

Eurocode 5:2022 – Einführung in den neuen Abschnitt Verstärkungen mit Fokus auf Querdruckverstärkungen zur Lastdurchleitung

In freundschaftlicher Verbundenheit gewidmet Alfons Brunauer (1963-2018)

Philipp Dietsch
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Technische Universität München
München, Deutschland



Vorbemerkung des Autors:

Die Eurocodes befinden sich in einer Phase intensiver Überarbeitung. Mit den Teilen «Holz-Beton-Verbund», «Brettsperrholz» und «Verstärkungen» sind die ersten Entwürfe für neue Abschnitte zum Eurocode 5 fertiggestellt. Die Fachöffentlichkeit ist an einer umfassenden Information interessiert, gleichzeitig ist ein breites Feedback aus der Praxis erwünscht. Der Autor wurde daher von verschiedenen Seiten gebeten, über die Entwicklungen im Bereich «Verstärkungen» zu berichten. Ich bitte daher um Verständnis, dass zur Sicherstellung einer umfassenden und gleichbleibenden Information der unterschiedlichen Teilnehmerkreise sich einander ähnelnde Veröffentlichungen erfolgen (z. B. an den Karlsruher Tagen 2018 und an dieser Veranstaltung).

Eurocode 5:2022 – Einführung in den neuen Abschnitt Verstärkungen mit Fokus auf Querdruckverstärkungen zur Lastdurchleitung

1. Einleitung

Im Bereich der Verbindungstechnik bieten auf Zug (axial) beanspruchbare Vollgewindeschrauben oder Gewindestangen mit Holzschraubengewinde ein weites Anwendungsfeld. Diese sind schnell (i.d.R. ohne Vorbohren) einzubauen und besitzen beträchtliche Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften. Sie finden Anwendung bei Verbindungen wie Zugstössen, Haupt-Nebenträger-Verbindungen, Pfosten-Riegel-Verbindungen, Koppelpfetten und im Holz-Beton-Verbund. Ein weiterer grosser Anwendungsbereich sind Verstärkungen (Auflager, Ausklinkungen, Durchbrüche, Queranschlüsse, gekrümmte Träger) [1], wo Vollgewindeschrauben einen grossen Marktanteil der vor ihrer Entwicklung häufig angewendeten, eingeklebten Gewindestangen übernommen haben.

Die europäische Bemessungsnorm für Holzbauten, Eurocode 5, enthält in ihrer aktuellen Fassung [2] keine spezifischen Angaben zur Bemessung von Verstärkungen. Die normgerechte Anwendung von Verstärkungselementen ist bisher nur in wenigen europäischen Ländern über nicht widersprechende Regeln zum Eurocode 5 (NCCI) in den nationalen Anhängen (NA) ermöglicht [3], [4]. Um die offensichtliche Lücke im Eurocode 5 zu schliessen wurde das Thema *Verstärkungen* auf der Liste der Arbeitspakete als vorrangig eingestuft [5].

2. Herangehensweise

Normung markiert einen wichtigen Schritt erfolgreicher Forschung und Entwicklung, welche positive Anwendung und Akzeptanz in der Praxis gefunden hat, siehe Abb. 1. Entsprechend der europäischen Position zur Normung sollen harmonisierte technische Regeln für übliche Bemessungsfälle erarbeitet werden und nur Regeln enthalten, die auf allgemein anerkannten Forschungsergebnissen beruhen, welche durch ausreichende praktische Anwendung und dahingehende Erfahrungen validiert wurden. Die Zielgruppe für solche Bemessungsregeln sind kompetente Bauingenieure und Tragwerksplaner, also qualifizierte Fachleute, die in der Lage sind, in ihrem Bereich selbstständig zu arbeiten [6].

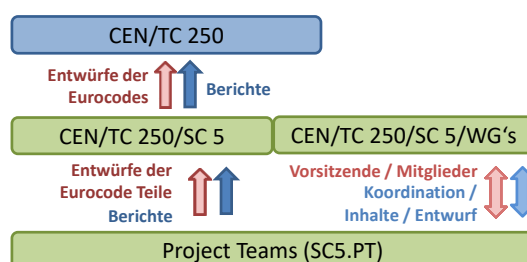
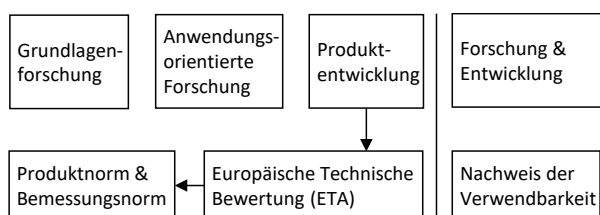


