

Stabdübelverbindungen und eingeklebte Gewindestangen in Buchen-BSH

Prof. Dr. Steffen Franke
Berner Fachhochschule
Institut für Holzbau, Tragwerke
und Architektur
Biel/Bienne, Schweiz



Dr. Bettina Franke
Berner Fachhochschule
Institut für Holzbau, Tragwerke
und Architektur
Biel/Bienne, Schweiz



Prof. Andreas Müller
Berner Fachhochschule
Institut für Holzbau, Tragwerke
und Architektur
Biel/Bienne, Schweiz



Sebastian Heubuch
Berner Fachhochschule
Institut für Holzbau, Tragwerke
und Architektur
Biel/Bienne, Schweiz



Stabdübelverbindungen und eingeklebte Gewindestangen in Buchen-BSH

1. Einführung – Hintergründe und Motivation

Laubholz ist evolutionsbedingt neuer als Nadelholz, und diese Chronologie lässt sich auch auf die Anwendung und Bekanntheit im Ingenieurholzbau übertragen. Die Entwicklungen und Anwendungen von Produkten aus Nadelholz wie auch das Fügen von Bauteilen mittels Verbindungen ist langjährig erforscht, anerkannt und angewandt. Hingegen spielen Laubhölzer im aktuellen Ingenieurholzbau mit ihren besseren mechanischen Eigenschaften eher noch eine untergeordnete Rolle. Für den weiten Einsatz von Laubholzprodukten, wie Brett-schichtholz (BSH) aus Buche, müssen für die Bemessung alle relevanten Eigenschaften, wie Festigkeiten und Steifigkeiten der Produkte sowie auch der Verbindungen bekannt sein. Für Kontaktanschlüsse und Anschlüsse mit mechanischen Verbindungen beruhen die in nationalen und internationalen Standards vorhandenen normativen Regelungen vorrangig auf experimentellen Untersuchungen an Nadelholz und sind bis dato noch nicht umfassend und vollständig für Laubholz geprüft worden. Gerade für hochbeanspruchte und hochleistungsfähige Verbindungen ist es wichtig, abgesicherte und zuverlässige Regeln und Konzepte für die Bemessung für die Architekten, Planer und Ingenieure zu Verfügung zu stellen.

Verbindungen mit Stabdübeln in Kombination mit Holz, Holzprodukten und Stahlblechen gehören zu den klassischen Verbindungen im Ingenieurholzbau zur Ausbildung von Zugstabsanschlüssen, Rahmenecken, Fachwerkknoten oder Haupt- und Nebenträgeranschlüssen. Die Verbindung beruht auf dem Übertrag von Zug-, Druck- oder Querkräften durch Belastung der Verbindungsmittel auf Abscheren und des Holzes auf Lochleibung. In der SIA 265:2012 und im Eurocode 5 (SN EN 1995-1-1:2004 inkl. A1:2008 und A2:2014) wird die Stabdübel-/Passbolzenverbindung mit Hilfe der Johansen Theorie (Johansen, 1949) bemessen. Die notwendigen Parameter sind jedoch für die Anwendung in Buche zu prüfen.

Als sehr effiziente Verbindung hat sich die Anwendung von eingeklebten Gewindestangen gezeigt, da hier eine besonders hohe Steifigkeit und Ausnutzung des Holzquerschnittes vorhanden ist. Weder in der SIA 265:2012 noch im Eurocode 5 (SN EN 1995-1-1:2004 inkl. A1:2008 und A2:2014) sind Angaben zur Berechnung von auf Zug beanspruchten eingeklebten profilierten Stäben vorhanden. Die Tragfähigkeit der Verbindung in Bezug auf ihren Auszugwiderstand muss durch Versuche ermittelt werden. International werden verschiedene Bemessungsansätze diskutiert, vgl. Steiger (2012), Steiger et al. (2015) wo relevante Bemessungsansätze für Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen vorgestellt werden. Aktuell werden diese in der Überarbeitung des Eurocode 5 jedoch ergänzt. Besonders für die Anwendung in Buche ergibt sich der Bedarf zur Erarbeitung relevanter Bemessungsgrundlagen.

2. Material und Versuchsprogramm

2.1. Material

Für alle Untersuchungen wurden die Prüfkörper aus Buchenvollholz, Buchenbrettschichtholz oder Buchenstabschichtholz mit einer mittleren Rohdichte von 727 kg/m^3 hergestellt. Vor der Prüfung erfolgte die Lagerung im Normalklima $20 \text{ °C} / 65 \%$ wobei sich eine mittlere Ausgleichsfeuchte von $u = 10 \%$ einstellte. Für spezielle Untersuchungen des Feuchteinflusses erfolgte eine jeweilig weitere Konditionierung bis Prüfung der Verbindung.

Im Versuchsprogramm wurden verzinkte Stabdübel der Festigkeitsklasse S235JR verwendet. Die Festigkeit der Stabdübel wurde in Zugversuchen nach SN EN ISO 6892-1:2010 geprüft und ergab einen Mittelwert von $f_{u,k} = 618 \text{ N/mm}^2$.

Im Versuchsprogramm wurden verzinkte Gewindestangen der Festigkeitsklasse 8.8 sowie blanke Gewindestangen der Festigkeitsklasse 10.9 verwendet. Die Festigkeit der Gewindestangen wurde in Zugversuchen nach SN EN ISO 6892-1:2010 geprüft. Die Bestimmung

des charakteristischen Wertes erfolgte nach EN 14358:2016. Die Mindestzugfestigkeit von 800 N/mm^2 für 8.8 Gewindestangen wurde für M12 mit 801 N/mm^2 bestätigt, für M16 mit 891 N/mm^2 und M20 mit 863 N/mm^2 deutlich erhöht überprüft.

Zum Einkleben der Gewindestangen wurden zwei Zweikomponenten Polyurethanklebstoffe (2K-PUR) der Firma Henkel & Cie. AG eingesetzt. Im Vorversuchsprogramm wurde der 2K-PUR Loctite® CR421, im Hauptversuchsprogramm auch zusätzlich der 2K-PUR Loctite® CR821 als Neuentwicklung und zukünftigen Ersatz zum CR421 verwendet.

2.2. Versuchsprogramm

Stabdübelverbindungen

Das Prüfprogramm unterteilt sich in Prüfungen zur Festlegung der Vorbohrdurchmesser für ein optimales Einbringverhalten und zur Bewertung der Bemessungsregeln zur Bestimmung der Tragfähigkeit. Das Prüfprogramm umfasste Verbindungen parallel und senkrecht zur Faser. Die experimentellen Untersuchungen erfolgten nach SN EN 26891:1991. Die Deklaration der Variablen sowie die Kräfteinleitungen sind prinzipiell in Abbildung 1 (links) und im Experiment in Abbildung 1 (rechts) dargestellt.

Folgende Parameter für die Bewertung des Tragverhaltens durchgeführt. Das Prüfprogramm gliedert sich in kleinformatige Prüfserien mit vorrangig 2-reihigen Anschlüssen (bis ca. 400 kN) und Prüfserien mit praxisrelevanten Querschnittsgrößen und Beanspruchungen (bis ca. 1500 kN) mit folgenden Variationen:

- Mindestrand- und Verbindungsmittelabstände a_1, a_2, a_3
- Seitenholzdicke $t_1 = 20$ bis 50 mm
- Mittelholzdicke $t_2 = 30$ bis 70 mm
- Verbindungsmitteldurchmesser $d = 8, 12, 14, 20 \text{ mm}$
- Anzahl der Verbindungsmittel pro Reihe $n = 1, 2, 3, 5, 7$
- Anzahl der Verbindungsmittelreihen $m = 1, 2, 3, 4, 6$
- Anzahl der Schlitzbleche innenliegend 1, 2, 3

Für Anschlüsse senkrecht zur Faser wurden vorrangig die Abstände untereinander in Faserrichtung a_1 wie auch senkrecht zur Faser a_2 und die Seitenholzdicken an Verbindungen mit einem innenliegenden Stahlblech mit $m \times n = 3 \times 2$ Stabdübeln mit Durchmesser von $d = 8 \text{ mm}$ betrachtet. Es wurden jeweils 5 Prüfkörper zu den Abstufungen $a_1 = 3d, 5d, 7d$ und $9d$ durchgeführt. Zur Prüfung des Tragverhaltens sind grossformatige Prüfungen mit ein oder zwei innenliegenden Schlitzblechen und einer Variation der Anordnung und Anzahl der Stabdübel durchgeführt worden, vgl. Franke et al. (2019).

