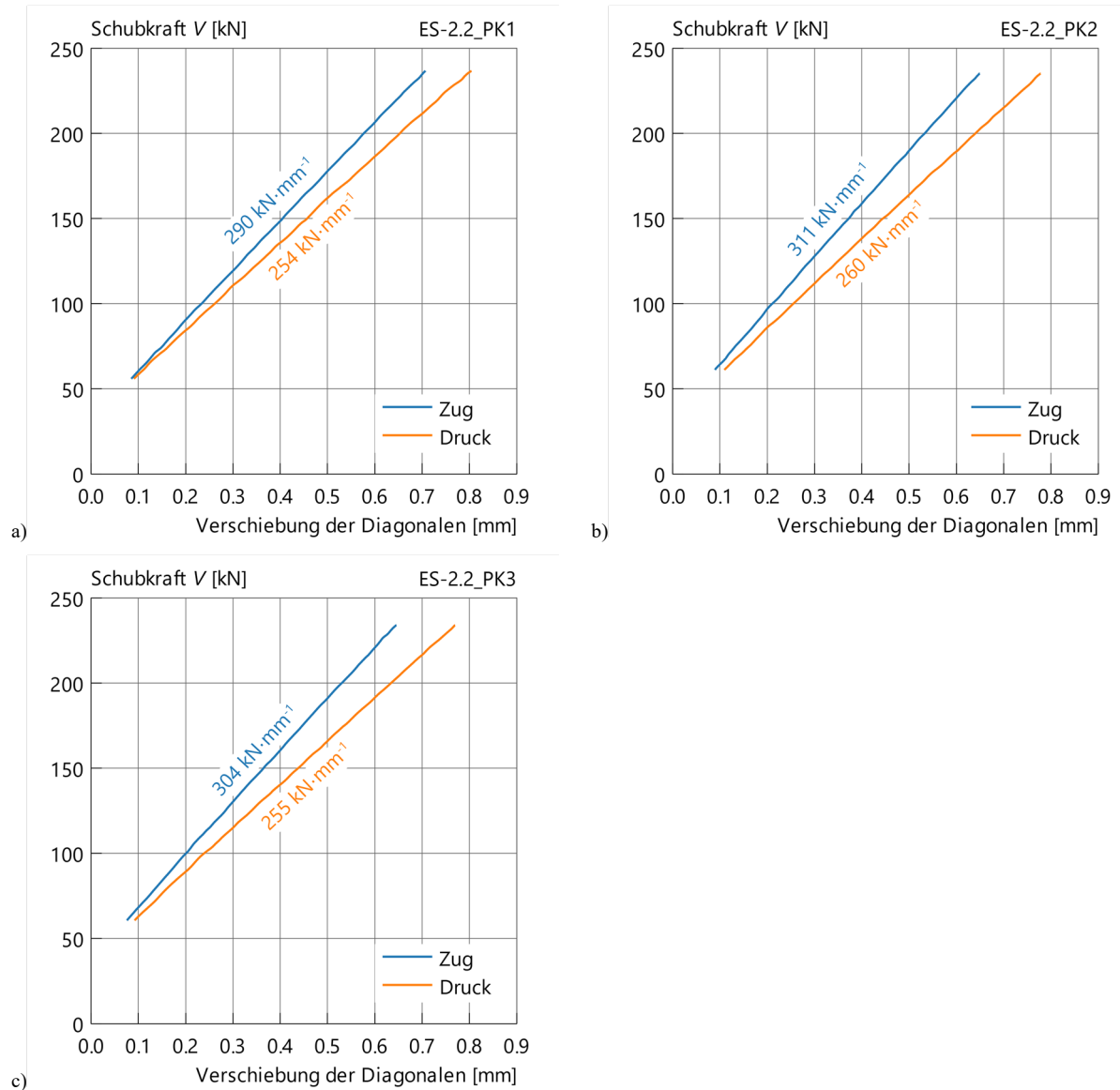


Abb. 3: Last-Verschiebungs-Kurven der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze: a) Prüfkörper ES-2.2_PK1, b) ES-2.2_PK2; c) ES-2.2_PK3.

A.2.4 Versuchsreihe ES-2.3

Die Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeiten der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze sind in Abb. 4 dargestellt. Die dargestellten Kurven sind Mittelwerte der Zug- oder Druckdiagonalen (auf der Vorderseite und auf der Rückseite).

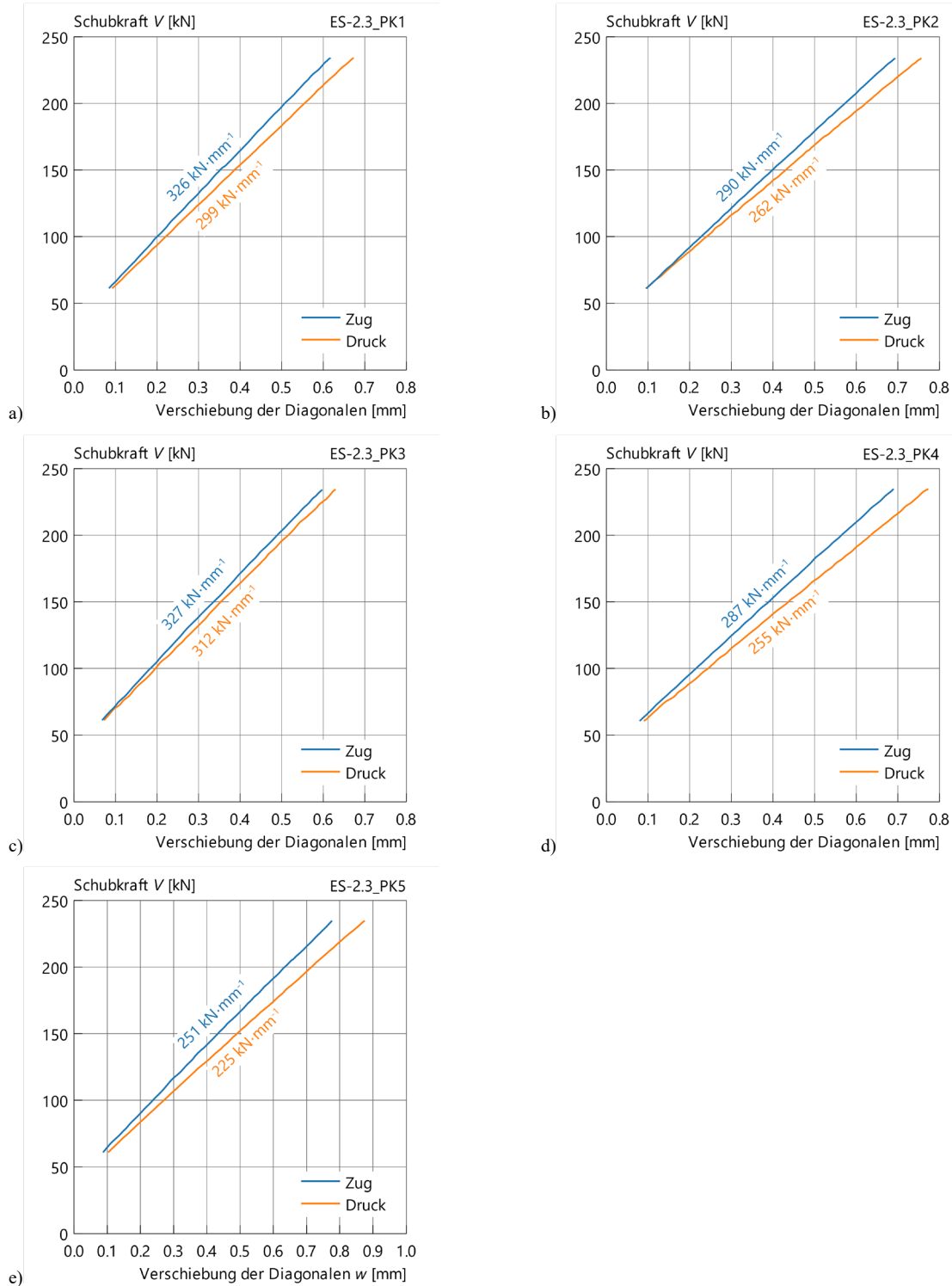


Abb. 4: Last-Verschiebungs-Kurven der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze: a) Prüfkörper ES-2.3_PK1, b) ES-2.3_PK2; c) ES-2.3_PK3; d) ES-2.3_PK4; e) ES-2.3_PK5.

A.2.5 Versuchsreihe ES-2.4

Die Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeiten der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze sind in Abb. 5 dargestellt. Die dargestellten Kurven sind Mittelwerte der Zug- oder Druckdiagonalen (auf der Vorderseite und auf der Rückseite).

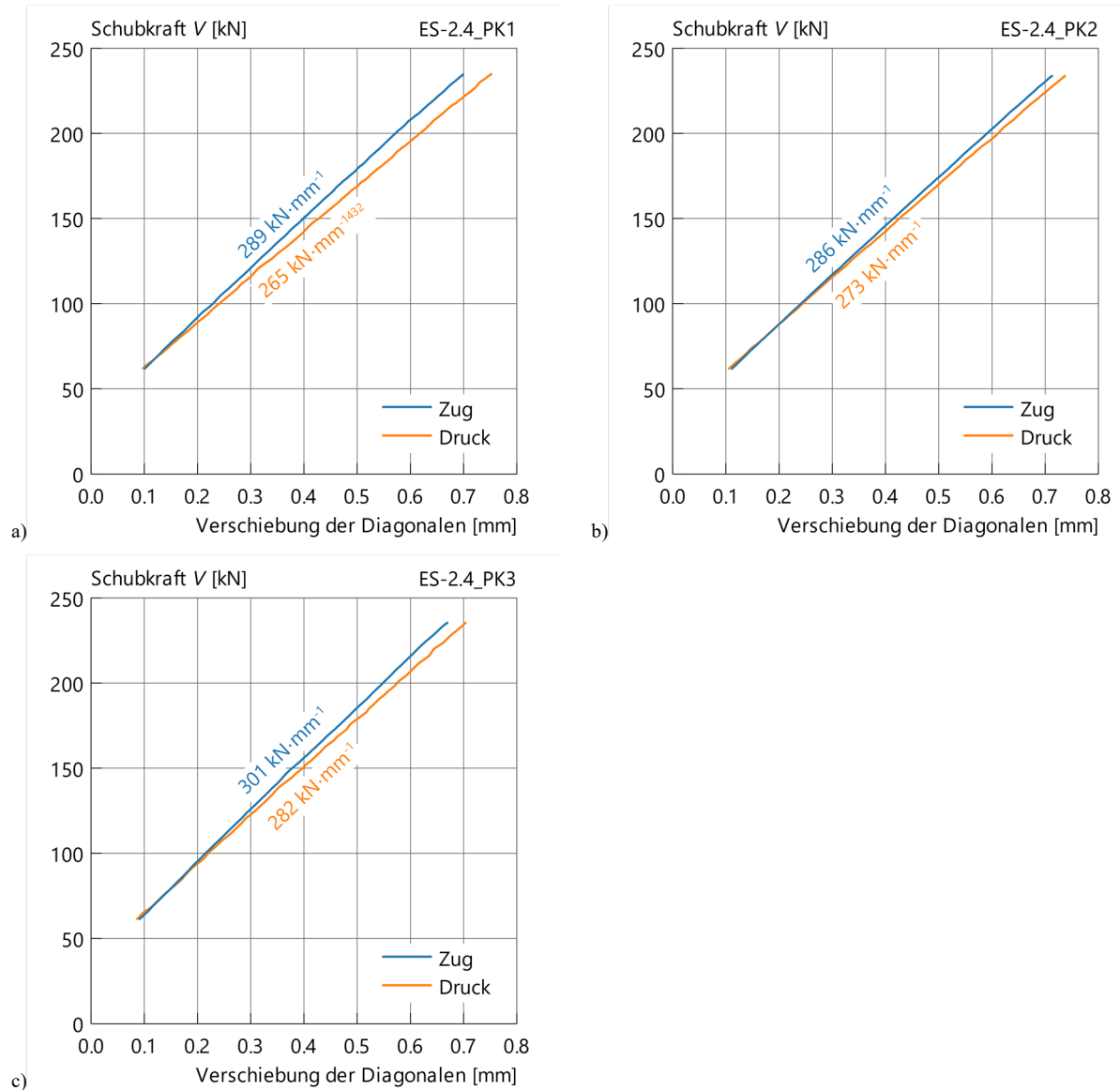


Abb. 5: Last-Verschiebungs-Kurven der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze: a) Prüfkörper ES-2.4_PK1, b) ES-2.4_PK2; c) ES-2.4_PK3.

A.2.6 Versuchsreihe ES-2.5

Die Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeiten der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze sind in Abb. 6 dargestellt. Die dargestellten Kurven sind Mittelwerte der Zug- oder Druckdiagonalen (auf der Vorderseite und auf der Rückseite).

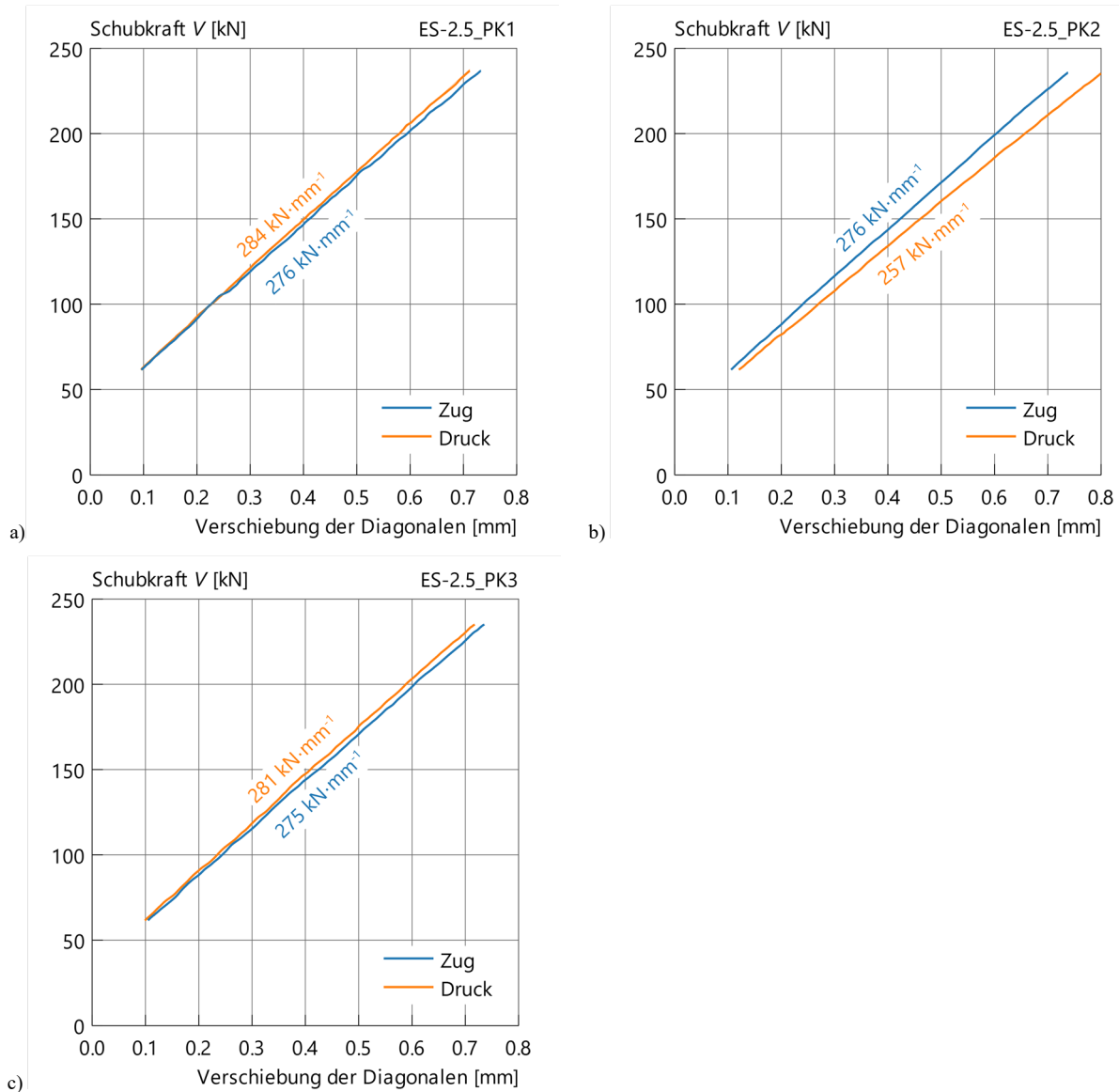


Abb. 6: Last-Verschiebungs-Kurven der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze: a) Prüfkörper ES-2.5_PK1, b) ES-2.5_PK2; c) ES-2.5_PK3.

A.2.7 Versuchsreihe ES-3.2

Die Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeiten der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze sind in Abb. 7 dargestellt. Die dargestellten Kurven sind Mittelwerte der Zug- oder Druckdiagonalen (auf der Vorderseite und auf der Rückseite).

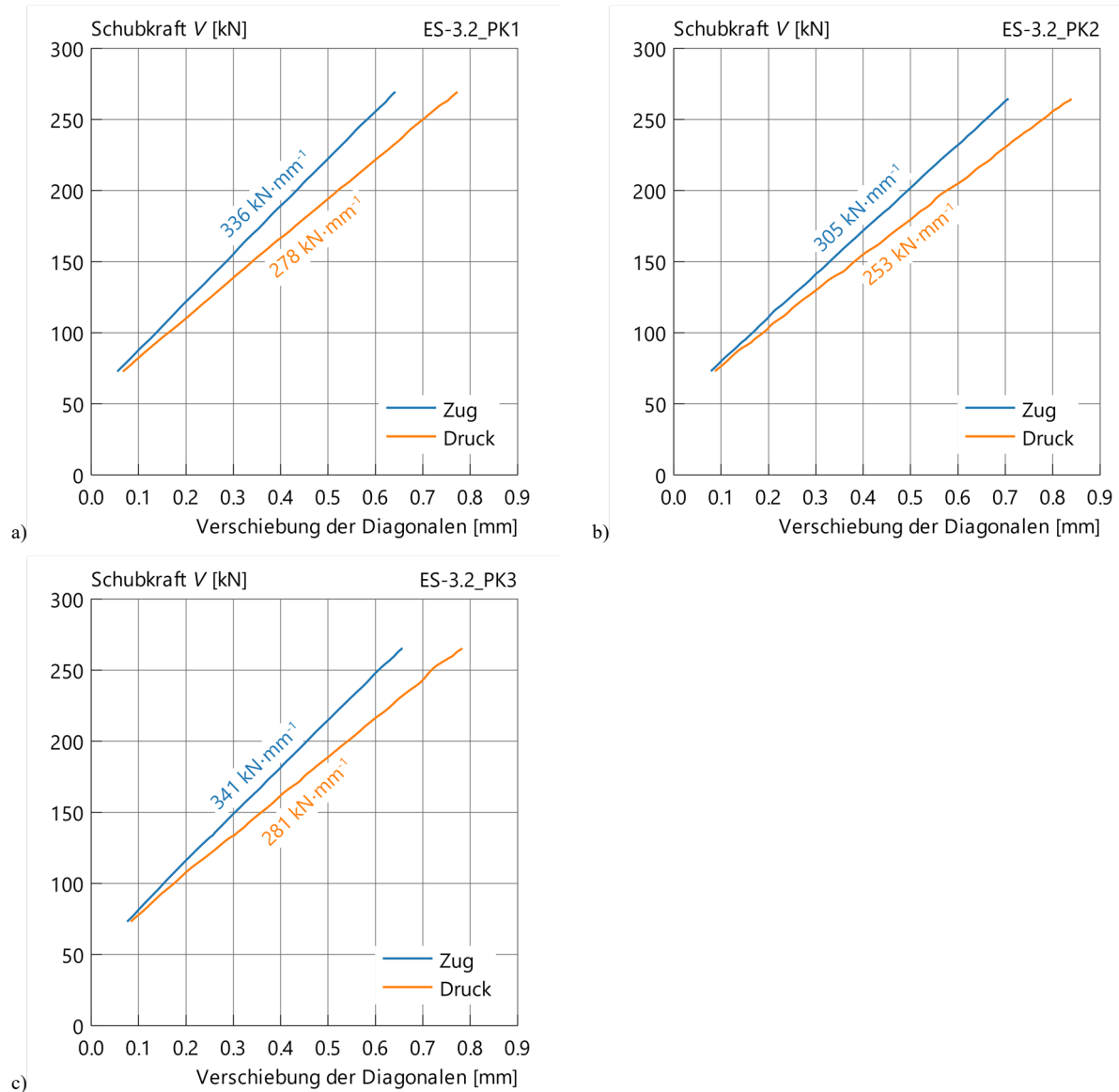


Abb. 7: Last-Verschiebungs-Kurven der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze: a) Prüfkörper ES-3.2_PK1, b) ES-3.2_PK2; c) ES-3.2_PK3.

A.2.8 Versuchsreihe ES-3.3

Die Last-Verschiebungs-Kurven und Steifigkeiten der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze sind in Abb. 8 dargestellt. Die dargestellten Kurven sind Mittelwerte der Zug- oder Druckdiagonalen (auf der Vorderseite und auf der Rückseite).

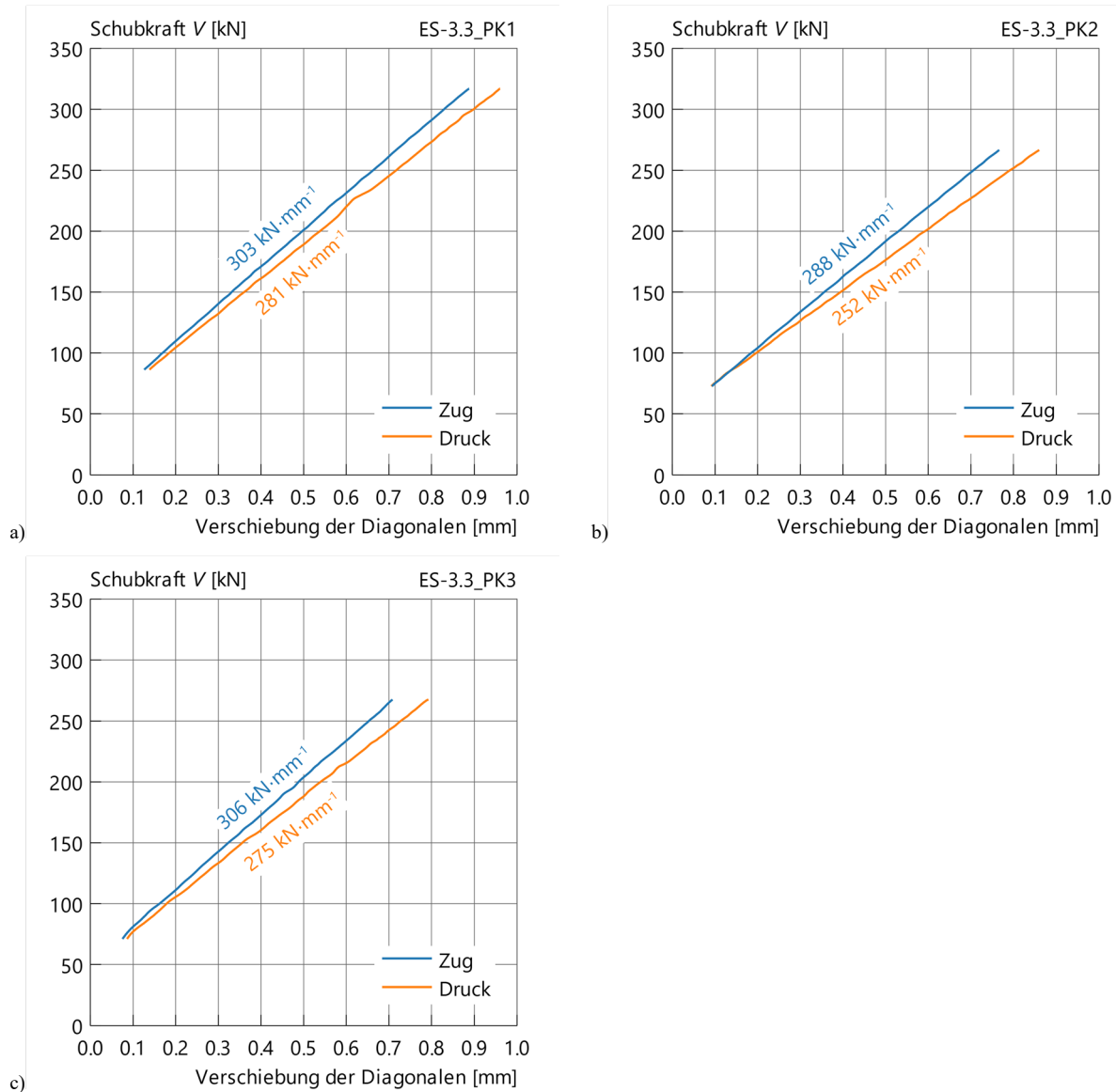


Abb. 8: Last-Verschiebungs-Kurven der Zug- und Druckdiagonalen der Messkreuze: a) Prüfkörper ES-3.3_PK1, b) ES-3.3_PK2; c) ES-3.3_PK3.

FESTLEGUNG DER SCHUBSTEI- FIGKEIT UND SCHUBFESTIG- KEIT VON TRÄGERN, INSB. AUS LAUBHOLZ-BSH

**Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz
Projekt 2019.10**

Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Wald
und
Konferenz für Wald, Wildtiere und Landschaft KWL

Schlussbericht

Anhang B zum Teil 5

Kräftegleichgewicht im Versuchsaufbau für die 4-Punkt-Biegeversuche

Pedro Palma
Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen, 8600 Dübendorf

Inhaltsverzeichnis

B.1	VERSUCHSAUFBAU.....	132
B.2	KRÄFTEGLEICHGEWICHT	133
B.2.1	AUSGANGSSITUATION VOR VERSUCHSBEGINN.....	133
B.2.2	VERLAUF DER KRÄFTE WÄHREND DES VERSUCHS	133
B.2.3	SITUATION BEIM ERREICHEN DER BRUCHLAST	135

B.1 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden auf dem grossen Aufspannfeld der Empa in Dübendorf durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 1 und Abb. 2 dargestellt.

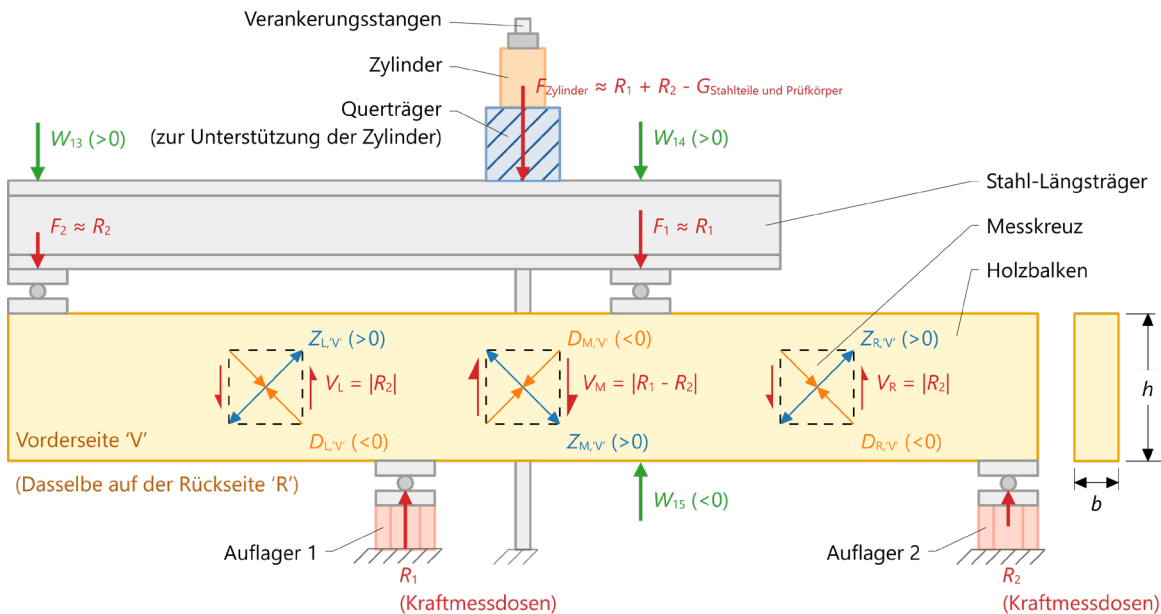
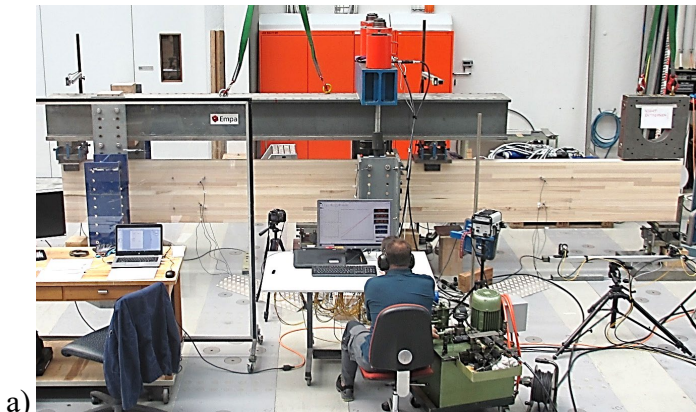


Abb. 1: Versuchsaufbau an der Empa für die 4-Punkt-Biegeversuche an Eschen-BSH. Äussere Kräfte sind mit "F" oder "R" dargestellt, Schub-Schnittkräfte mit "V", vertikale Verschiebungen mit "W" und Verschiebungen in den Schubfeldendiagonalen mit "Z" oder "D" (Zug oder Druck).



a)



b)

Abb. 2: Versuchsaufbau an der Empa für die 4-Punkt-Biegeversuche an Eschen-BSH: a) Versuchs-Typ ES-3.1 und ES-3.2; b) Versuchs-Typ 3.3.