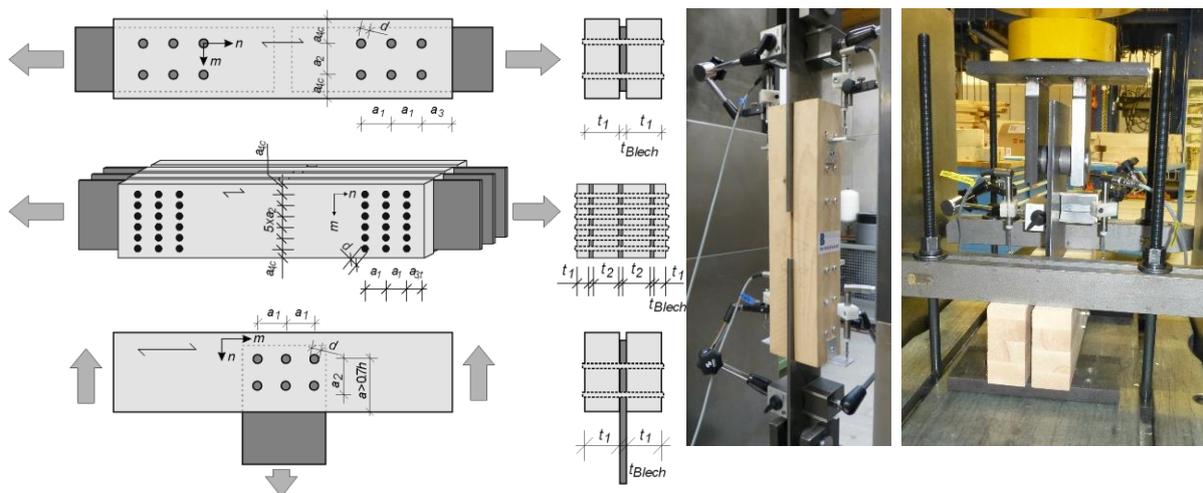


Abbildung 1: Prinzipskizze zu den Prüfkörpern parallel und senkrecht belastet (links) und Versuchsaufbau für kleinformatige Prüfungen (rechts)

Eingeklebte Gewindestangen

Das Versuchsprogramm gliedert sich in Einbringversuchsserien, kleinformatigen Vorversuchsserien und Hauptversuchsserien mit praxisrelevanten Verbindungen in Geometrie und Tragwirkung. Die Deklaration der Parameter sowie der Krafteinleitung können, Abbildung 2 entnommen werden. Die Planung der Hauptversuchsserien basiert auf den Ergebnissen aus den Vorversuchsreihen. In den experimentellen Untersuchungen sind Anschlüsse mit einer Beanspruchung parallel zur Faser, senkrecht zur Faser und unter einer Neigung von 45° zur Faser unterschieden. Die Versuchsserien dienen der Bewertung folgender Parameter:

- Einbringvoraussetzungen sowie Eignung des Klebstoffes
- Einfluss des Gewindestangendurchmessers d
- Einfluss des Kraft-Faser-Winkels α
- Massgebende Einbindelänger der Gewindestange l_{ad}
- Minimale und optimale Abstände zwischen Verbindungsmitteln $a_{2,c}$
- Ausziehfestigkeit $f_{k,l}$
- Variation der Anzahl der Gewindestangen
- Prüfung der zurückversetzten Einbindelänge

Die Versuche wurden für parallel zur Faser eingeklebte Gewindestangen als symmetrischer Pull-Pull und für rechtwinklig zur Faser eingeklebte Gewindestangen als Push-Pull Versuch durchgeführt. Die Krafteinleitung in die Gewindestange der Einzelstangenversuche erfolgt über eine aufgeschraubte Kalotte in Verbindung mit einer speziellen Aufnahmevorrichtung zum Einhängen der Prüfkörper (siehe Abbildung 3). Für die Verbindungen mit mehreren Gewindestangen wurden gelenkig gelagerte Grundplatten und einzelne Muttern, die handfest angezogen wurden, verwendet. Die Belastung der Versuchskörper erfolgt nach SN EN 26891:1991. Die Verformungen der Verbindungen zwischen Stange und Holzoberfläche als Last-Lastpunkt-Verschiebungskurve wurden über vier am Prüfkörper applizierten induktiven Wegaufnehmern (LVDT) parallel zum Maschinenweg bis ca. 70 % der zu erwartenden Bruchlast erfasst.

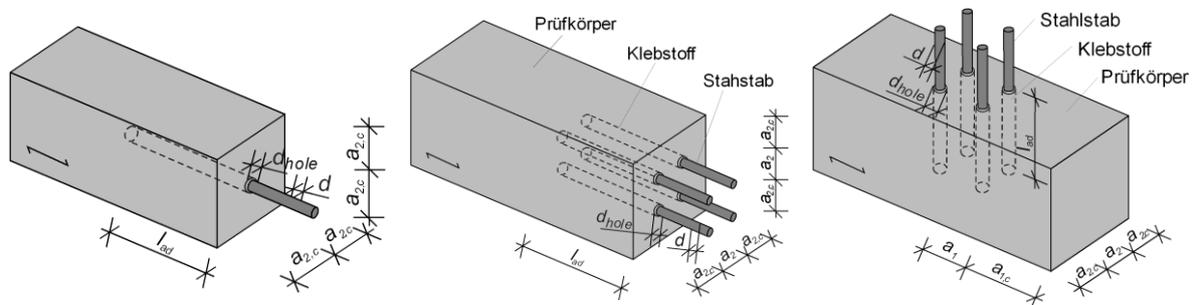


Abbildung 2: Skizzen der Prüfkonfigurationen: Einzelstange parallel zur Faser, Stangengruppe parallel zur Faser und Stangengruppe senkrecht zur Faser (v. l. n. r.)



Abbildung 3: Eingespannter Prüfkörper parallel zur Faser als Zug-Zug-Versuch

3. Trag- und Versagensverhalten

3.1. Auswertungsmethode und Vergleichsgrundlage

Die Auswertung aller Traglasten basiert auf SN EN 26891:1991, so dass die Traglast des Versuchs als maximale Bruchlast oder die Traglast bei einer Verschiebung von 15 mm in der Verbindung definiert ist. Darüber hinaus wurden alle Traglasten für 2 mm plastische und 5 mm totale Verformung ausgewertet und in der weiteren Projektbearbeitung analysiert.