B.2 Kräftegleichgewicht

B.2.1 Ausgangssituation vor Versuchsbeginn

Durch das Eigengewicht der Stahlteile (Auflager, Stahl-Längsträger (grau) zur Lastverteilung, Stahl-Querträger (blau) zur Einleitung der Kraft vom Zylinder-Paar (orange), sowie der Zylinder selbst) wirken die Kräfte $F_{1,G}$ und $F_{2,G}$ auf den Holzträger (Abb. 3 und Abb. 4). Aufgrund dieser Kräfte ergibt sich bei einigen Prüfkongfigurationen eine abhebende Kraft beim Auflager 1 (d.h. $R_2 < 0$). In diesen Fällen muss zur Stabilisierung des Prüfaufbaus eine zusätzliche Kompensationskraft $F_{\text{Komp.}}$ durch die Zylinder aufgebracht werden (so dass $R_2 = 0$). Durch die Kompensationskraft $F_{\text{Komp.}}$ wirken die Kräfte $F_{1,\text{Komp.}}$ und $F_{2,\text{Komp.}}$ auf den Holzträger:

$$F_{\text{Komp.}} = F_{1,\text{Komp.}} + F_{2,\text{Komp.}}$$

mit

$$F_{1,\text{Komp.}} = F_{\text{Komp.}} \cdot \frac{L_a}{L_a + L_b} \quad \text{und} \quad F_{2,\text{Komp.}} = F_{\text{Komp.}} \cdot \frac{L_b}{L_a + L_b}.$$

Diese Belastungskongfiguration schafft bei Versuchsbeginn einen initialen unsymmetrischen Zustand im Querkraftverlauf ($V_L \neq V_R$).

Bei kurzen mittleren Schubfeldern liegen die Wirkungslinien der Kräfte F_1 und R_1 näher beieinander. Dadurch entsteht der Eindruck, dass das System instabiler wäre. In diesen Fällen hat der Stahlträger jedoch auch eine längere Auskragung auf der rechten Seite von F_1 , wodurch sich die Kraft $F_{1,G}$ im Vergleich zu $F_{2,G}$ erhöht. Dies trägt zur Stabilisierung des Versuchsaufbaus bei. Die berechneten benötigten Kompensationskräfte $F_{\text{Komp.}}$, die von den Zylindern aufgebracht werden müssen, um bei Versuchsbeginn das Abheben des Holzträgers vom Auflage 1 zu verhindern, sind in der Abb. 3 dargestellt. Bei der Berechnung der Kräfte wurde das günstige wirkende Eigengewicht des Holzträgers vernachlässigt.

B.2.2 Verlauf der Kräfte während des Versuchs

Das Zylinder-Paar bringt die Prüfkraft F_P auf, welche als Kräfte $F_{1,P}$ und $F_{2,P}$ auf den Holzträger wirken. Diese Kräfte bewirken die Reaktionskräfte $R_1 = R_{1,\text{ini}} + F_{1,P}$ und $R_2 = R_{2,\text{ini}} + F_{2,P}$ in den beiden Auflagern. Die durch die Kräfte F_1 und F_2 verursachten vertikalen Verschiebungen sind sehr ähnlich (d.h. der Stahlträger bleibt horizontal), so dass Symmetrie angenommen werden kann. Mit zunehmender Prüfkraft F_P verlieren die initial unterschiedlichen Schnittkräfte an Bedeutung (Abb. 4)

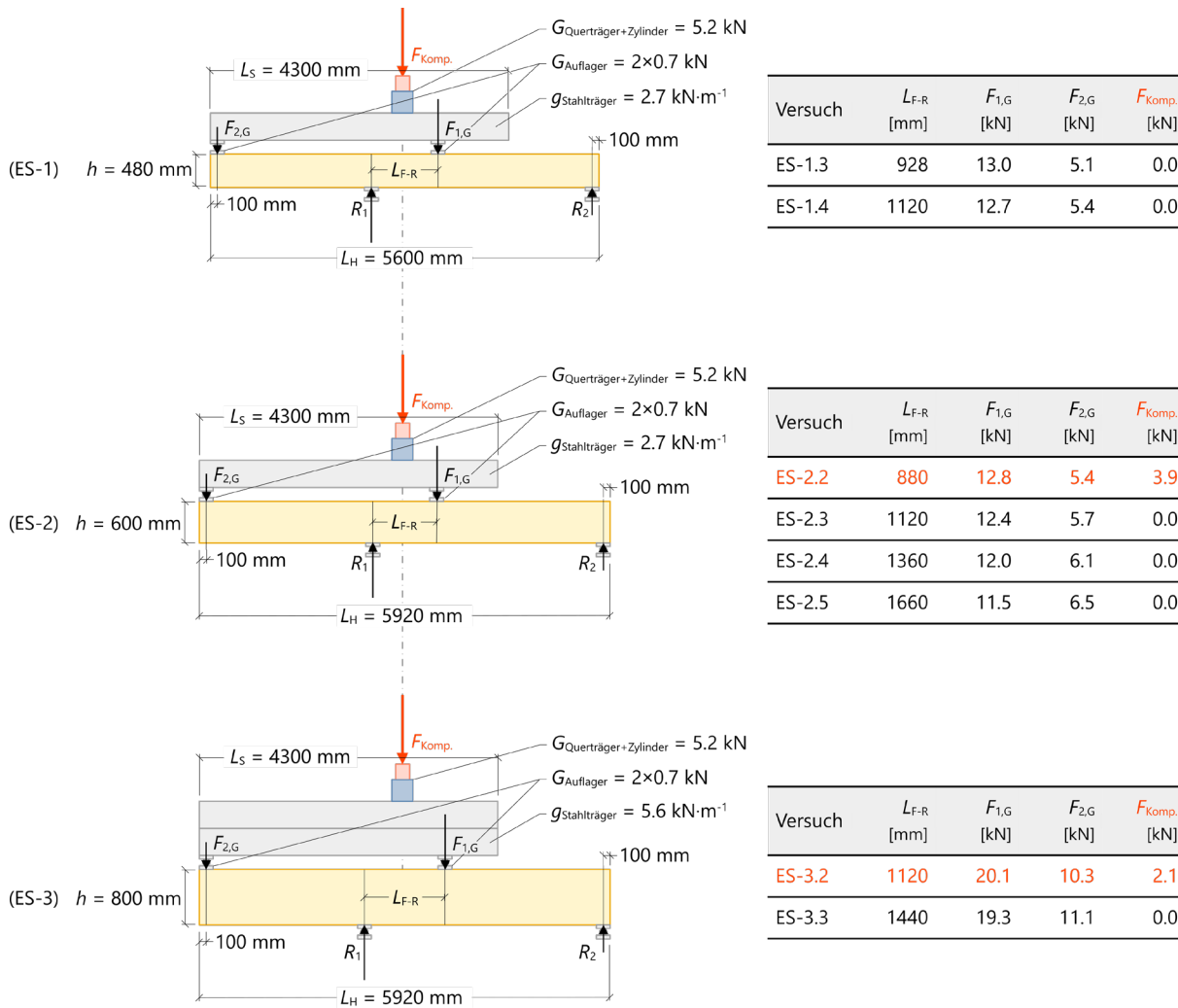


Abb. 3: Kräftegleichgewicht am Prüfkörper zu Beginn der Versuche.

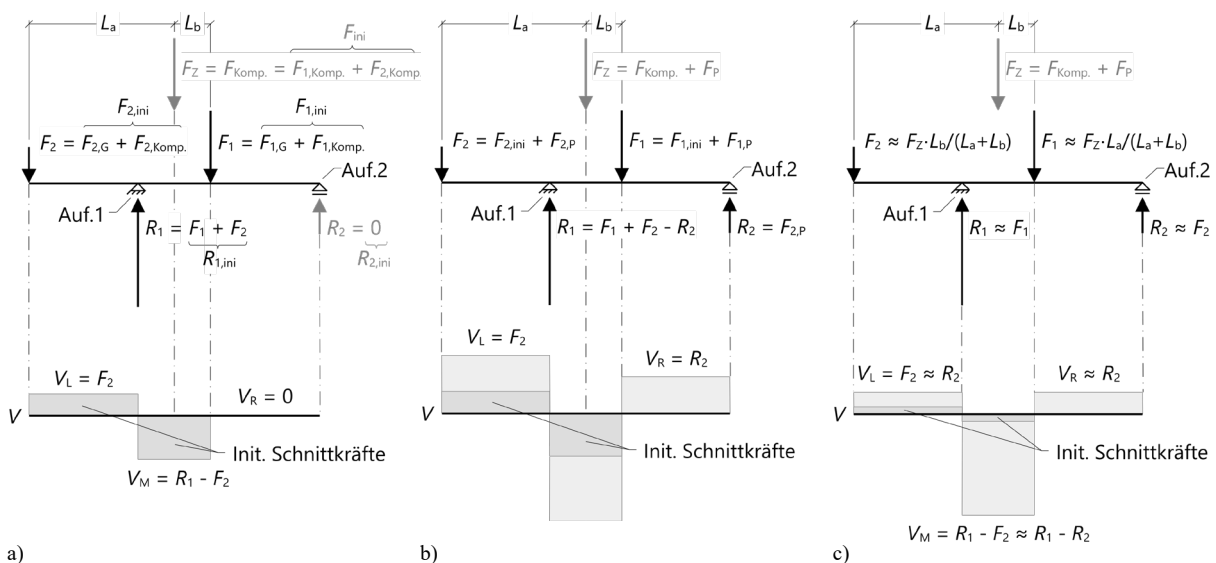


Abb. 4: Kräftegleichgewicht und Querkraftflächen: a) Ausgangssituation; b) während der Prüfung; c) am Ende der Prüfung.

B.2.3 Situation beim Erreichen der Bruchlast

Die initiale Kompensationskraft $F_{\text{Komp.}}$, welche das Zylinder-Paar zur Stabilisierung des Versuchsaufbaus aufbringt, ist vernachlässigbar (weniger als 1%) im Vergleich zu den beim Erreichen der Bruchlast gemessenen Reaktionskräften ΣR_i . Unter der Annahme, dass $R_1 \approx F_1$ und $R_2 \approx F_2$ ist, liegen die gemessenen Werte der Reaktionskräfte R_1 und R_2 sehr nahe an den erwarteten theoretischen Werten

$$\frac{R_1}{R_1+R_2} = \frac{L_a}{L_a+L_b} \quad \text{und} \quad \frac{R_2}{R_1+R_2} = \frac{L_b}{L_a+L_b}.$$

Die in Abb. 5 – Abb. 7 dargestellten Messungen der Reaktionskräfte bestätigen dies. Die Annahme von $V_M = R_1 - R_1$ stellt daher einen vernachlässigbare Ungenauigkeit dar.

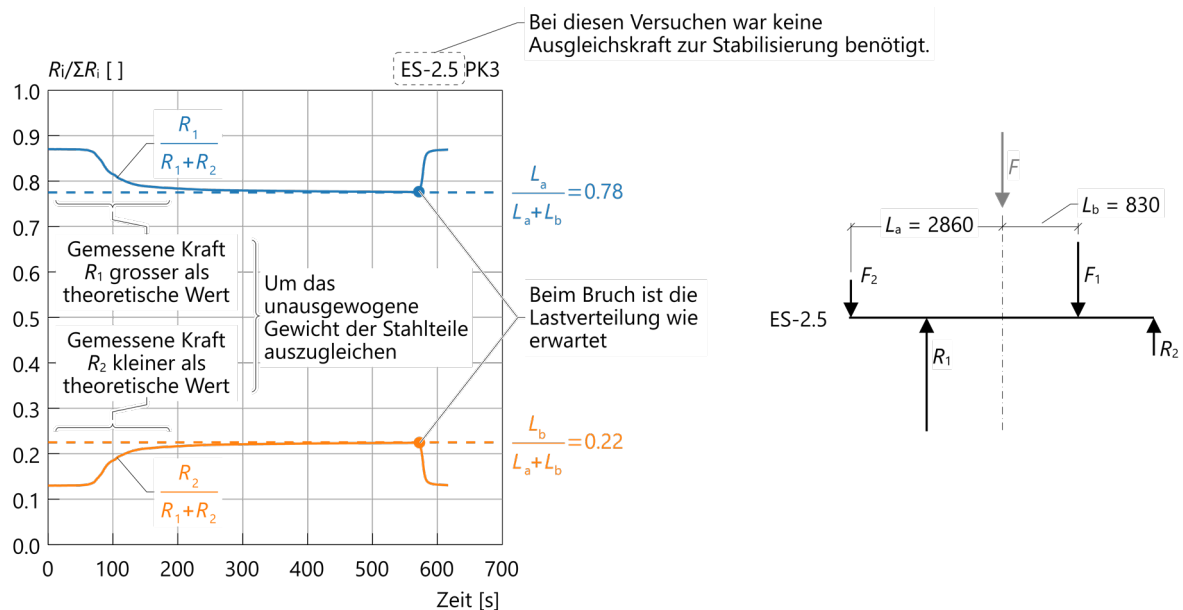


Abb. 5: Zeitverlauf der Messungen der Reaktionskräfte: Versuch ES-2.5 PK3.

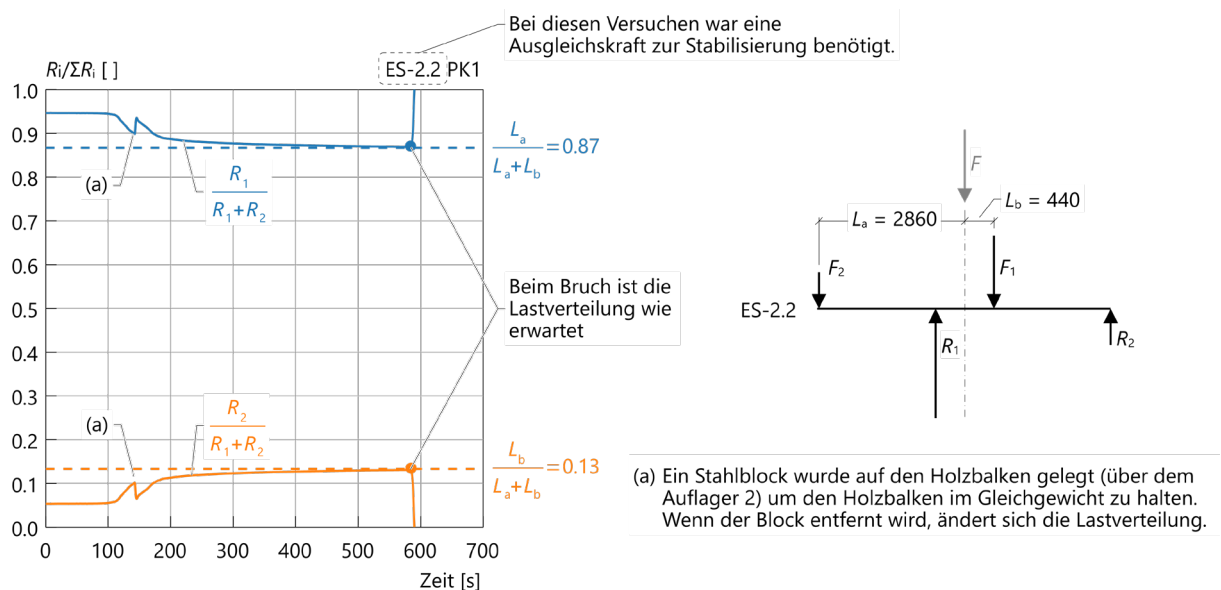


Abb. 6: Zeitverlauf der Messungen der Reaktionskräfte: Versuch ES-2.2 PK1.