Für den Vergleich auf Bruchniveau für die Verbindungen mit Stabdübeln sind die rechnerischen Traglasten auf das ursprüngliche Bemessungsmodell von Johansen (1949), detailliert in Blaß & Sandhaas (2016) beschrieben, zurückgeführt und ohne einen Einfluss von sicherheitsbasierten Beiwerten nach Gleichung (1) - (3) und ohne Berücksichtigung mehrerer in Kraftrichtung hintereinander angeordneter stiftförmiger Verbindungsmittel berechnet. Für die Lochleibungsfestigkeiten sowie den Einfluss der Holzdicken wurden die Angaben der SIA 265:2012 resp. Eurocode 5 verwendet. Für die Rohdichte wurden die am jeweiligen Prüfkörper bestimmte Rohdichte und für die Stahlzugfestigkeit die mittlere Festigkeit, $f_{u,mean} = 610 \text{ N/mm}^2$ verwendet. Ein reines Lochleibungsversagen war mit den verwendeten Holzdicken ausgeschlossen.

$$M_{y,R,mean} = 0.3 f_{u,mean} d^{2.6} \quad (1)$$

$$f_{h,0,mean} = 0.082(1 - 0.01d) \rho_{mean} \quad (2)$$

$$f_{h,90,mean} = \frac{f_{h,0,mean}}{0.9 + 0.015d}$$

$$R_{Verb,EC5} = (n_{ef}) \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,mean} t_1 d \\ f_{h,mean} t_1 d \left(\sqrt{2 + \frac{4M_{y,mean}}{f_{h,mean} d t_1^2}} - 1 \right) \\ 2.0 \sqrt{M_{y,mean} f_{h,mean} d} \end{array} \right. \quad (3)$$

Für die Bestimmung der Ausziehfestigkeiten der Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen wurden die jeweils am Versuchskörper bestimmten geometrischen Grössen und der nominale Gewindestangendurchmesser verwendet. Die Tragfähigkeit wurde daher durch die eingeklebte Mantelfläche der Gewindestange geteilt.

3.2. Einbringvoraussetzungen für Verbindungen mit Stabdübeln

Die Quantifizierung des Einbringverhaltens von Stabdübeln erfolgte an praxisnahen Einbringversuchen in ausführenden Unternehmen sowie labortechnisch an einteiligen (z. B. Seitenholz) und zweiseitigen Prüfkörpern (z. B. Anschluss mit innenliegendem Stahlblech). Die Prüfkörper wurden jeweils nach Normalklimalagerung mit sechs Bohrungen von $\varnothing = 8.0, 8.1, 12.0$ und 12.1 mm hergestellt und anschliessend direkt geprüft. Zusätzlich erfolgte eine Bewertung einer möglichen Feuchteänderung, wo Prüfkörper für eine Abtrocknung und eine Aufwechtlung im Anschluss an die Herstellung bis Prüfung bei $23^\circ\text{C} / 50\%$ und $20^\circ\text{C} / 70\%$ bis Massenkonstanz gelagert wurden.

Relativ unabhängig von der ausgesetzten Feuchteänderung ergaben sich für die mit Nenn-durchmesser vorgebohrte Löcher Einbringkräfte von ca. 3.0 kN gegenüber den mit + 0.1 mm grösser vorgebohrten Löchern mit maximal 0.1 kN, vgl. Franke et al. 2019. Für die Verbindungen mit Stabdübeln im Prüfprogramm wird der Vorbohrdurchmesser aufgrund der Einbringkräfte und der Bewertung auf $d+0.1\text{mm}$ festgelegt und für den Praxiseinsatz empfohlen. Die Differenz von 0.1 mm kann durch einen angepassten Bohrdurchmesser oder durch ein zusätzliches Ziehen der Stabdübel sichergestellt werden.

3.3. Tragverhalten von Verbindungen mit Stabdübeln

Allgemein

Das Trag- und Versagensverhalten der ausgeführten Verbindungen mit Stabdübeln in Buche wird durch ein duktiles Versagen, durch Überschreiten der Lochleibungsfestigkeit, plastischer Verformung der Verbindungsmittel oder Abscheren der Verbindungsmittel, oder einem spröden Versagen in Form vom Aufspalten des Holzes beschrieben. Die Versagensart ist hauptsächlich von der Geometrie und Schlankheit der Verbindung abhängig. Die ausgeführten Verbindungen zeigten vorrangig ein duktiles Versagen mit Ausbildung von zwei Fließgelenken pro Scherebene anhand derer die Auswirkungen von Abständen, Mindestholzdicken und effektiven Anzahl an Verbindungsmitteln bewertet werden konnte.

Mindestholzdicke

In ersten Versuchsreihen wurden die Mindestholzdicken für das Seitenholz und Mittelholz für Verbindungen mit Stabdübeln in Buchen - BSH parallel und senkrecht überprüft. Für die Anschlüsse können die prinzipiellen Verläufe der Tragfähigkeiten in Abhängigkeit der Holzdicke und somit der Versagensfälle der Fließgelenktheorie wiedergegeben werden, jedoch liegen die Ergebnisse auf einem höheren Niveau. Die Abhängigkeit der Mittelholzdicke für parallel beanspruchte Verbindungen wurde von Möller (2017) erarbeitet. Für die Untersuchung der Mittelholzdicke wurden die Versuche zur Reduzierung des Aufreissens vollflächig auf Druck gelagert durchgeführt und die Traglasten bei konstanter Verschiebungsgrenze von $u = 15$ mm ermittelt. Generell sind die erreichten Duktilitäten senkrecht zur Faser wesentlich grösser als bei parallel zur Faser beanspruchten Verbindungen.

Verbindungsmittel- und Randabstände

Der Einfluss der Verbindungsmittel- und Randabstände wurde parallel und senkrecht zur Faser an Verbindungen mit $m \times n = 3 \times 2$ Stabdübeln und einem eingeschlizten Stahlblech geprüft. In Abbildung 4 sind die mittleren Tragfähigkeiten in Abhängigkeit der jeweiligen Abstände angegeben. Für parallel zur Faser beanspruchte Verbindungen ist unter gleichem Abstand $a_2 = 3d$ stets eine geringe Steigerung der Tragfähigkeit mit Zunahme des Abstandes ersichtlich (Abbildung 4 oben links). Mit einem Abstand $a_1 = 9d$ wird die Duktilität von 3 überschritten, so dass diese Kombination als Mindestabstände deklariert werden kann. Für die Variation des Abstandes senkrecht zur Faser a_2 unter konstantem Abstand $a_1 = 7d$ ergeben sich ab $a_2 = 3d$ keine Traglaststeigerungen mehr, jedoch Duktilitätssteigerungen, die für $a_2 = 4d$, (Abbildung 4 oben rechts) die Duktilität von 3 auch überschreiten, so dass diese Kombination ebenfalls die Anforderungen erfüllt. Für den Randabstand $a_{3,t}$ ist sowohl für die Traglast als auch Duktilität keine deutliche Abhängigkeit ersichtlich.

In Verbindungen senkrecht zur Faser beansprucht zeigt der Abstand a_1 im Bereich von $3d$ bis $7d$ keinen Einfluss. Ab einem Abstand von $9d$ wird eine Laststeigerung erreicht. Für den Verbindungsmittelabstand a_2 ist bis zu einem Abstand von $4d$ eine Laststeigerung zu verzeichnen, darüber hinaus konnte keine Laststeigerung mehr beobachtet werden. Für beide Verbindungsmittelabstände hat sich in den grossformatigen Anschlüssen ein gleiches Verhalten eingestellt und die bisherigen Ergebnisse hierdurch bestätigt. Die Duktilität konnte in den grossformatigen Testserien gesteigert werden, da hier durch das grössere Volumen das Aufspalten noch geringer ausgeprägt war.