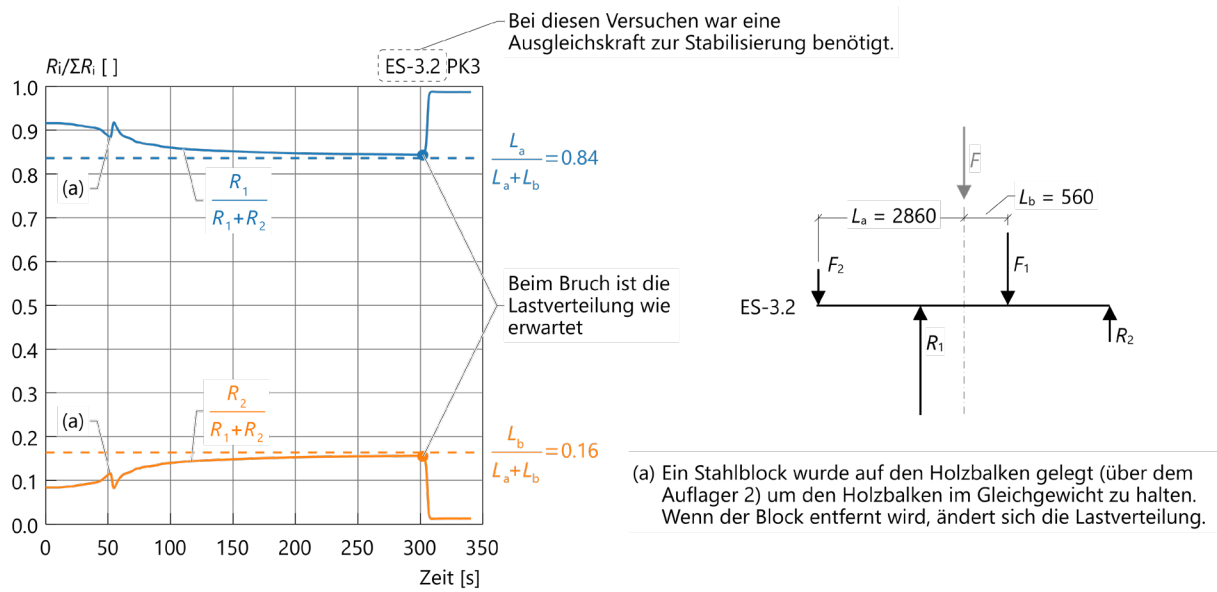


Abb. 7: Zeitverlauf der Messungen der Reaktionskräfte: Versuch ES-3.2 PK3.

FESTLEGUNG DER SCHUBSTEI- FIGKEIT UND SCHUBFESTIG- KEIT VON TRÄGERN, INSB. AUS LAUBHOLZ-BSH

**Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz
Projekt 2019.10**

Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Wald
und
Konferenz für Wald, Wildtiere und Landschaft KWL

Schlussbericht Teil 6 Folgerungen aus den Versuchen

René Steiger und Pedro Palma
Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen, 8600 Dübendorf

Inhaltsverzeichnis

1	SCHUBFESTIGKEITEN	140
1.1	EINFLUSS DER BAUTEILGRÖSSE AUF DIE SCHUBFESTIGKEIT VON FICHTENHOLZ	140
1.2	ERGEBNISSE DER VERSUCHE AN FICHTEN-BSH	140
1.2.1	<i>3-Punkt-Biegung</i>	<i>140</i>
1.3	ERGEBNISSE DER VERSUCHE AN ESCHEN-BSH	141
1.3.1	<i>3-Punkt-Biegung</i>	<i>141</i>
1.3.2	<i>4-Punkt-Biegung</i>	<i>141</i>
1.4	GRÖSSENEINFLUSS BEI BUCHEN-BSH	142
1.5	BEWERTUNG DER BEZUGSGRÖSSEN SCHUBFLÄCHE, TRÄGERHÖHE UND α	142
1.5.1	<i>Einfluss der Schubfläche A_{shear}</i>	<i>142</i>
1.5.2	<i>Einfluss der Balkenhöhe h</i>	<i>144</i>
1.5.3	<i>Einfluss des Verhältnisses $\alpha = L_v/h$ bei den 4-Punkt-Biegeversuchen</i>	<i>146</i>
2	SCHUBMODULN	146
2.1	FICHTEN-BSH	146
2.2	ESCHEN-BSH	146
2.2.1	<i>3-Punkt-Biegeversuche</i>	<i>146</i>
2.2.2	<i>4-Punkt-Biegeversuche</i>	<i>147</i>
2.3	VERGLEICH MIT BUCHEN-BSH	147
3	UMSETZUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE IN DIE BAUPRAXIS.....	147
3.1	ROHDICHTE UND HOLZFEUCHTE VON ESCHEN-BSH	147
3.2	SCHUBMODULN VON ESCHEN-BSH	148
3.3	SCHUBFESTIGKEITEN VON ESCHEN-BSH	148
3.4	EINFLUSS DER BAUTEILGRÖSSE AUF DIE SCHUBFESTIGKEIT VON ESCHEN-BSH	149
4	EIGNUNG DER EINGESETZTEN PRÜFKONFIGURATIONEN.....	149
4.1	VERSTÄRKUNG DER LASTEINLEITUNGSZONEN	149
4.2	PRÜFKÖRPERABMESSUNGEN	149
4.2.1	<i>Querschnittsabmessung</i>	<i>149</i>
4.2.2	<i>Verhältnis der Schubfeldlänge zur Trägerhöhe, bzw. notwendige Prüfkörperlänge.....</i>	<i>150</i>
4.3	3-PUNKT-BIEGEVERSUCHE VERSUS 4-PUNKT-BIEGEVERSUCHE.....	151
4.3.1	<i>Grundsätzlicher Vergleich der beiden Prüfkfigurationen</i>	<i>151</i>
4.3.2	<i>Vor und während der Prüfung wirkende Kräfte</i>	<i>151</i>
4.3.3	<i>Messung der Verformungen in den Schubfeldern mittels Bildkorrelation</i>	<i>153</i>
4.3.4	<i>Lage der in den Versuchen aufgetretenen Schubbrüche</i>	<i>153</i>
4.3.5	<i>Empfehlungen für die werkseigene Produktionskontrolle.....</i>	<i>155</i>
5	LITERATUR	155

1 Schubfestigkeiten

1.1 Einfluss der Bauteilgrösse auf die Schubfestigkeit von Fichtenholz

Für Bauteile aus Fichtenholz ist der Einfluss der Bauteilgrösse auf die Schubfestigkeit gut dokumentiert und aufgrund des sehr spröden Bruchverhaltens auch theoretisch begründbar. Eingehendere Untersuchungen gehen zurück auf die 1970er Jahre (Keenan 1974 [1]; Barret und Foschi 1977 [2]). Die Ansätze sind leicht unterschiedlich: Keenan geht von der Grösse der Schubfläche aus, Barret / Foschi von einem Schubvolumen. Gehri zeigte bereits 1981 [3], dass beide Ansätze zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Für die Baupraxis ist der einfachere Ansatz zu bevorzugen:

$$f_v = k \cdot A_{\text{shear}}^{-0.28}.$$

Die Abb. 1 zeigt den Verlauf des Grössenkorrekturfaktors in Funktion des α -Wertes (Verhältnis zwischen Schubfeldlänge und Trägerhöhe). Die Schubfläche ist in der Abb. 2 definiert.

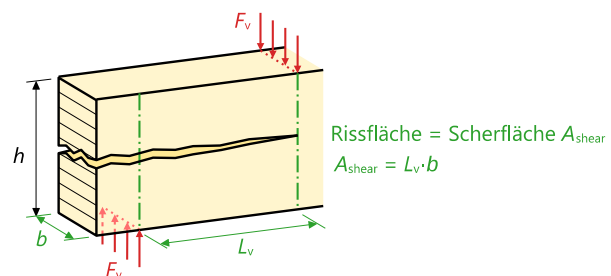
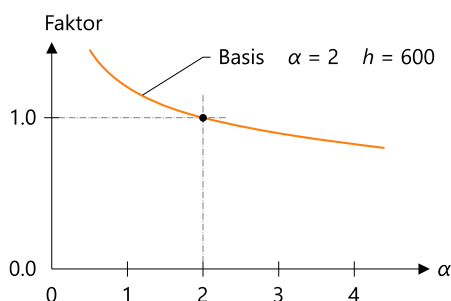


Abb. 1: Grössenkorrekturfaktor in Funktion des α Wertes (Verhältnis zwischen Schubfeldlänge und Trägerhöhe) für Fichte.

Abb. 2: Die Schubfläche A_{shear} wird gebildet aus der Trägerbreite b und der Länge des Schubfeldes L_v .

1.2 Ergebnisse der Versuche an Fichten-BSH

1.2.1 3-Punkt-Biegung

Der Mittelwert der in den Versuchen mit 3-Punkt-Biegebelastung an Fichten-BSH der Festigkeitsklasse GL 32c ermittelten Schubfestigkeit betrug $f_{v,\text{mean}} = 4.1 \text{ N/mm}^2$, der Variationskoeffizient 19%. Die Schnittart des einzelnen Brettes hat einen grossen Einfluss auf die Schubfestigkeit und beeinflusst stark, in welcher Zone des Trägers der Schubbruch erfolgt. Die Schubfestigkeit ist abhängig von der Grösse bzw. den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers. Im Vergleich zu Eschen-BSH (siehe 1.3.1) ist der Grösseneinfluss bei Fichten-BSH markanter. Es wurden die folgenden Zusammenhänge ermittelt:

- Zwischen der Schubfestigkeit und der Fläche des Schubfeldes A_{shear} :

$$f_v = 2053 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.52} \quad \text{für alle Verhältnisse von Schubfeldlänge } L_v \text{ zur Trägerhöhe } h$$
 bzw. für alle α -Werte

$$f_v = 39924 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.77} \quad \text{für } \alpha = 1.6$$
- Zwischen der Schubfestigkeit und der Trägerhöhe h :

$$f_v = 511 \cdot h^{-0.76}.$$
 bzw. bezogen auf eine Referenzträgerhöhe von $h = 600 \text{ mm}$:

$$f_v = 4.0 \left(\frac{600}{h} \right)^{0.76}$$

Der Mittelwert der Schubspannungen beim Riss betrug $\tau_{\text{Riss,mean}} = 3.8 \text{ N/mm}^2$, der Variationskoeffizient 19%. Es wurden die folgenden Zusammenhänge ermittelt:

- Zwischen der Schubspannung beim Riss und der Fläche des Schubfeldes A_{shear} :

$$\tau_{\text{Riss}} = 372 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.39} \quad \text{für alle } \alpha\text{-Werte}$$

$$\tau_{\text{Riss}} = 574 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.42} \quad \text{für } \alpha = 1.6$$
- Zwischen der Schubspannung und der Trägerhöhe h :

$$\tau_{\text{Riss}} = 51 \cdot h^{-0.41} \quad \text{bzw.} \quad \tau_{\text{Riss}} = 3.7 \left(\frac{600}{h} \right)^{0.41}.$$

1.3 Ergebnisse der Versuche an Eschen-BSH

1.3.1 3-Punkt-Biegung

Der Mittelwert der Schubfestigkeit bestimmt aus den 3-Punkt-Biegeversuchen an Eschen-BSH der Festigkeitsklasse GL 48c betrug $f_{v,\text{mean}} = 10.2 \text{ N/mm}^2$, der Variationskoeffizient 14%. Die Schubfestigkeit ist abhängig von der Grösse bzw. den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers. Es wurden die folgenden Zusammenhänge ermittelt:

- Zwischen der Schubfestigkeit und der Fläche des Schubfeldes A_{shear} :

$$f_v = 92 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.19}$$
- Zwischen der Schubfestigkeit und der Trägerhöhe h :

$$f_v = 34 \cdot h^{-0.19} \quad \text{bzw.} \quad f_v = 10.2 \left(\frac{600}{h} \right)^{0.19}.$$

Der Mittelwert der Schubspannung am Ort des Schubbruchs betrug $\tau_{\text{Riss,mean}} = 9.2 \text{ N/mm}^2$, der Variationskoeffizient 16%. Die Schubspannung am Ort des Schubbruchs ist abhängig von der Grösse bzw. den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers. Es wurden die folgenden Zusammenhänge ermittelt:

- Zwischen Schubspannung am Ort des Schubbruchs und Fläche des Schubfeldes A_{shear} :

$$\tau_{\text{Riss}} = 106 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.21}.$$
- Zwischen der Schubspannung am Ort des Schubbruchs und der Trägerhöhe h :

$$\tau_{\text{Riss}} = 35 \cdot h^{-0.21} \quad \text{bzw.} \quad \tau_{\text{Riss}} = 9.1 \left(\frac{600}{h} \right)^{0.21}.$$

1.3.2 4-Punkt-Biegung

Der Mittelwert der Schubfestigkeit betrug $f_{v,\text{mean}} = 12.2 \text{ N/mm}^2$, der Variationskoeffizient 15%. Die Schubfestigkeit ist abhängig von der Grösse bzw. den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers. Allerdings ist der Grösseneinfluss bei Weitem nicht so gut erkennbar, wie bei den 3-Punkt-Biegeversuchen. Es wurden die folgenden Zusammenhänge ermittelt:

- Zwischen der Schubfestigkeit und der Fläche des Schubfeldes A_{shear} :

$$f_v = 45 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.11}.$$
- Zwischen der Schubfestigkeit und der Trägerhöhe h :

$$f_v = 127 \cdot h^{-0.37} \quad \text{bzw.} \quad f_v = 12.2 \left(\frac{600}{h} \right)^{0.37}.$$

Der Mittelwert der Schubspannung am Ort des Schubbruchs betrug $\tau_{\text{Riss,mean}} = 11.5 \text{ N/mm}^2$, der Variationskoeffizient 19%. Die Schubspannung am Ort des Schubbruchs ist abhängig von der Grösse bzw. den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers. Allerdings ist auch für die Schubspannung am Ort des Schubbruchs der Grösseneinfluss bei Weitem nicht so gut erkennbar, wie bei den 3-Punkt-Biegeversuchen. Es wurden (unter Vernachlässigung der sehr tiefen

Schubspannung $\tau_{\text{Riss}} = 6.3 \text{ N/mm}^2$ des Prüfkörpers ES-2.5 PK1) die folgenden Zusammenhänge ermittelt:

- Zwischen Schubspannung am Ort des Schubbruchs und Fläche des Schubfeldes A_{shear} :

$$\tau_{\text{Riss}} = 49 \cdot A_{\text{shear}}^{-0.12}$$
- Zwischen der Schubspannung am Ort des Schubbruchs und der Trägerhöhe h :

$$\tau_{\text{Riss}} = 117 \cdot h^{-0.36} \quad \text{bzw.} \quad \tau_{\text{Riss}} = 11.7 \left(\frac{600}{h} \right)^{0.36}.$$

1.4 Grösseneinfluss bei Buchen-BSH

Ehrhart [4] hat 3-Punkt-Biegeversuche an Brettschichtholzträgern aus Buche, Festigkeitsklasse GL 48c, mit I-förmigem Querschnitt durchgeführt. Die Mittelwerte der Schubfestigkeit betrugen $f_{v,\text{mean}} = 16.0 \text{ N/mm}^2$ bei einer Balkenhöhe $h = 200 \text{ mm}$ (Variationskoeffizient 6%), $f_{v,\text{mean}} = 13.2 \text{ N/mm}^2$ bei einer Balkenhöhe $h = 400 \text{ mm}$ (nur 3 Versuche) und $f_{v,\text{mean}} = 9.4 \text{ N/mm}^2$ bei einer Balkenhöhe $h = 600 \text{ mm}$ (Variationskoeffizient 12%). In den Versuchen von [4] zeigte sich, dass die Schubfestigkeit von Buchen-BSH abhängig ist von der Grösse bzw. den geometrischen Abmessungen. Ehrhart ermittelte den folgenden Zusammenhang zwischen der Schubfestigkeit und der Trägerhöhe:

$$f_v = f_{v,\text{Ref.}} \left(\frac{600}{h} \right)^{0.40}.$$

Damit liegen die Exponenten zur Beschreibung des Volumeneinflusses in Abhängigkeit der Trägerhöhe in einer ähnlichen Grössenordnung wie bei Eschen-BSH (4-Punkt-Biegung).