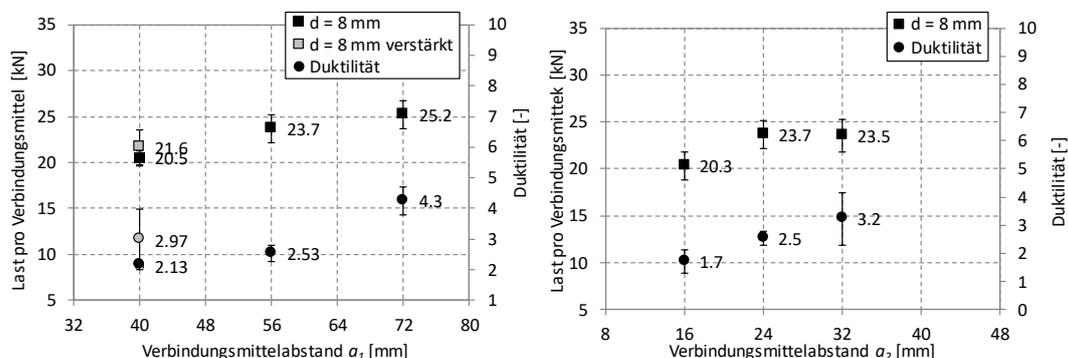


Abbildung 4: Mittlere experimentelle Tragfähigkeiten und Duktilitätsmasse (inkl. Standardabweichung) in Abhängigkeit der Verbindungsmittelabstände a_1 und a_2 für parallel zur Faser beanspruchte Verbindungen $m \times n = 2 \times 3$

3.4. Tragverhalten von eingeklebten Gewindestangen

In den experimentellen Untersuchungen traten die drei Arten des Versagens: Ausziehen der Gewindestangen durch Klebeverbund bzw. Schubversagen des Holzes, Aufspalten des Holzquerschnittes oder Stahlversagen der Gewindestange (für Einbindelängen $\geq 15d$) auf. Die Verbindungen mit Stangengruppen weisen für parallel zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen primär ein Ausziehen aufgrund des Schubversagen des Holzes und sekundär ein Aufspalten des Holzes auf. Für Serien mit senkrecht zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen konnte ein Ausziehen der Gewindestangen oder Querkzugversagen des Holzes am Ende der Gewindestange festgestellt werden.

Die Ausziehfestigkeiten für parallel zur Faserrichtung eingeklebt und beansprucht (Serie 03, 02neu und 16), liegen unabhängig vom Gewindestangendurchmesser auf gleichem Niveau, siehe Abbildung 5, wobei sich für 45° und 90° eingeklebte Gewindestangen höhere Werte als parallel ergeben. In den Untersuchungen der Ausziehversuche für parallel zur Faser eingeklebte Gewindestangen hatte sich für Randabstände $a_2 < 2.5d$ vermehrt ein Aufspalten gezeigt, siehe Abbildung 6. Durch ein Zurückversetzen der Einbindelänge (Vorholz) um $5d$ konnte das Aufspalten jedoch für Randabstände bis $1.75d$ effektiv unterbunden werden, wodurch wesentlich höhere Ausnutzungen erzielbar sind.

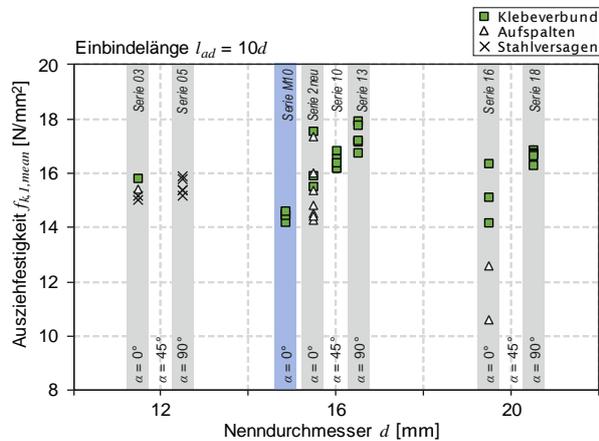


Abbildung 5: Ausziehfestigkeiten in Abhängigkeit des Stangendurchmessers d und des Kraft-Faser-Winkels α

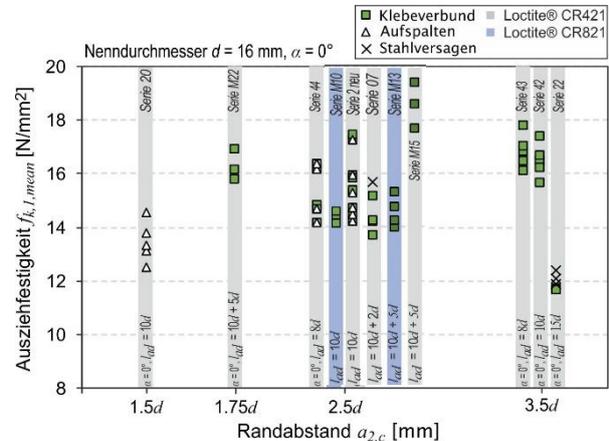


Abbildung 6: Ausziehfestigkeiten in Abhängigkeit der Einbindelänge l_{ad} und des Vorholzes

4. Konstruktive Ausführung und Bemessung von Verbindungen mit Stabdübeln

4.1. Konstruktive Regeln

Ableitend aus den dargelegten Ergebnissen werden im Hinblick auf Anschlüsse mit duktilen Tragverhalten $D \geq 3$, als Vorgabe im Forschungsprojekt, die Mindestrand- und Verbindungsmittelabstände abweichend von den in der SIA 265:2012 und Eurocode 5 vorläufig wie in Tabelle 1 gezeigt empfohlen. Mit Einhaltung der Mindestabstände und Mindestdicken wird die grösstmögliche Traglast erreicht und ein vorzeitiges Versagen durch Aufspalten o. ä. weitgehend verhindert. Die Traglast kann so auch ohne eine Abminderung der Anzahl hintereinander angeordneten Verbindungsmittel (k_{red} bzw. n_{ef}) berechnet werden.

4.2. Bemessung parallel zur Faser

Für die Lochleibungsfestigkeit in Anschlüssen mit Stabdübeln und Passbolzen in Laubholz sind bereits verschiedene Ansätze veröffentlicht, vgl. Gegenüberstellung in Abbildung 7. Die Ansätze sind verschieden auf dem Mittelwert- oder charakteristischen Niveau abgeleitet. Die Ansätze in der SIA 265:2012 und Eurocode 5 - SN EN 1995-1-1:2004 sind jeweils gleich. Es ist auffällig, dass im Mittelwertniveau, die Lochleibungsfestigkeit der Standards die untere Grenze beschreibt und auf charakteristischem Niveau eher im mittleren Bereich für Laubholz liegt, siehe Abbildung 7 (rechts).

Tabelle 1: Empfohlene Mindestabstände für Stabdübel und Passbolzen

		SIA 265:2012	Eurocode 5	Buche
a_1 parallel zur Faserrichtung		$7d$	$(3+2 \cos\alpha)d$	$9d$ ^{1,2)}
a_2 rechtwinklig zur Faserrichtung		$3d$	$3d$	$3d$ ¹⁾
$a_{3,t}$ beanspruchtes Hirnholzende $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$		$\max \left\{ \begin{matrix} 7d \\ 80 \text{ mm} \end{matrix} \right\}$	$\max \left\{ \begin{matrix} 7d \\ 80 \text{ mm} \end{matrix} \right\}$	$9d$ ^{1,2,3)}
$a_{3,c}$ unbeanspruchtes Hirnholzende $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ $150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$ $210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$		$5d$	$a_{3,t} \sin\alpha $ $\max \{3, 5d; 40 \text{ mm}\}$ $a_{3,t} \sin\alpha $	$5d$
$a_{4,t}$ beanspruchter Rand $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$		$4d$	$\max \{ (2+2\sin\alpha)d; 3d \}$	$4d$
$a_{4,c}$ unbeanspruchter Rand $180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$		$3d$	$3d$	$3d$

1) Anhand von Versuchsergebnissen empfohlen
 2) $7d$, wenn $a_2 \geq 4d$ oder Ausführung mit Verstärkungen gegen Aufspalten
 3) $5d$ wenn Ausführung mit Verstärkungen gegen Aufspalten

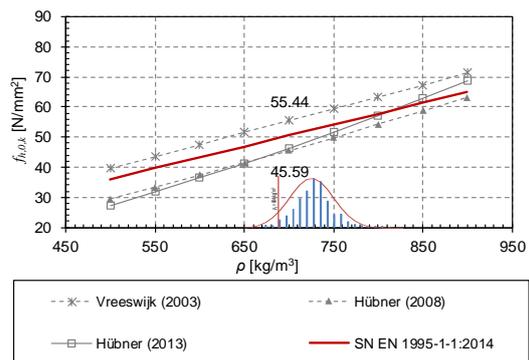
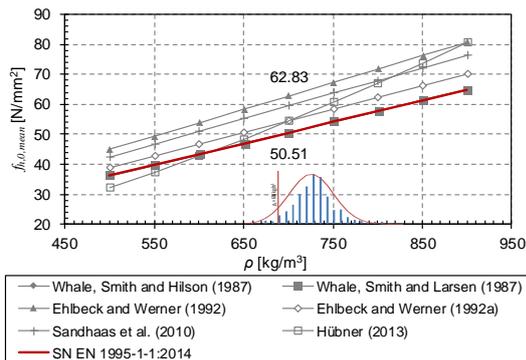


Abbildung 7: Vergleich der Lochleibungsfestigkeit für $d = 12 \text{ mm}$ parallel zur Faser aus Norm und Literatur, auf Mittelwert- $f_{h,0,mean}$ (links) und charakteristischem Niveau $f_{h,0,k}$ (rechts), zusätzlich ist die Rohdichteverteilung der Prüfkörper dargestellt

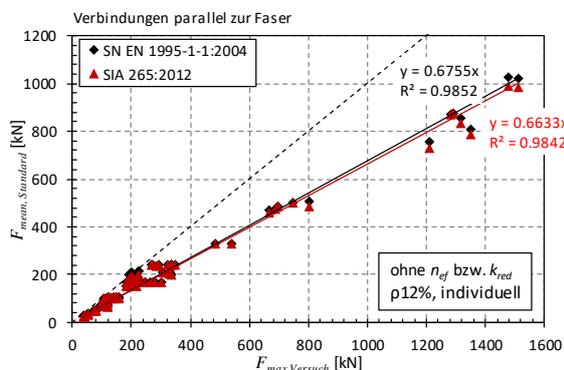


Abbildung 8: Vergleich der experimentellen Traglasten auf Mittelwertsniveau zur SIA 265:2012 und EC 5

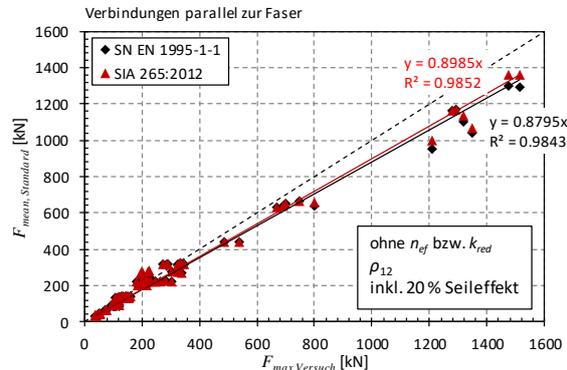


Abbildung 9: Vergleich der Traglasten auf Mittelwertsniveau zum angepassten Bemessungsansatz

Die nach der SIA 265:2012 respektive dem Eurocode 5 derzeit berechenbare Tragfähigkeit der Verbindungen mit Stabdübeln in Buchen-BSH führt zu einer Unterschätzung von ca. 33 % der Leistungsfähigkeit gegenüber der in experimentellen Versuchen erreichten tatsächlichen Tragfähigkeiten, siehe Abbildung 8. Die Gesamtheit der experimentellen

Tragfähigkeiten zeigt einen einheitlichen linearen Verlauf mit hoher Korrelation und Unabhängigkeit von n_{ef} . Für den Vergleich wurden die Tragfähigkeiten nach Gleichung (1) bis (3) aus Kapitel 3.1 bestimmt. Für die Bemessung von Stabdübel Verbindungen in Buchen-BSH wird daher in einem ersten Schritt eine Anpassung der Berechnung der Lochleibungsfestigkeit nach Ehlbeck und Werner (1992) und in einem zweiten Schritt eine Einführung der Seilwirkung von 20 % empfohlen. Diese Anpassungen der bisherigen Bemessungsansätze erhöhen die rechnerische Tragfähigkeit von Verbindungen mit Stabdübeln in Buchen-BSH auf ein Leistungsniveau von 88 % bzw. 90 %, siehe Abbildung 9.

4.3. Bemessung senkrecht zur Faser

Die Tragfähigkeiten der Verbindungen senkrecht zur Faser zeigen aufgrund der zwei unterschiedlich zu berücksichtigten Versagensarten nicht die gleich gute Korrelation. Zur Abschätzung der Tragfähigkeit werden nicht alle beeinflussenden geometrischen Parameter umfassend berücksichtigt. Dies kann sehr deutlich in Abbildung 10 für die Tragfähigkeiten auf dem Niveau von 100 kN gesehen werden, wo die Variation des Anschlusses hauptsächlich in der Verbindungsmittelabständen lag. Gleichermassen wie für die Anschlüsse parallel zur Faser, werden die rechnerischen Tragfähigkeiten unterschätzt. Eine deutliche Unterscheidung kann zwischen dem Versagen infolge von Querzug (gekennzeichnet mit Dreiecken) und der Ausbildung von Fließgelenken (gekennzeichnet mit Kreisen) gezogen werden. Aus diesem Grund sind im Folgenden die zwei Versagensarten getrennt betrachtet worden.

Für die Abschätzung des Versagens im Modus 3 –Ausbildung von Fließgelenken- wurde in gleicher Weise eine Erhöhung der Lochleibungsfestigkeit nach Ehlbeck und Werner (1992) und die Einführung des Seileffektes von 20% eingeführt. Die Traglasten können hierdurch auf ein Leistungsniveau von 79 % bzw. 83 % berechnet werden, vgl. Abbildung 11. Für die Bemessung des Querzugversagens wurde das Modell nach der DIN 1052:2008 und der prSIA265:2012 geprüft. Eine Korrelation von 100 % konnte unter Anwendung von einer

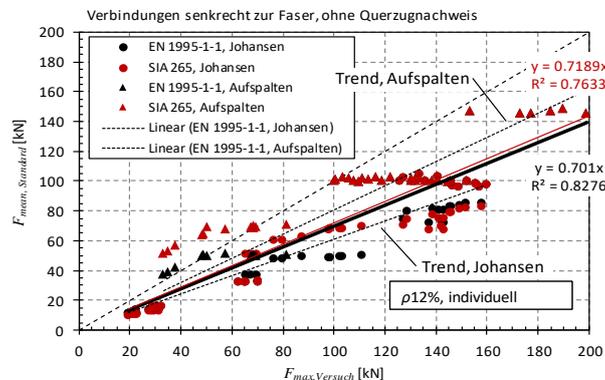


Abbildung 10: Vergleich der experimentellen Traglasten auf Mittelwertsniveau zur SIA 265:2012 und EC 5 mit Unterscheidung des Versagens, Fließgelenkausbildung (Kreise) und Querzug (Dreiecke)