Bei den durch Gehri im Rahmen des vorliegenden Projekts durchgeführten 3-Punkt-Biegeversuchen an Buchen-BSH der Festigkeitsklasse GL 48c mit Trägerhöhen zwischen 400 und 700 mm ergab sich ein Mittelwert der Schubfestigkeit von $f_{v,\text{mean}} = 9 \text{ N/mm}^2$ (siehe Teil 2 dieses Berichts). Die Abhängigkeit der Schubfestigkeit von der Trägerhöhe konnte mit der Formel $f_v = 119 \cdot h^{-0.40}$ beschrieben werden (siehe Abb. 25 im Teil 2 dieses Berichts).

1.5 Bewertung der Bezugsgrössen Schubfläche, Trägerhöhe und α

1.5.1 Einfluss der Schubfläche A_{shear}

In den 3- und 4-Punkt-Prüfungen an Fichten-BSH wurde erwartungsgemäss festgestellt, dass die Schubfestigkeit abhängig ist von der Schubfläche A_{shear} (Abb. 3). Im Vergleich zur Esche ist der Grösseneinfluss in der Fichte markanter. Auch sind die in den Versuchen ermittelten Exponenten deutlich grösser als die in der Literatur angegebenen Werte (siehe Ziffer 1). Bei den 3- und 4-Punkt-Prüfungen an Eschen-BSH ist die Abhängigkeit der Schubfestigkeit von der Schubfläche A_{shear} nicht so gut erkennbar (Abb. 4, Abb. 5 und Abb. 6).

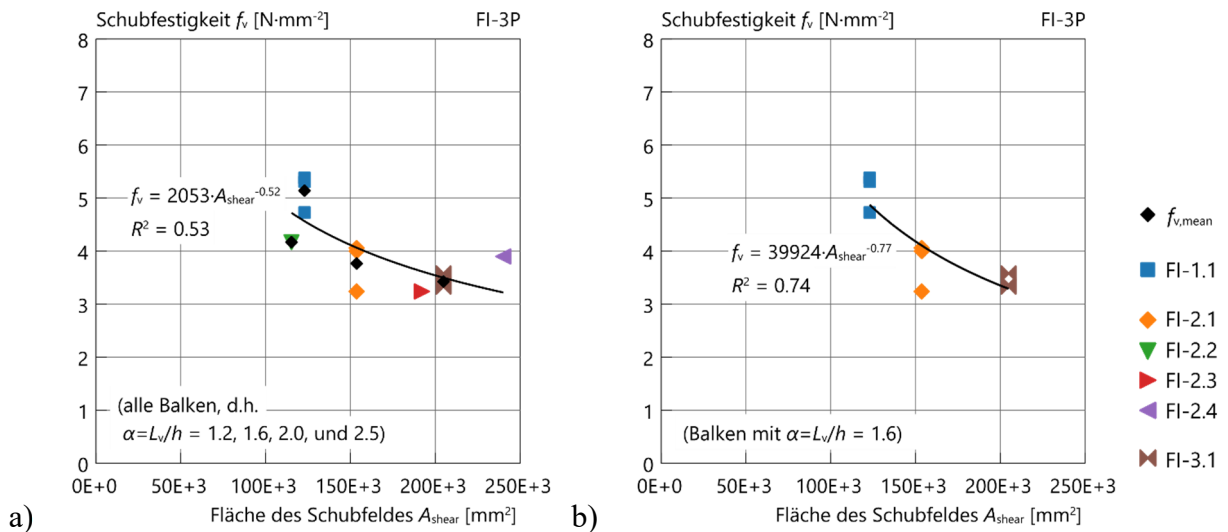


Abb. 3: Schubfestigkeit f_v in Funktion der Fläche des Schubfeldes A_{shear} für Fichten-BSH – 3-Punkt-Biegung: a) alle Verhältnisse α ; b) nur Verhältnisse $\alpha = 1.6$.

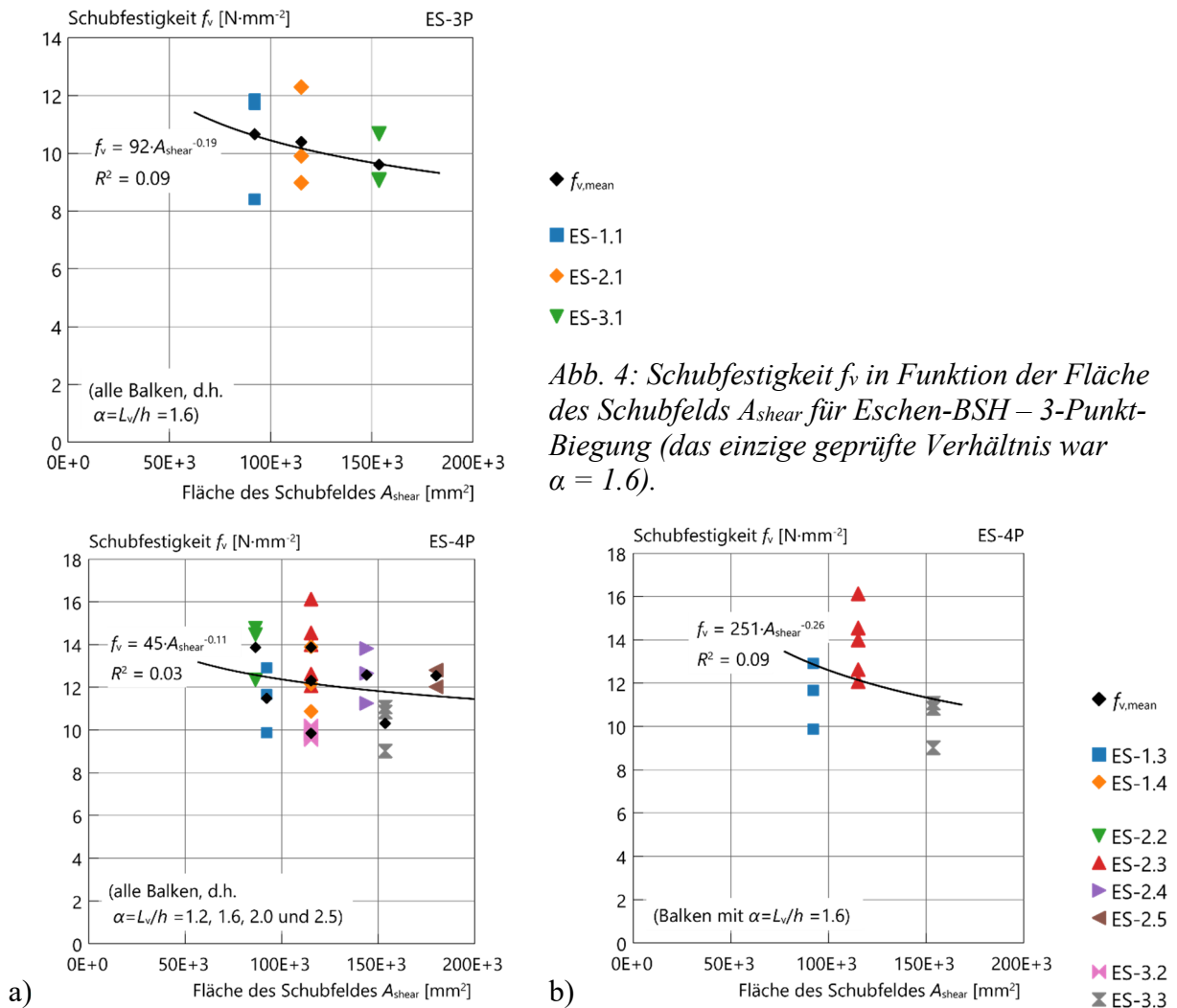


Abb. 4: Schubfestigkeit f_v in Funktion der Fläche des Schubfeldes A_{shear} für Eschen-BSH – 3-Punkt-Biegung (das einzige geprüfte Verhältnis war $\alpha = 1.6$).

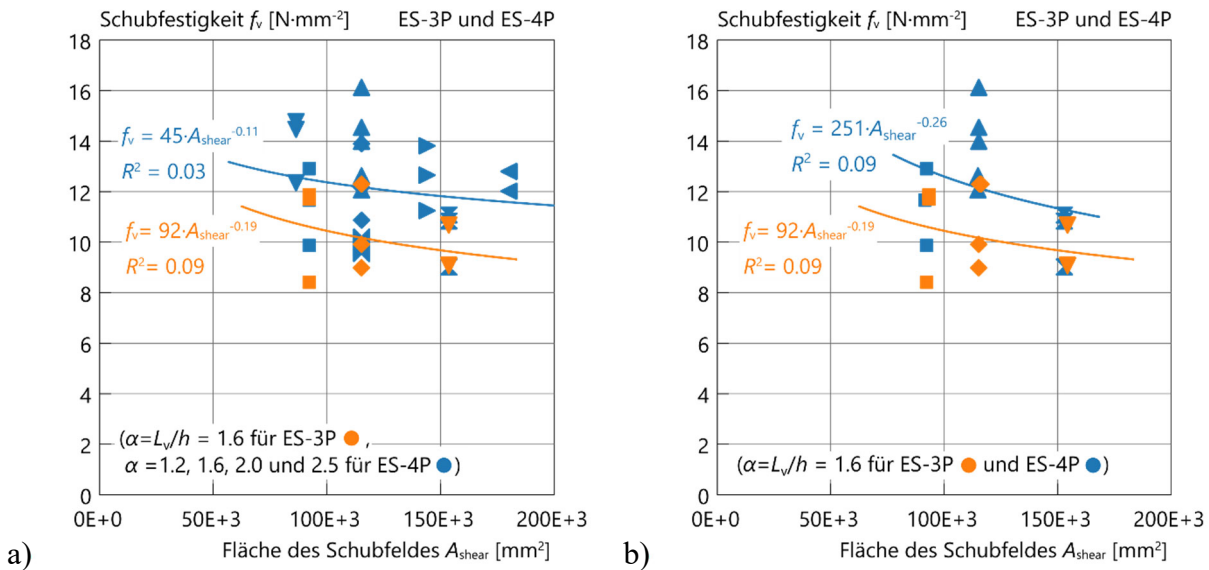


Abb. 6: Schubfestigkeit f_v in Funktion der Fläche des Schubfeldes A_{shear} für Eschen-BSH – 3- und 4-Punkt-Biegung: a) alle Verhältnisse α ; b) nur Verhältnisse $\alpha = 1.6$.

1.5.2 Einfluss der Balkenhöhe h

Aus den 3- und 4-Punkt-Versuchen an Fichten-BSH konnte die Abhängigkeit der Schubfestigkeit von der Balkenhöhe h gemäss Abb. 7 abgeleitet. In den 3- und 4-Punkt-Biegeversuchen an Eschen-BSH wurde die in Abb. 8, Abb. 9 und Abb. 10 dargestellte, im Vergleich zur Fichte weniger markante Abhängigkeit der Schubfestigkeit von der Balkenhöhe h ermittelt.

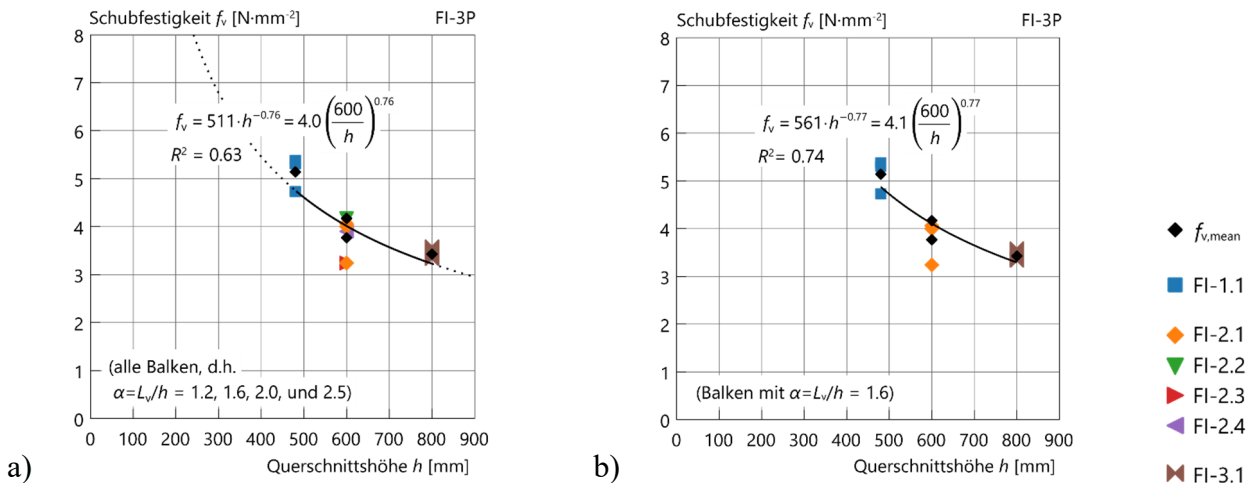


Abb. 7: Schubfestigkeit f_v in Funktion der Trägerhöhe h für Fichten-BSH – 3-Punkt-Biegung: a) alle Verhältnisse α ; b) nur Verhältnisse $\alpha = 1.6$.

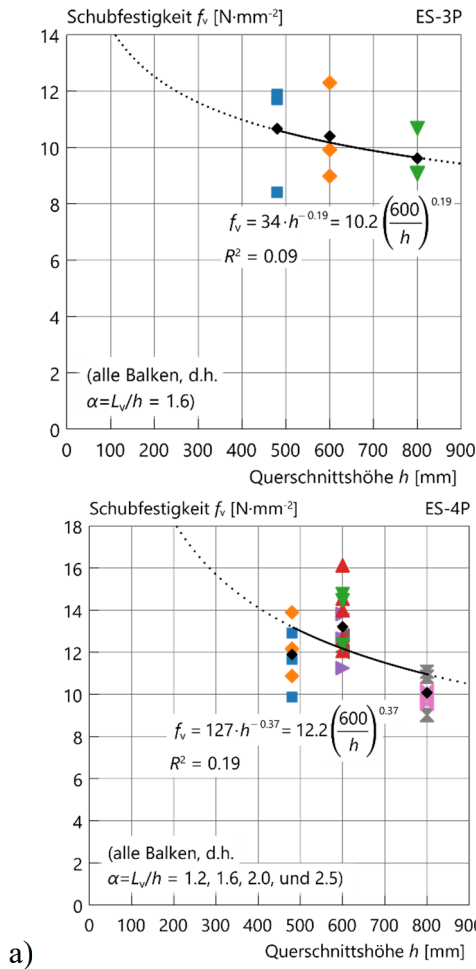


Abb. 8: Schubfestigkeit f_v in Funktion der Trägerhöhe h für Eschen-BSH – 3-Punkt-Biegung (das einzige geprüfte Verhältnis war $\alpha = 1.6$).