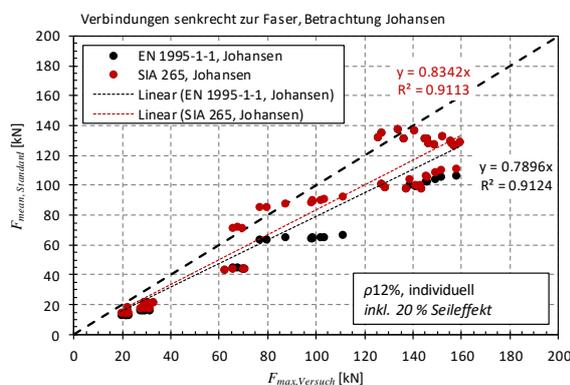


Abbildung 11: Vergleich der experimentellen Traglasten auf Mittelwertsniveau zur neuen empfohlenen Bemessung nach SIA 265:2012 und EC 5 für Fließgelenkausbildung

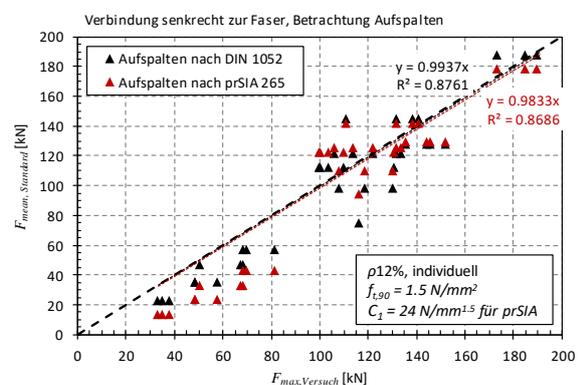


Abbildung 12: Vergleich der experimentellen Traglasten auf Mittelwertsniveau zur neuen empfohlenen Bemessung nach DIN 1052:2008 und prSIA 265:2012 für Querzug

Querzugfestigkeit für Buche von 1.5 N/mm^2 respektive dem Faktor C_1 von $24 \text{ N/mm}^{1.5}$ erreicht werden, vgl. Abbildung 12.

4.4. Bemessungsformeln

Für die Bemessung von Verbindungen mit Stabdübeln in Buchen-BSH bieten die bisherigen Bemessungsformeln von der SIA 265:2012 und dem Eurocode 5 basierend auf dem Johansen-Modell eine solide Grundlage. Die in Laubholz sehr hohen erreichbaren Traglasten können unter Anwendung der Gleichungen (4) bis (6) und folgenden Empfehlungen realitätsnah für die Nachweise der Tragsicherheit berechnet werden:

- Keine Reduzierung der Traglast durch effektive Anzahl der Stabdübel in Kraftrichtung
- Anwendung der Lochleibungsfestigkeit nach dem Ansatz von Ehlbeck and Werner (1992a)
- Berücksichtigung eines Seileffektes von 20% für die Versagensart der Ausbildung zweier Fliessgelenke (Modus 3 der Johansen Theorie)
- Nachweis des Querzuges für senkrecht zur Faser beanspruchte Verbindungen nach den Ansätzen der DIN 1052:2008 oder prSIA 265 mit Bemessungswerten von $f_{t,90,d} = 0.5 \text{ N/mm}^2$ und $C_{1,d} = 11.7 \text{ N/mm}^{1.5}$.

$$M_{y,R_k} = 0.3 f_u d^{2.6} \quad (4)$$

$$f_{h,0,k} = 0.102(1 - 0.01d) \rho_k \quad (5)$$

$$f_{h,90,k} = 0.102(1 - 0.016d) \rho_k$$

$$R_{v,R_k,(EC5)} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,k} t_1 d \\ f_{h,k} t_1 d \left(\sqrt{2 + \frac{4M_{y,R_k}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1 \right) \\ 1.2 \cdot 2.3 \sqrt{M_{y,R_k} f_{h,k} d} \end{array} \right. \quad (6)$$

5. Konstruktive Ausführung und Bemessung von Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen

5.1. Konstruktive Ausführung

Die derzeitig vorhandenen konstruktiven Regelungen schreiben minimale Randabstände von $a_2 = 2.5d$ vor, womit nur Ausnutzungsgrade von ca. 50% in Buchenholz erreicht werden können, vgl. Darlegung in Franke et al. (2019). In den Gruppenversuchen wurde kein Blockscherversagen festgestellt. Daher werden minimale Randabstände von $1.75d$ vorgeschlagen. Für unter senkrecht zur Faser eingeklebten Gewindestangen wurde kein Aufspalten beobachtet, jedoch muss bei geringen Abständen ein Blockscherversagen betrachtet werden. Dem Blockscherversagen kann durch eine grössere Einbindelänge entgegengewirkt werden.

5.2. Bemessung

Die SIA 265:2012 und die SN EN 1995-1-1:2014 enthält keine weiterführenden Informationen zur Bemessung der Tragfähigkeit. Zur Abschätzung der Tragfähigkeit kann das Bemessungsmodell der DIN EN 1995-1-1/NA:2010 genutzt werden. Der Auszieh Widerstand ergibt sich zu

$$F_{ax,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{ll} f_{y,d} \cdot A_{ef} & \text{Stahlversagen} \\ \pi \cdot d \cdot l_{ad} \cdot f_{k,1,d} & \text{Versagen Klebeverbund} \end{array} \right\} \quad (7)$$

mit:

$f_{y,d}$	Streckgrenze des Stahlstabes
A_{ef}	Spannungsquerschnitt Stahlstab
l_{ad}	Einklebelänge $l_{ad,min} = 10d$
d	Nenn Durchmesser Stahlstab
$f_{k,1,d}$	Klebefugenfestigkeit

In Abbildung 13 sind die errechneten Traglasten nach Formel (7) lt. DIN EN 1995-1-1/NA:2010 unter Anwendung des mittleren Ausziehparameters von 14.8 N/mm^2 den experimentellen Traglasten gegenübergestellt. Durch Berücksichtigung des Stahlversagens und Elimination der deutlich abweichenden Aufspaltergebnisse (mit der Vorgabe, dass in der zukünftigen Anwendung ein Aufspalten verhindert wird) ergibt sich eine 100%-ige Abschätzung mit sehr guter linearer Abhängigkeit und Korrelation der im Versuch erreichten Traglasten und dem Bemessungskonzept.

Mit Überführung der Konzepte auf charakteristisches bzw. Bemessungsniveau ergeben sich die in Abbildung 14 dargelegten Abhängigkeiten. Mit einer charakteristischen Festigkeit von 10 N/mm^2 bzw. Bemessungsfestigkeit von 6.2 N/mm^2 werden die Lasten zu 45 % abgeschätzt. Der Eurocode 5 fordert für die Bemessung von Bauteilen und Verbindungen eine Temperaturbeständigkeit von 60 °C . Nach ersten Erkenntnissen würde dies die anwendbare charakteristische Festigkeit reduzieren. Die Bestätigung und Festlegung ist noch Gegenstand aktueller Arbeiten. Zur Erreichung einer hohen Duktilität muss die Verbindung auf Stahlversagen bemessen werden, so dass sich rechnerisch Einbindelängen in Abhängigkeit der Stahlfestigkeit bis ca. $20d$ ergeben.

Zur Verhinderung des Aufspaltens, sollte die statisch wirksame Klebefuge um $5d$ in der Bohrlochachse zurückversetzt werden. Geeignete Maßnahmen sind zu treffen, um den Verbund zwischen Gewindestangen und Klebstoff in diesem Bereich zu unterbinden.

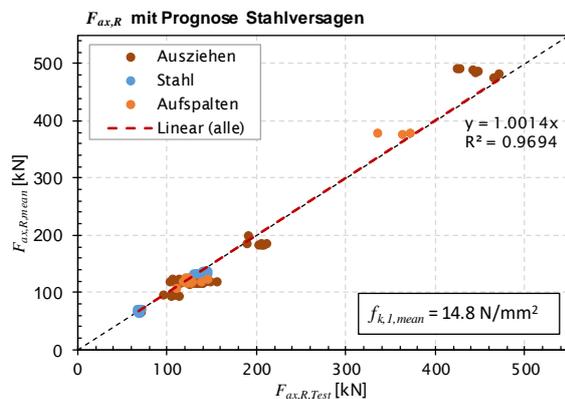


Abbildung 13: Vergleich der errechneten Traglasten mit dem Ansatz des Bemessungskonzeptes mit Berücksichtigung des Stahlversagens

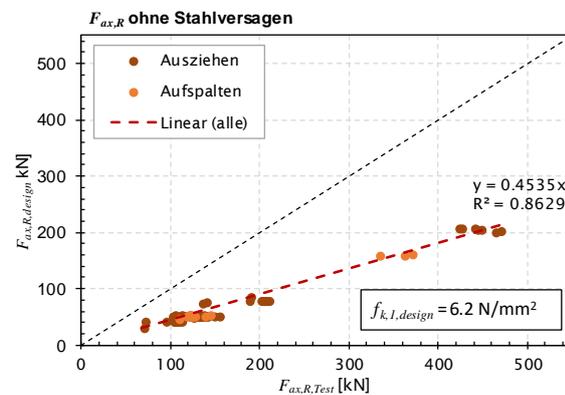


Abbildung 14: Prognose der Traglasten mit Bemessungsfestigkeiten von 6.2 N/mm^2

5.3. Qualitätssicherung

Für die Qualitätssicherung während der Ausführung von Anschlüssen mit eingeklebten Stäben/Gewindestangen ist eine Qualitätskontrolle zwingend lt. SIA 265:2012 (8.3.1) einzuhalten. Hierfür sind die Ausführungen und Vorbereitungen des Bohrloches, die Eignung des Klebstoffes und das Verkleben/Injizieren des Klebstoffes für eingeklebte Stäbe/Gewindestangen in Buchenholz zu regeln. Ausgehend von dem Stand der Technik für Nadelholz, der in der SIA 265:2012 und der DIN EN 1995-1-1/NA:2010 normativ geregelt, in der Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung (Z-9.1-778) der GSA® Technologie ausführlich beschrieben und von Steiger (2012) erörtert ist, werden folgende Empfehlungen für Buchenholz ausgesprochen:

- Die je nach Herstellungsvariante (stehend – mit oder ohne Einfülllöcher, liegend) benötigten Einfülllöcher für den Klebstoff sollten vor dem Stangenloch für die Gewindestange ausgeführt werden. Hierdurch werden eventuelle Ausbrüche, die die Klebstoffverteilung im Hohlraum beeinträchtigen können, vermieden. Die Einfüll- und Entlüftungsbohrungen sind entsprechend der Einbindelänge zu platzieren.
- Der Bohrdurchmesser des Stangenloches muss zwischen 2 mm und 4 mm größer als der Nenndurchmesser der Gewindestange sein. Es empfiehlt sich das Stangenloch auf einer Langlochbohrmaschine (1500 U/min , Vorschub ca. 2300 mm/min) vorzubohren. Es muss gewährleistet sein, dass die Bohrlochwandung nicht verbrennt, da dies zu einer erheblichen Reduzierung der Klebefugenfestigkeit führt.

- Vor dem Einbringen der Gewindestangen müssen die Bohrlöcher gereinigt werden (z. B. Ausblasen mit fettfreier Druckluft).
- Die Gewindestangen müssen nach dem Zuschnitt und vor dem Einbringen entfettet/-ölt werden.
- Im Einpressvorgang müssen die Gewindestangen zentrisch in Position gehalten werden. Hierfür können Gewindekappen am Bohrlochende und Distanzhülsen bei der Bohrlochöffnung eingesetzt werden. Es ist darauf zu achten, dass die Bohrlöcher entsprechend der dem Zentriermittel geschuldeten Höhe tiefer gebohrt werden müssen.
- Die Angaben des Klebstoffherstellers u. a. zum Holzfeuchtebereich, Verarbeitungsklima, Topf- und Aushärtezeit ebenso wie die Sicherheitsvorschriften der Hersteller sind einzuhalten. Für die Verwendung von 2-Komponenten-Klebstoffen in Kartuschen muss gewährleistet sein, dass die zwei Komponenten richtig vermischt sind. Es empfiehlt sich Kontrollproben zu erstellen.
- Während des Einpressens des Klebstoffes sollte im gleichen Stangenloch kein Kartuschenwechsel aufgrund von möglichen Lufteintritten erfolgen.
- Für eine gleichmässige Klebstoffverteilung sollte die Einpressgeschwindigkeit maximal bei ca. 20 mm/s liegen (ca. Wert basierend auf $v_E = l_{ad}/t = 160 \text{ mm}/8 \text{ Sekunden}$).
- Es sind Klebstoffproben zur Qualitätskontrolle und -nachweis zu erstellen.
- Die Zugfestigkeit der Gewindestange sind pro Gewindestangencharge zu prüfen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

6.1. Verbindungen mit Stabdübeln

Die vorgestellten Ergebnisse des Forschungsprojektes zu leistungsfähigen Anschlüssen in Laubholz zeigen für Anschlüsse mit Stabdübeln/Passbolzen, dass das Tragverhalten dieser Verbindungen in Buchenbrettschichtholz mit den bisher verwendeten Bemessungsansätzen nach SIA 265:2012 oder SN EN 1955-1-1:2014 bzw. DIN EN 1995-1-1/NA:2010 sehr gut korrelieren. Mit Anpassung der verwendeten Materialparameter und Einführung des Seileffektes können so die bisherig rechnerisch unterschätzten Traglasten der Normen ausgeglichen werden. Aus den Ergebnissen konnten Empfehlungen für die Ausführung von Anschlüssen in Bezug auf Einbringvoraussetzung und Mindestabstände abgeleitet werden. Basis hierfür war das Einhalten einer hohen Duktilität. Die Ergebnisse sind folgend kurz zusammengefasst:

- Für die Realisierung der Verbindungen mit Stabdübeln/Passbolzen in Buchen-BSH ohne grosse technische Hilfsmittel und evtl. Vorschädigung wird eine Differenz von +0.1 mm zwischen Nenndurchmessers des Verbindungsmittels und Bohrloch festgelegt.
- Ein duktiles Versagen durch Ausbildung von Fliessgelenken (Modus 3) in den Stabdübeln/Passbolzen ist durch Einhaltung der Mindestabstände sichergestellt.
- Die Mindestrand- und Verbindungsmittelabstände können entsprechend Tabelle 1 gewählt werden.
- Eine Reduzierung der tatsächlichen Anzahl von Verbindungsmitteln in Faserrichtung muss nicht erfolgen.
- Die Bemessungsformeln in der SIA 265:2012 und Eurocode 5 können als Grundlage benutzt werden, unterschätzen aber die tatsächliche Leistungsfähigkeit der Verbindungen.
- Die Berücksichtigung der höheren Lochleibungsfestigkeiten nach Ehlbeck and Werner (1992a) und des Seileffekts führen zu einer Korrelation der experimentellen Tragfähigkeit zur rechnerischen Tragfähigkeit von 79% und 88% für senkrecht respektive parallel zur Faser beanspruchte Verbindungen.
- Für den Querschnittsnachweis bei senkrecht zur Faser beanspruchten Verbindungen in Buchen-BSH werden die Bemessungsansätze in der DIN 1052:2008 und der prSIA 265:2012 unter Verwendung der angegebenen Festigkeit bzw. Materialparameter empfohlen.