Abb. 9: Schubfestigkeit f_v in Funktion der Trägerhöhe h für Eschen-BSH – 4-Punkt-Biegung: a) alle Verhältnisse α ; b) nur Verhältnisse $\alpha = 1.6$.

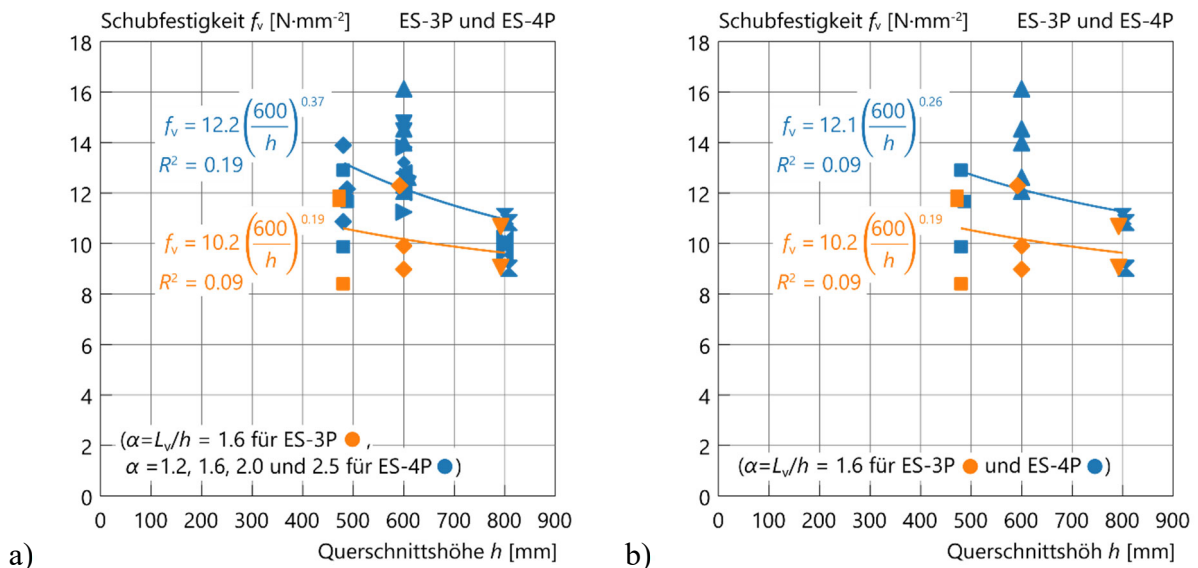


Abb. 10: Schubfestigkeit f_v in Funktion der Trägerhöhe h für Eschen-BSH – 3- und 4-Punkt-Biegung: a) alle Verhältnisse α ; b) nur Verhältnisse $\alpha = 1.6$.

1.5.3 Einfluss des Verhältnisses $\alpha = L_v/h$ bei den 4-Punkt-Biegeversuchen

Bei allen untersuchten Alpha-Werten sind stets Schubbrüche aufgetreten. Die Prüfung von hohen Balken ($h = 800$ mm) führt zu niedrigeren Werten der Schubfestigkeit (Abb. 11a). Der Grund dafür könnte in der grösseren Anzahl an Lamellen in der Schubzone liegen (die Anzahl der Lamellen in der Zone mit Schubspannungen über 80% der maximalen Schubspannung beträgt 6, bzw. 7, bzw. 10 für die Balkenhöhe 480, bzw. 600, bzw. 800 mm). Es wurde jedoch kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Balkenhöhe h und der Schubfestigkeit f_v festgestellt. Die Balken mit niedrigen α -Werten und grosser Trägerhöhe h wiesen jedoch auch grössere Schubfeldlängen L_v auf (Abb. 11b). Deshalb ist es nicht möglich, bei gleichem α -Wert den Einfluss der Trägerhöhe h und den Einfluss der Schubfeldlänge L_v klar zu unterscheiden.

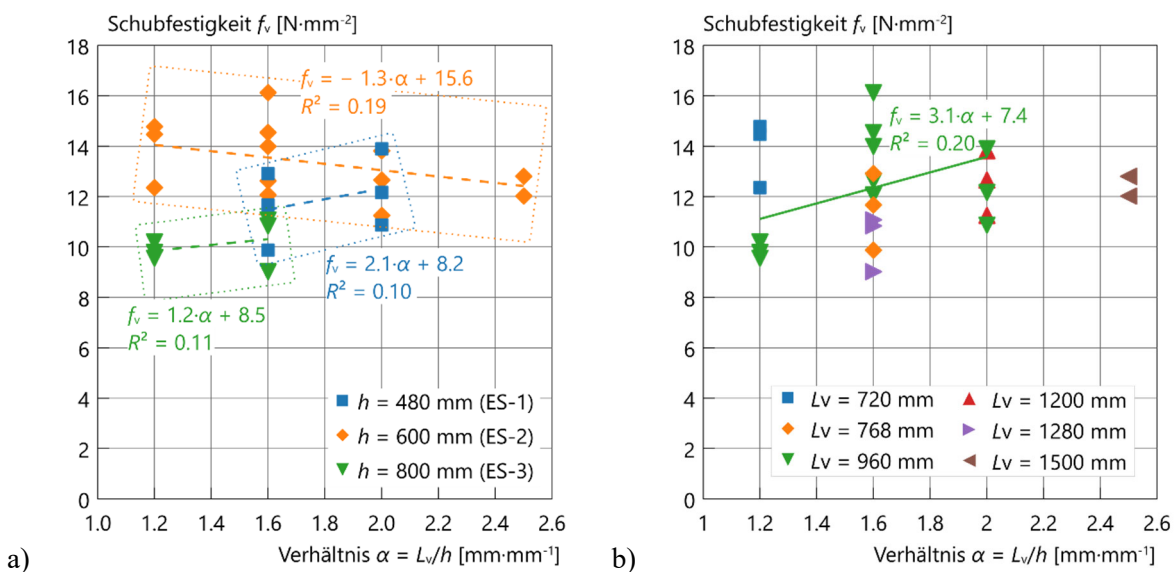


Abb. 11. Schubfestigkeit f_v in Abhängigkeit von α : a) für die drei Balkenhöhen $h = 480$ mm, 600 mm und 800 mm; b) für die sechs untersuchten Schubfeldlängen L_v von 720 mm bis 1500 mm.

2 Schubmodul

2.1 Fichten-BSH

Der in den 3-Punkt-Biegeversuchen an Fichten-BSH der Festigkeitsklasse GL 32c ermittelte Mittelwert des Schubmoduls betrug $G_{\text{mean}} = 603 \text{ N/mm}^2$, der Variationskoeffizient 4%. In der Norm SIA 265:2021 [5] ist ein Mittelwert des Schubmoduls von 650 N/mm^2 für Fichten-BSH sämtlicher Festigkeitsklassen angegeben. Wie hinlänglich bekannt, ist der Schubmodul von Fichten-BSH unabhängig von der Prüfkörpergrösse.

2.2 Eschen-BSH

2.2.1 3-Punkt-Biegeversuche

Der Mittelwert des Schubmoduls aus allen neun 3-Punkt-Biegeversuchen betrug $G_{\text{mean}} = 1162 \text{ N/mm}^2$, der Variationskoeffizient 6%. In den Versuchen konnte keine Abhängigkeit des Schubmoduls von der Grösse und den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers festgestellt werden.

2.2.2 4-Punkt-Biegeversuche

Der Mittelwert des Schubmoduls aus allen 26 4-Punkt-Biegeversuchen betrug $G_{\text{mean}} = 1120 \text{ N/mm}^2$, der Variationskoeffizient 6%. Auch die 4-Punkt-Biegeversuche zeigten keine Abhängigkeit des Schubmoduls ist von der Grösse und den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers.

2.3 Vergleich mit Buchen-BSH

In 3-Punkt-Biegeversuchen an Brettschichtholzträgern aus Buchen-BSH der Festigkeitsklasse GL 48c mit I-förmigem Querschnitt hat Ehrhart [4] einen Mittelwert des Schubmoduls von $G_{\text{mean}} = 1170 \text{ N/mm}^2$ und einen Variationskoeffizienten von 11% ermittelt. Ehrhart berichtet, dass der Schubmodul von Buchen-BSH unabhängig ist von der Grösse und den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers.

Bei den durch Gehri im Rahmen des vorliegenden Projekts durchgeführten 3-Punkt-Biegeversuchen an Buchen-BSH der Festigkeitsklasse GL 48c mit Trägerhöhen zwischen 400 und 700 mm ergab sich ein Mittelwert des Schubmoduls von $G_{\text{mean}} = 1000\text{-}1100 \text{ N/mm}^2$ (siehe Teil 2 des vorliegenden Berichts).

3 Umsetzung der Versuchsergebnisse in die Baupraxis

Obwohl es wegen der komplexen und umfangreichen Versuche zu Verzögerungen im Forschungsprojekt gekommen ist, konnten die Versuchsergebnisse zum Eschen-BSH rechtzeitig an die Autoren der Publikation Lignatec 33/2021 "Verklebte Laubholzprodukte für den statischen Einsatz" [6] kommuniziert und somit in effizienter Weise in die Praxis umgesetzt werden. Nachfolgend wird ein Überblick über die Angaben im Lignatec 33/2021 gegeben.

3.1 Rohdichte und Holzfeuchte von Eschen-BSH

Im Lignatec "Verklebte Laubholzprodukte für den statischen Einsatz" [6] sind die Mittelwerte für die Rohdichte von Eschen-BSH für eine Holzfeuchte von $10 \pm 1\%$ wie folgt angegeben:

- Festigkeitsklasse GL 40c: $\rho_{\text{mean},10\%} = 610 \text{ kg/m}^3$ und $\rho_{k,10\%} = 550 \text{ kg/m}^3$ (was unter der Annahme einer Normalverteilung einem Variationskoeffizienten von 6% entspricht);
- Festigkeitsklasse GL 48c: $\rho_{\text{mean},10\%} = 640 \text{ kg/m}^3$ und $\rho_{k,10\%} = 590 \text{ kg/m}^3$ (was unter der Annahme einer Normalverteilung einem Variationskoeffizienten von 6% entspricht).

In den Versuchen, die in diesem Bericht vorgestellt werden, wurden an Prüfkörpern, welche aus Eschenlamellen mit der Holzfeuchte von 10% produziert wurden und bis zur Durchführung der Versuche luftdicht in Kunststoffolie eingepackt waren, die folgenden Rohdichten ermittelt:

- Festigkeitsklasse GL 40c (4-Punkt-Biegung): $\rho_{\text{mean},10\%} = 663 \text{ N/mm}^2$, Variationskoeffizient 3%;
- Festigkeitsklasse GL 48c (4-Punkt-Biegung, nur 3 Prüfkörper): $\rho_{\text{mean},10\%} = 670 \text{ N/mm}^2$, Variationskoeffizient 2%;
- Festigkeitsklasse GL 48c (3-Punkt-Biegung): $\rho_{\text{mean},10\%} = 640 \text{ N/mm}^2$, Variationskoeffizient 3%.

Bezüglich der Rohdichte kann das geprüfte Material, basierend auf den ρ_{mean} und ρ_k -Werten im Lignatec 33/2021, in den 75-80%-Fraktile-Bereich der erwarteten Normalverteilung, eingestuft werden. Es handelte sich also um Material mit geringfügig höherer Rohdichte.

3.2 Schubmodul von Eschen-BSH

Im Lignatec 33/2021 [6] wird der Mittelwert des Schubmoduls für Eschen-BSH sämtlicher Festigkeitsklassen (ES-GL 40c bzw. GL 40h und ES-GL 48c bzw. GL 48h) mit einem Wert von $G_{\text{mean}} = 1000 \text{ N/mm}^2$ angegeben. In den Versuchen, die in diesem Bericht vorgestellt werden, wurden die folgenden Schubmoduln ermittelt:

- 3-Punkt-Biegung: $G_{\text{mean}} = 1162 \text{ N/mm}^2$, Variationskoeffizient 6%;
- 4-Punkt-Biegung: $G_{\text{mean}} = 1120 \text{ N/mm}^2$, der Variationskoeffizient 6%.

3.3 Schubfestigkeiten von Eschen-BSH

Im Lignatec 33/2021 [6] wird der Bemessungswert der Schubfestigkeit für Eschen-BSH sämtlicher Festigkeitsklassen (ES-GL 40c bzw. GL 40h und ES-GL 48c bzw. GL 48h) mit einem Bemessungswert von $f_{v,d} = 3.2 \text{ N/mm}^2$ angegeben. In den Versuchen, die in diesem Bericht vorgestellt werden, wurden die folgenden Mittelwerte der Schubfestigkeiten ermittelt:

- 3-Punkt-Biegung: $f_{v,\text{mean}} = 10.2 \text{ N/mm}^2$, Variationskoeffizient 14%;
- 4-Punkt-Biegung: $f_{v,\text{mean}} = 12.2 \text{ N/mm}^2$, Variationskoeffizient 15%.

Um aus den Versuchen einen Bemessungswert ableiten zu können, muss der charakteristische Wert (5%-Fraktilwert) aus den Versuchen bestimmt werden. Dies kann lediglich für die 4-Punkt-Biegeversuche mit ausreichender Verlässlichkeit gemacht werden, denn nur dort liegen Versuchsergebnisse in genügender Anzahl vor. Die Auswertung mit einer Log-Normal-Verteilung liefert einen charakteristischen Wert (5%-Fraktilwert) von $f_{v,0.05} = 9.5 \text{ N/mm}^2$ (Abb. 12).

Wenn man einen Verhältniswert von γ_M/η_M von 1.5 für Brettschichtholz gemäss der Norm SIA 265 [5] einsetzt, erhält man einen Bemessungswert der Schubfestigkeit von $f_{v,d} = 6.3 \text{ N/mm}^2$. Die Angaben im Lignatec 33/2021 sind also auf der sicheren Seite festgelegt worden. Wenn man die gleiche Rechnung ausgehend von den (tieferen) Schubfestigkeiten macht, wie sie in den 3-Punkt-Biegeversuchen gemacht wurden, und ebenfalls eine Log-Normalverteilung zur Grunde legt, so erhält man einen charakteristischen Wert (5%-Fraktilwert von $f_{v,0.05} = 8.0 \text{ N/mm}^2$) und einen Bemessungswert von $f_{v,d} = 5.3 \text{ N/mm}^2$.