Es wurden in ersten Ansätzen der Einfluss der Holzfeuchte und mögliche Exzentrizität geprüft, vgl. Franke et al. (2019). Für eine breite Absicherung bestimmter Empfehlungen sollten spezifisch ausgewählte Anschlüsse im Grossformat weiterführend geprüft werden.

6.2. Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen

Die erreichten Ausziehfestigkeiten der eingeklebten Gewindestangen sind jeweils im Vergleich der Serien dargestellt, so dass verschiedene Einflussparameter bewertet werden konnten. Generell zeigen eingeklebte Gewindestangen in Buchenholz hohe Ausziehfestigkeiten im Vergleich zu Nadelholz und ergeben ein Stahlbruch der Gewindestange bei $15d$ Einbindelänge. Eine Abhängigkeit der Festigkeit gegenüber dem Gewindestangendurchmesser konnte nicht erkannt werden. Die Festigkeiten parallel zur Faserrichtung liegen unter denen der Versuche mit 45° und 90° zur Faser orientierten und beanspruchten Gewindestangen. Für eine einfache Anwendung und Berechnung wird eine konstante Festigkeit vorgeschlagen.

Für die Bemessung von Anschlüssen mit eingeklebten Stäben/Gewindestangen kann der Ansatz der DIN EN 1995-1-1/NA:2010 als Empfehlung genutzt werden. Wobei die Ausziehfestigkeit $f_{k,1}$ zu 10 N/mm^2 vorgeschlagen wird. Eine Reduktion durch die geforderte Temperaturbeständigkeit ist noch zu prüfen. Die Mindestrand- und Verbindungsmittelabstände $a_{1,c}$ und $a_{2,c}$ können gegenüber der DIN EN 1995-1-1/NA:2010 unter Vermeidung des vorzeitigen Aufspaltens auf $1.75d$ reduziert werden. Damit sind hohe Ausnutzungen der Holzquerschnitte möglich. Das Aufspalten konnte in allen Versuchen durch das Zurückversetzen der Einbindelänge um $5d$ verhindert werden. Ein Blockscherversagen der Verbindungsmittelreihen bei quer zur Faser eingeklebten Gewindestangen muss ebenfalls beachtet werden. Dies kann durch eine grössere Einbindelänge vermieden werden, was in weiterer Forschungsarbeit bestätigt werden muss.

Die Bewertung der Tragfähigkeit von Anschlüssen mit eingeklebten Stäben/Gewindestangen soll nach Steiger (2012) als ganzheitliches System betrachtet werden. Für leistungsfähige Anschlüsse sollte eine Abstimmung der Querschnittsflächen von Stahl A_{Stahl} und Holz A_{Holz} in Abhängigkeit der umgekehrten Proportionalität der Elastizitätsmoduln von Stahl E_{Stahl} und Holz E_{Holz} erfolgen, vgl. Steiger (2012).

7. Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse entstanden im Forschungsprojekt «Grundlagen zur Bemessung von Anschlüssen für die Marktimplementierung in der Schweiz» Nr. 09.0063PJ/O405-33997, das vom Bundesamt für Umwelt im Rahmen des Aktionsplans Holz und Partnern aus der Forschung, Wirtschaft, Gemeinde und Verband unterstützt wurde. Die Prüfserien und -ergebnisse entstanden in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich.

8. Literatur

Blaß H.J., Sandhaas C. (2016). Ingenieurholzbau, Grundlagen der Bemessung. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, Deutschland.

DIN EN 1995-1-1/NA:2010 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Deutschland.

Ehlbeck, J., Werner, H., (1992a). Softwood and Hardwood Embedding Strength for dowel-type fastener. In: Proceedings CIB-W18, 25-7-2, Ahus, Schweden.

Ehlbeck, J., Werner, H., (1992b). Tragfähigkeit von Laubholzverbindungen mit stabförmigen Verbindungsmitteln. Technical Report. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Karlsruhe, Deutschland.

Eid. Forschungsanstalt für Wald Schnee u. Landschaft (2018): Schweizerisches Landesforstinventar, 4. Landesforstinventar 2009 –2013, Schweiz.

Franke, S., Magnière, N. (2014). Discussion of Testing and Evaluation Methods for the Embedment Behaviour of Connections, In: INTER, Paper 47-7-1, Bath, England.

Franke, S., Franke B., Heubuch S., Frangi A., Jockwer R. (2019) Grundlagen für hochleistungsfähige Anschlüsse in Laubholz, Research report, ISBN 978-3-906878-06-5, Publishing Dez. 2019.

- Gehri E. 2009 Eingeklebte Anker – Anforderungen und Umsetzungen, 15. Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Partenkirchen, Deutschland.
- Hübner, U., Bogensperger, T., Schickhofer, G., (2008). Embedding strength of European hardwoods. In: CIB-W18 Meeting 41, 41-7-5, St. Andrews, Kanada.
- Hübner, U., (2013). Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile. Thesis (PhD). Technische Universität Graz.
- Johansen K. W. (1949). Theory of timber connections. IABSE Journal (International Association for bridge and structural engineering), Nr. 9, S. 249 – 262.
- prSIA 265:2012, Holzbau, in preparation, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.
- Sandhaas, C., Ravenshorst, G.J.P., Blass, H.J., van de Kuilen, J. W. G., (2013). Embedment tests parallel-to-grain and ductility aspects using various wood species. Eur. J. Wood Prod. 71, S. 599–608.
- SIA 265:2012. Holzbau. Schweizer Norm. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz.
- SN EN 1995-1-1:2004. Eurocode 5 – Bemessung und Konstruktion von Holzbauten. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz.
- SN EN 1995-1-1:2004/A1:2008. Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau - Änderung A1 zur Norm EN 1995-1-1:2004. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz.
- SN EN 1995-1-1:2004/A2:2014. Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau - Änderung A2 zur Norm EN 1995-1-1:2004. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz.
- SN EN 26891:1991. Holzbauwerke – Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln; Allgemeine Grundsätze zur Ermittlung der Tragfähigkeit. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz.
- SN EN ISO 6892-1:2016 Metallische Werkstoffe – Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz.
- Steiger R., Gehri E., Widmann R. (2006) Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam parallel to the grain, Material and Structures 40, S. 69-78
- Steiger R. (2012). In Brettschichtholz eingeklebte Gewindestangen – Stand des Wissens zu einer leistungsfähigen Verbindungstechnik. 18. Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Partenkirchen, Deutschland.
- Steiger R., Serrano E., Stepinac M., Rajčić V., O’Neill C., McPolin, D., Widmann R. (2015). Reinforcement with glued-in rods. In: Harte A., Dietsch P. (2015) Reinforcement of timber structures – A state of the art report. Shaker Verlag, Deutschland.
- Vreeswijk, B., (2003). Timber joints using hardwood species. Thesis (Master), Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, Niederlande.
- Whale, L.R.J., Smith, I., (1986). The derivation of design clauses for nailed and bolted joints in Eurocode 5. In: CIB-W18 Meeting, 19-7-6, Florence, Italien.
- Whale, L. R. J., Smith, I., Hilson, B.O. (1986). Behaviour of Nailed and Bolted Joints under Short-Term Lateral Load. In: CIB-W18 Meeting, 19-7-1, Florence, Italien.
- Whale, L.R.J., Smith, I., Larsen, H.J., (1987). Design of nailed and bolted joints – Proposal for the revision of existing formulae in draft Eurocode 5 and the CIB code. In: Proceedings of CIB-W18 Meeting, 20-7-1, Irland.
- Widmann R., Steiger R., Gehri E. (2007) Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam perpendicular to grain, Materials and Structures 40, S. 827-838.