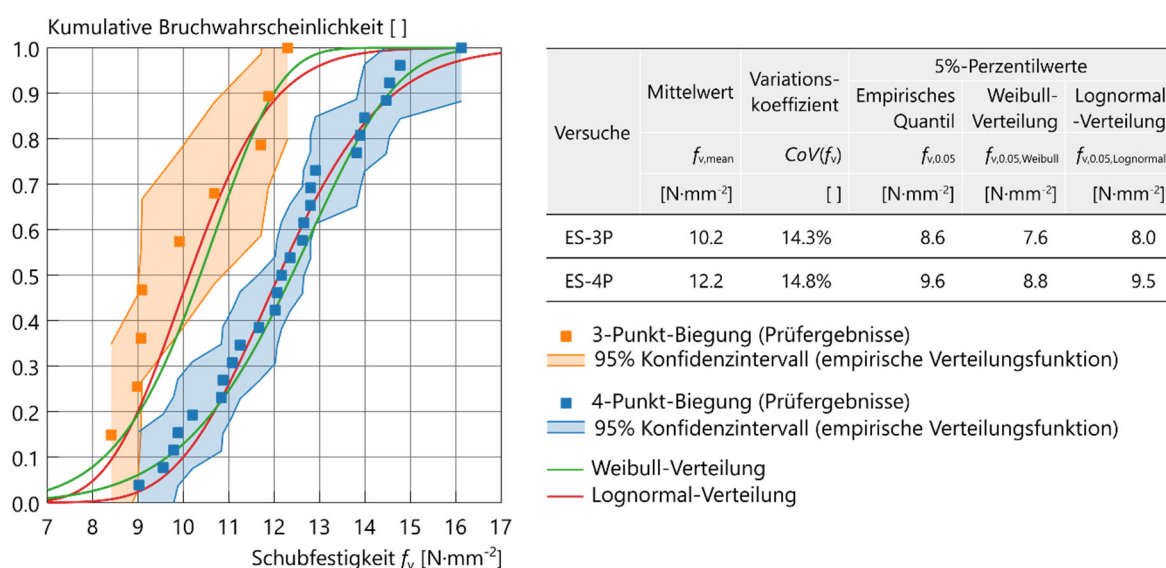


Abb. 12. Kumulative Bruchwahrscheinlichkeit bei den 3- und 4-Punkt-Biegeversuchen. Weibull- und Log-Normal-Verteilungen basierend auf einer Maximum-Likelihood-Schätzung..

3.4 Einfluss der Bauteilgrösse auf die Schubfestigkeit von Eschen-BSH

Für Bauteile aus verlebten Laubholzprodukten, deren Abmessungen von den Referenzabmessungen abweichen (d. h. $h \neq 600$ mm), sind im Lignatec 33/2021 [6] die folgenden Korrekturfaktoren zur Ermittlung der Schubfestigkeit in Funktion der Trägerhöhe angegeben, welche u.a. auch für Eschen-BSH gültig sind:

$$f_{v,d} = 3.2 \cdot \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0.25}; 1.20 \right\}.$$

Bei den in diesem Bericht vorgestellten Versuchen wurden die folgenden Zusammenhänge für die Schubfestigkeit von Eschen-BSH ermittelt:

- 3-Punkt-Biegung: $f_{v,\text{mean}} = 10.2 \cdot \left(\frac{600}{h} \right)^{0.19}$
- 4-Punkt-Biegung: $f_{v,\text{mean}} = 12.2 \cdot \left(\frac{600}{h} \right)^{0.37}$.

Die für Eschen-BSH aus den Versuchen im vorliegenden Forschungsprojekt abgeleiteten Exponenten (0.19 und 0.37) liegen im Bereich des im Lignatec 33/2021 [6] angegebenen Werts (0.25). Der Exponent gibt an, wie stark der Grösseneinfluss ist. Werte, die näher bei 0.0 liegen, bedeuten einen geringen Grösseneinfluss, während Werte, die näher bei 1.0 liegen, einen starken Grösseneinfluss darstellen.

4 Eignung der eingesetzten Prüfkfigurationen

4.1 Verstärkung der Lasteinleitungszonen

Entscheidend für alle Schubprüfungen an BSH-Trägern ist es, eine möglichst dem Schubfluss entsprechende Krafteinleitung zu gewährleisten. Dies ist mittels einer Krafteinleitung ausschliesslich über Querdruck im Holz nicht oder nur für kleine Trägerhöhen (und Fichtenholz) möglich. Die Einleitung der zur Erzeugung von Schubbrüchen in Laubholz-BSH nötigen hohen Kräfte ist, bedingt durch die höhere Schubfestigkeit von Laubholz-BSH, praktisch nur mit eingeklebten Gewindestangen durchführbar. Für die Auslegung der Krafteinleitung gemäss Anforderungen der 3-Punkt-Biegeprüfung liegt für die Nadelholz-BSH ein bewährtes Konzept vor. Für die zur Prüfung von Laubholz-BSH erforderlichen höheren Werte gelangt man in einen Grenzbereich. In den im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts durchgeführten Versuchen konnte gezeigt werden, dass es durch Verstärkung der Krafteinleitungszonen im Bereich der Lasteinleitungen und der Auflager mittels eingeklebten Gewindestangen System GSA® fallweise ergänzt durch in vorgebohrte Löcher eingedrehte Vollgewindeschrauben möglich ist, die notwendigen hohen Kräfte in die Prüfkörper einzuleiten. Details zu den eingesetzten Verstärkungs-konfigurationen sind in den Teilen 3, 4 und 5 angegeben.

4.2 Prüfkörperabmessungen

4.2.1 Querschnittsabmessung

Die mechanischen Eigenschaften und Bemessungswerte bezüglich Biegung werden in den aktuellen Baunormen (z. B. EN 14080:2013 und Norm SIA 265:2021) für eine Referenz-Trägerhöhe von 600 mm angegebenen. Es war und ist daher naheliegend, dass 3-Punkt- und 4-Punkt-Biegeversuche zur Ermittlung der Schubfestigkeit von BSH ebenfalls an Prüfkörpern mit einer Trägerhöhe von 600 mm durchgeführt werden. Wenn man sodann einen möglichen Einfluss der Bauteilgrösse auf die Schubfestigkeit aus den Versuchen ableiten möchte, ist die Prüfung

von Trägern mit mindestens 2 weitem, von 600 mm abweichenden, Trägerhöhen erforderlich. Im vorliegenden Projekt wurde dieser Plan mit Trägerhöhen von 480 mm und 800 mm erfolgreich umgesetzt. Die Prüfkörperbreite wurde entsprechend den üblicherweise in der Produktion vorherrschenden Abmessungen mit 160 mm (Fichten-BSH) und 120 mm (Eschen-BSH) festgelegt. Die Breite der Eschen-BSH-Prüfkörper wurde bewusst nicht grösser gewählt, damit die in die Prüfkörper einzuleitenden ohnehin schon grossen Kräfte nicht noch grösser geworden wären. Aus den Versuchen kann das Fazit gezogen werden, dass Schubversuche mit Querschnittsabmessungen von bis $160 \times 800 \text{ mm}^2$ bei Fichten-BSH und $120 \times 800 \text{ mm}^2$ bei Eschen-BSH möglich sind und die zur Erzeugung von Schubbrüchen nötigen Kräfte in die Prüfkörper eingeleitet werden können (siehe dazu auch Ziffer 4.1).

4.2.2 Verhältnis der Schubfeldlänge zur Trägerhöhe, bzw. notwendige Prüfkörperlänge

Wie oben dargestellt, haben die Abmessungen der Prüfkörper und die Prüfkongfiguration einen entscheidenden Einfluss auf die Schubfestigkeit. Angaben zu Schubfestigkeiten sind somit stets als Systemwerte zu betrachten. Eine genormte Prüfkongfiguration und Prüfkörpergrösse liegen derzeit noch nicht vor, obwohl entsprechende Vorschläge bereits 2010 an der *World Conference on Timber Engineering* präsentiert wurden [3]. Um den Einfluss des α -Wertes zu untersuchen, bzw. den optimalen α -Wert zu ermitteln wurden im vorliegenden Forschungsprojekt die folgenden α -Werte untersucht:

- $\alpha = 1.11, 1.30, 1.56$, und 1.95 (Vorversuche 3-Punkt-Biegung Fichten-BSH)
- $\alpha = 1.2, 1.6, 2.0$ und 2.5 (Hauptserie 3-Punkt-Biegung Fichten-BSH, 12 Versuche)
- $\alpha = 1.6$ (3-Punkt-Biegung Eschen-BSH, 9 Versuche)
- $\alpha = 1.2, 1.6, 2.0$ und 2.5 (4-Punkt-Biegung Eschen-BSH, 26 Versuche).

Wie durch die Versuche erneut bestätigt wird, ist zur Ermittlung der Schubfestigkeit eine genormte Basis-Prüfkongfiguration in Form eines 3-Punkt-Biegeversuchs mit einem Verhältnis zwischen Schubfeldlänge L_v und Trägerhöhe h von $\alpha = 1.6 - 1.8$ zu empfehlen, um Biegebrüche zu vermeiden.

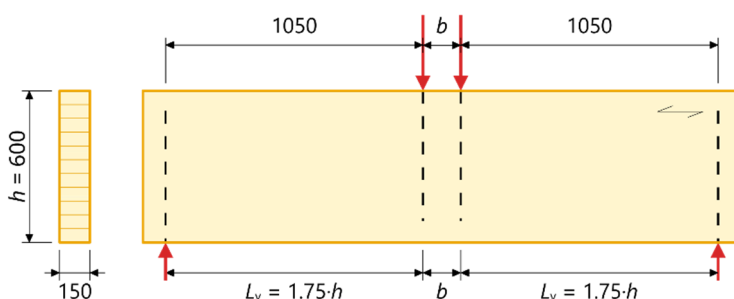


Abb. 13. In Literatur [3] empfohlene Referenz-Prüfkongfiguration zur Ermittlung der Schubfestigkeit von Brett-schichtholz mittels 3-Punkt-Biegeversuchen.

Bei den 4-Punkt-Biegeprüfungen ist ein Einfluss der Schubfeldlänge in Bezug auf die Trägerhöhe (d.h. ein Einfluss des α -Werts) auf die Messungen der Längenänderungen in den Messquadrat-Diagonalen feststellbar (Abb. 14), welche man benötigt, um den Schubmodul zu ermitteln. Diese Steifigkeiten gleichen sich für $\alpha \approx 2.3$ aus. Wenn man diesbezüglich die 3-Punkt- und die 4-Punkt-Biegeprüfkongfiguration vergleicht, so ergeben sich für den gleichen α -Wert ($\alpha = 1.6$) sehr ähnliche Steifigkeiten in den Zug- und Druckdiagonalen (Abb. 15). Ein Wert von $\alpha = 1.6$ als Grundwert für die Referenz-Prüfkongfiguration ist also auch aus Sicht Verformungsmessung zur Bestimmung des Schubmoduls ein grundsätzlich zu empfehlender Wert.

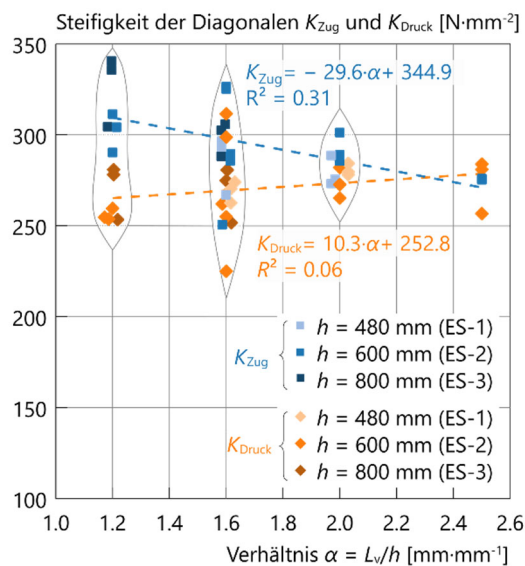


Abb. 14. Steifigkeit der Druck- und Zugdiagonalen in den Messkreuzen, bei den 4-Punkt-Biegeprüfungen. Die Markierungen innerhalb der gleichen "Blase" haben den gleichen α -Wert; diese Markierungen wurden zu Visualisierungszwecken horizontal getrennt.

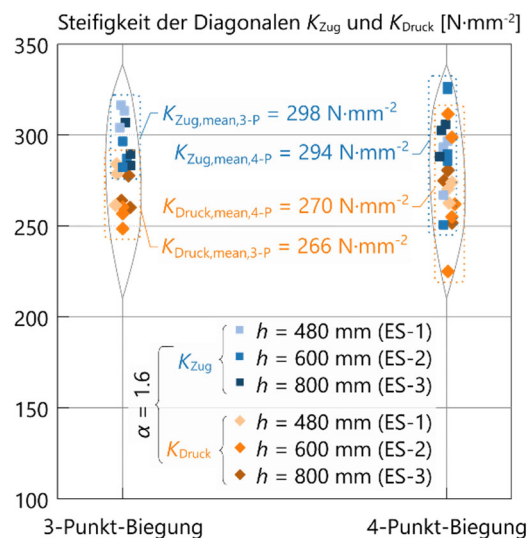


Abb. 15. Steifigkeit der Druck- und Zugdiagonalen in den Messkreuzen, in den 3-Punkt- und 4-Punkt-Biegeprüfungen, für $\alpha = 1.6$.

4.3 3-Punkt-Biegeversuche versus 4-Punkt-Biegeversuche

4.3.1 Grundsätzlicher Vergleich der beiden Prüfkfigurationen

Für die Baupraxis steht in der Regel der Nachweis, dass die festgelegten Produktewerte erfüllt werden, bzw. dass die Prüfwerte über diese Anforderungen liegen, im Vordergrund. Hierfür genügt die einfachere 3-Punkt-Biegeprüfkfiguration. Ein vertiefter Einblick in das Schubverhalten lässt sich allerdings mit dieser Prüfkfiguration nicht gewinnen. Hierfür bietet sich die durch Ehrhart im Rahmen eines Grossprojekts zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von Buchen-BSH erfolgreich eingesetzte sogenannte "Alternative 4-Punkt-Biegeprüfkfiguration" an [7], welche erstmals durch Basler für Versuche an Stahlträgern eingesetzt wurde [8]. Diese ist zwar aufwendiger, ermöglicht es aber, bei gleich grossen erforderlichen Kräften höhere Schubspannungen zu erzeugen und längere Schubfelder zu prüfen. Im Vergleich zu 3-Punkt-Biegeversuchen erlaubt diese Art des Versuchs eine Verdopplung der Feldlänge bei identem Biegemoment und identer Querkraft. Der Einfluss der Querdruckspannungen auf die Schubspannung kann damit nahezu eliminiert werden. Während für die Baupraxis die Kontrolle bzw. der Nachweis einer festgelegten bzw. deklarierten Baustoffeigenschaft im Vordergrund steht und damit de facto ein Systemwert verknüpft mit einem geregelten Vorgehen (Prüfung, Abmessungen, Auswertung) gemeint ist, möchte man in der Forschung das Schubverhalten von BSH-Trägern möglichst ganzheitlich erfassen. Dabei zeigt sich, dass dies mittels der 3-Punkt-Biegeprüfkfiguration nicht möglich ist.

4.3.2 Vor und während der Prüfung wirkende Kräfte

Der entwickelte 4-Punkt-Biegeprüfaufbau basiert auf der Einleitung einer Einzellast (aufgebracht durch zwei Zylinder) via einen Lastverteilträger aus Stahl in den Prüfkörper (Abb. 16).

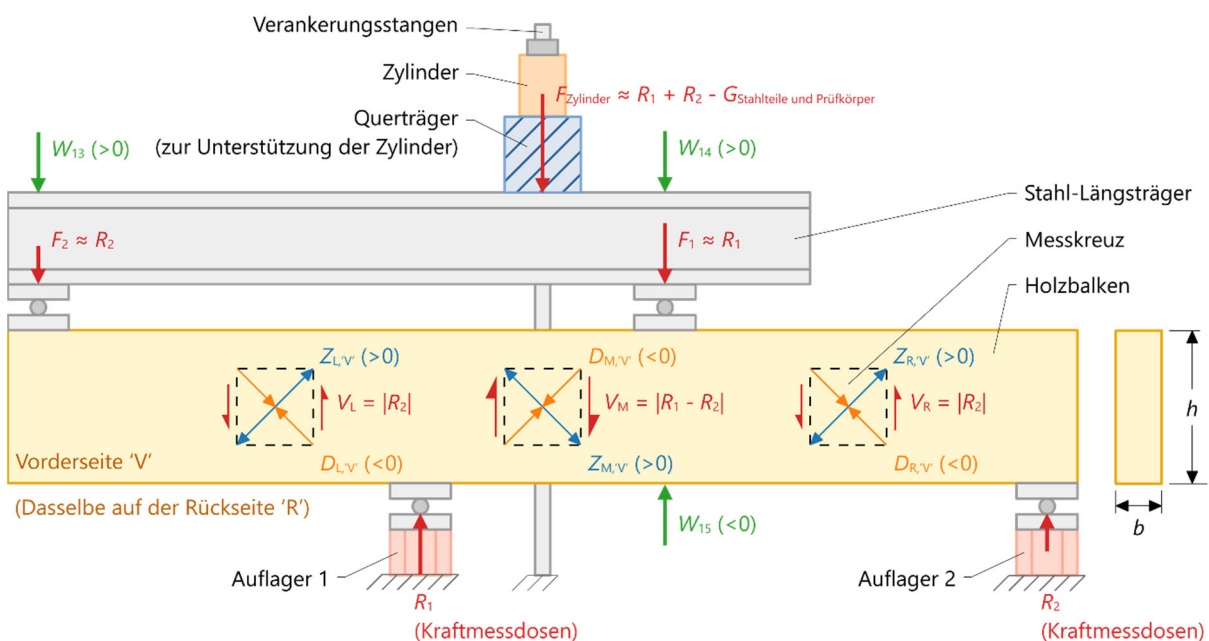
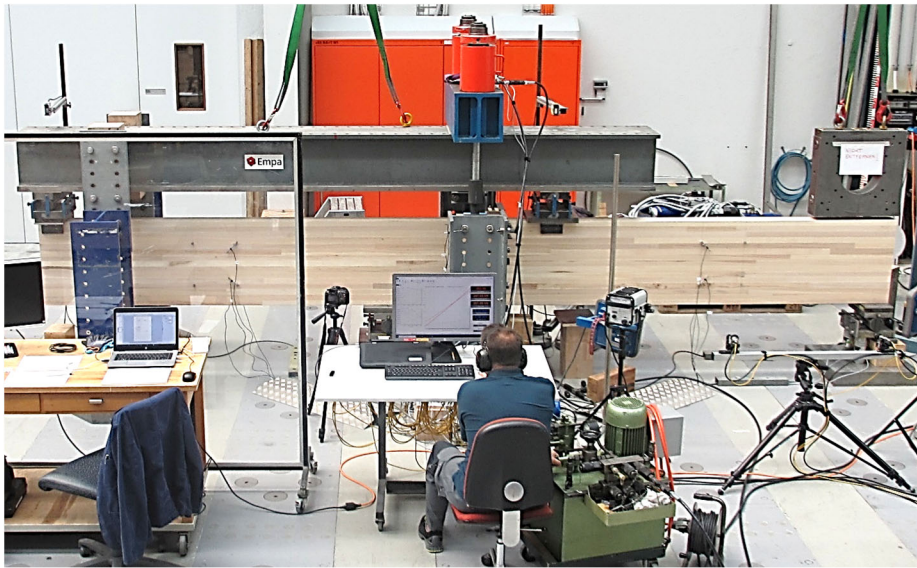


Abb. 16. Versuchsaufbau an der Empa für die 4-Punkt-Biegeversuche an Eschen-BSH. Externe Kräfte sind mit "F" oder "R" dargestellt, Schub-Schnittkräfte mit "V", vertikale Verschiebungen mit "W" und Verschiebungen in den Schubfelddiagonalen mit "Z" oder "D" (Zug oder Druck).

Der Stahlträger ist im Vergleich zu den geprüften Holzbalken sehr schwer (1190 kg gegenüber 222-413 kg). Der Prüfkörper musste daher in einzelnen Fällen je nach Prüfkörpermasse und Spannweiten-Verhältnissen während der Versuchsvorbereitung und bis zum Aufbringen einer Kraft in den beiden Zylindern unterstützt bzw. in seiner Lage gesichert werden. Andernfalls hätte der Prüfkörper vom Auflager rechts abgehoben. Dies stellt einen Nachteil dar. Um eine Abstützung der Prüfkörper vor Versuchsbeginn zu vermeiden, müssten die Prüfkörper bei Eschen-BSH α -Werte von 1.8 (bei Trägerhöhen bis 600 mm) bzw. 1.4, (bei einer Trägerhöhe von 800 mm) aufweisen. Insbesondere das für solche Versuche interessante und im Vordergrund stehende Verhältnis von $\alpha = 1.6$ zwischen Schubfeldlänge und Trägerhöhe liegt also bei der in diesem Projekt eingesetzten Prüfkfiguration genau im kritischen Bereich.

Der Lastverteilkörper muss zudem sehr steif ausgebildet sein und die ausreichende Stabilität der Flansche und Stege gegen Beulen muss sichergestellt sein, so dass während der Versuche keine Schäden am Stahlträger auftreten. Im vorliegenden Projekt wurde für die Versuche an den 480 mm und den 600 mm hohen Prüfkörpern vorerst lediglich ein Stahlträger eingesetzt. Für die Versuche an den 800 mm hohen Prüfkörpern wurden 2 identische, übereinanderliegende mit HV-Schrauben vorgespannt verschraubte Stahlträger eingesetzt.

Eine alternative Möglichkeit, welche durch die n'H angewendet wurde, besteht darin, die Kräfte als ein Zug-/Druckpaar direkt an den Trägerenden einzuleiten (Abb. 17). Das innere Kräftepaar weist, aus Gleichgewichtsgründen, die (L/L_v) -fachen Kräfte auf. Die äusserlich aufzubringende Kraft ist damit ein Mehrfaches geringer als beim Prüfkonzept der Empa. Eine Einschränkung ergibt sich allerdings durch den Biegetragwiderstand des Prüfbalkens (blauer Träger in der Abb. 17). Zudem muss (z.B. mittels Kraftmessdosen und einem Regelungssystem) sichergestellt sein, dass die Kräfte in den beiden Zylindern während des gesamten Versuchs stets exakt gleich gross sind (sonst sind die Biegemomente im Schubfeld nicht symmetrisch.).

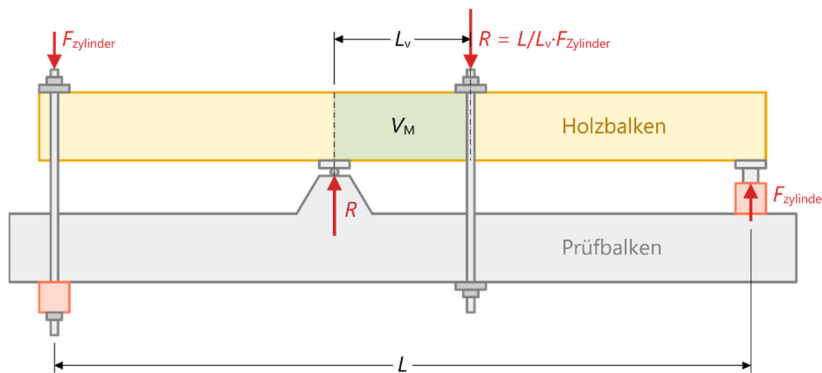


Abb. 17. Prinzipskizze des Versuchsaufbaus der n'H für die Durchführung von 4-Punkt-Biegeversuchen. Die externen Kräfte F_{Zyl} werden an den Trägerenden eingeleitet.

4.3.3 Messung der Verformungen in den Schubfeldern mittels Bildkorrelation

Die visuelle Zugänglichkeit zu den Schubfeldern ist eine zentrale Voraussetzung, wenn man die Methode der digitalen Bildkorrelationsanalysen (DIC) für die Messung der Dehnungen, Stauchungen und Verzerrungen in den Schubfeldern einsetzen will. Beim im vorliegenden Projekt eingesetzten Versuchsaufbau für die 4-Punkt-Biegeprüfungen (Abb. 16) war das mittlere Schubfeld visuell nicht zugänglich. Dies ist ein Schwachpunkt des verwendeten Prüfaufbaus. Da die Spannungen in den äusseren Schubfeldern viel geringer sind als im mittleren Feld, wäre insbesondere das innere Schubfeld interessant gewesen für DIC-Analysen.

4.3.4 Lage der in den Versuchen aufgetretenen Schubbrüche

Die Schubbrüche bei den 3-Punkt-Biegeprüfungen lagen meist in der oberen Hälfte des Trägers (Abb. 18a), was bei den 4-Punkt-Biegeprüfungen nicht der Fall war (Abb. 18b₁). Die Versuche zeigen zudem, dass die Lage des Schubbruchs nicht vom α -Wert abhängig ist (Abb. 18b₂).

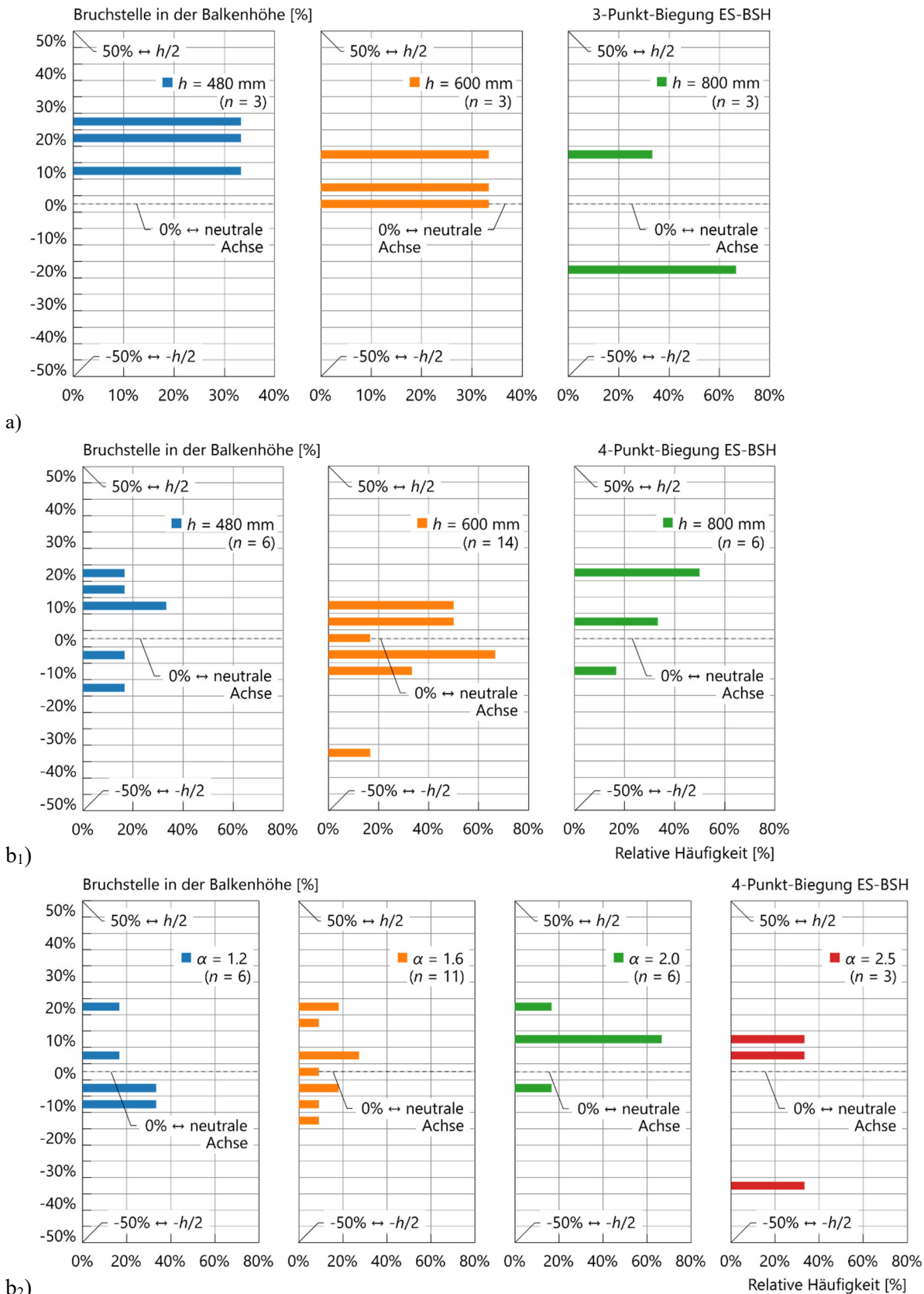


Abb. 18. Lage der Schubbrüche bezogen auf die Trägerhöhe: a) 3-Punkt-Prüfungen; b₁) 4-Punkt-Prüfungen, für verschiedene Trägerhöhen h ; b₂) 4-Punkt-Prüfungen für verschiedene Verhältnisse $\alpha = L_v/h$.

4.3.5 Empfehlungen für die werkseigene Produktionskontrolle

Um die Abläufe in den Produktionsbetrieben im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle möglichst einfach und dennoch aussagekräftig zu halten, wird eine 3-Punkt-Biegeprüfkongfiguration für die Qualitätssicherung vorgeschlagen, mit der Zielsetzung den festgelegten Zielwert (in der Regel den charakteristischen Wert = Bezugswert für die Dimensionierung) nachzuweisen. In der Prüfung soll letztlich der Prüfwert $\geq$ dem deklarierten charakteristischen Wert der Schubfestigkeit sein.

Damit genügen einfache Prüfeinrichtungen in den Produktionsbetrieben. Zudem sind auch andere Trägerabmessungen und Grössen – dem zu prüfenden Produkt angepasst – möglich.

5 Literatur

1. Keenan, F.J., *Shear strength of wood beams*. Forest Products Journal, 1974. **24**(9): p. 63-70.
2. Barrett, J.D. and R.O. Foschi, *Shear strength of uniformly loaded dimension lumber*. Canadian Journal of Civil Engineering, 1977. **4**: p. 86-95.
3. Gehri, E., *Shear problems in timber engineering - Analysis and solutions*, in *11th World Conference on Timber Engineering WCTE 2010*. 2010: Riva del Garda, Italy. p. Paper No. 614.
4. Ehrhart, T., R. Steiger, and A. Frangi, *European beech glued laminated timber*. Bautechnik, 2021. **98**: p. 104-114.
5. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA, *Norm SIA 265: Holzbau*. 2021: SIA, Zürich, Schweiz. 115.
6. Lignum, H.S., *Lignatec Nr. 33: Verlebte Laubholzprodukte für den statischen Einsatz*. Vol. 33. 2021, Zürich.
7. Ehrhart, T., et al. *CIB-W18/INTER/51-12-4: Mechanical properties of European beech glued laminated timber*. in *Meeting Five*. 2018. Tallinn, Estonia.
8. Basler, K., B. Yen, and J. Mueller, *Web buckling tests on welded plate girders*. Welding Research Council Bulletin Series, No. 64., 1960. **64**.