Abbildung 1: Entwicklung von Produkten und der Weg zur Anwendbarkeit

Abbildung 2: Struktur der Normungsarbeit

Die Entwicklung von Bemessungsansätzen für Bauprodukte setzt voraus, dass für diese genormte Prüfverfahren sowie eine Produktnorm oder eine abZ / ETA zur Verfügung stehen. Die Arbeit an den europäischen Bemessungsnormen ist wie folgt strukturiert, siehe auch Abb. 2 und [7]: Das europäische Normungskomitee CEN/TC 250 hat ein Mandat, die Bemessungsregeln für das Bauwesen weiterzuentwickeln. Dieses Komitee ist in 11 Sub-Komitees unterteilt; CEN/TC 250/SC 5, eines dieser Sub-Komitees, ist verantwortlich für alle Teile des Eurocode 5 (EN 1995). Die nationalen Normungsinstitute (z.B. DIN) entsenden über ihre Spiegelausschüsse Delegierte in diese Sub-Komitees. Zur

Erleichterung der technischen Arbeit wird das Sub-Komitee SC 5 von 10 Arbeitsgruppen (WGs) unterstützt; WG 7 ist verantwortlich für Verstärkungen. Die nationalen Spiegelausschüsse entsenden Experten in die Arbeitsgruppen. Die Arbeitsgruppen sind verantwortlich für ihr spezifisches Arbeitsprogramm. In ihnen werden technische Diskussionen geführt, welche in Vorschlägen für die Normung münden.

Die Ausarbeitung eines Entwurfes des Normtextes incl. Zeichnungen liegt in der Verantwortung sog. Project Teams (PTs). Innerhalb eines vorgegebenen Zeitrahmens müssen die PTs einen Normentwurf inkl. harmonisierter Terminologie und Symbolen und unter Berücksichtigung der Grundsätze des «ease-of-use» [6] erstellen. Darüber hinaus müssen die PTs sog. Hintergrunddokumente erarbeiten, welche die technischen Begründungen und wissenschaftlichen Hintergründe für den vorgeschlagenen Normentext beschreiben. Während der Bearbeitungsphase durchlaufen die Entwürfe der PTs drei Phasen der Kommentierung seitens der nationalen Normenausschüsse. Das Project Team SC5.T1 hat Ende April 2018 seine finalen Entwürfe eingereicht. Die finalen Entwürfe der PTs werden bis zum Abschluss der Arbeiten am Eurocode 5 weiter diskutiert und erforderlichenfalls angepasst. Im Folgenden werden die wichtigsten Inhalte und Hintergründe des Schlussentwurfes *Verstärkungen* des PT SC5.T1 (nachfolgend auch *Entwurf Verstärkungen* genannt) vorgestellt und die Weiterentwicklungen gegenüber der bisherigen Bemessungspraxis erläutert. Abschliessend wird auf Neuentwicklungen im Bereich von Querdruckverstärkungen mit beidseitig eingebrachten Vollgewindeschrauben zur Lastdurchleitung eingegangen.

3. Verstärkungen – Allgemeines

Die Verstärkung von Holzbauteilen in Richtung von Beanspruchungen, gegenüber denen Holz nur geringe Festigkeitseigenschaften und spröde Versagensmechanismen aufweist (Querzug), ist im deutschsprachigen Raum bereits normativ geregelt [3], [4]. Bei der Erarbeitung des Entwurfes *Verstärkungen* wurden diese eingeführten und seit langem angewendeten Regeln zu Grunde gelegt und um neuere Erkenntnisse erweitert. Im Hinblick auf die Einfachheit der Anwendung («ease-of-use») wurde die Struktur und Abfolge der Abschnitte jedoch geändert. Anstelle eines separaten Abschnittes *Verstärkungen* wurden die zugehörigen Angaben in den bereits bestehenden Hauptteil eingegliedert, um den typischen Ablauf einer Bemessungsaufgabe zu spiegeln: Allgemeines – Bemessung des unverstärkten Bauteils (z.B. gekrümmter Träger) – Bemessung von Verstärkungen für dieses Bauteil (z.B. Gewindestangen).

Im Folgenden werden nur die Teile des Entwurfes *Verstärkungen* dargestellt, die eine Änderung oder Erweiterung zu den bereits in [3] und [4] eingeführten Regeln darstellen. Nicht oder nur marginal angepasste Regeln werden über einen Abschnitts- oder Gleichungsverweis auf den deutschen NA zum Eurocode 5 [3] eingeführt. Für eine umfassende Darstellung des kompletten Entwurfes *Verstärkungen* inkl. Hintergrundinformationen wird auf [8] verwiesen.

Im Entwurf abgedeckt wird die Verstärkung von:

- Gekrümmten Trägern und Satteldachträgern
- Rechtwinkligen Ausklinkungen
- Durchbrüchen
- Queranschlüssen
- Stabdübelverbindungen
- Bereiche hoher Querdruckspannungen

Grundvoraussetzungen für Verstärkungselemente sind zum einen ein kontinuierlicher Verbund zwischen Verstärkungselement und Holz, zum anderen eine ausreichende Steifigkeit des Verstärkungselementes, um grosse Rissbildungen zu vermeiden. Die folgenden stiftförmigen Verstärkungselemente dürfen verwendet werden:

- Vollgewindeschrauben nach EN 14592 oder ETA

- Gewindestangen mit Holzschraubengewinde nach ETA
- Eingeklebte Gewindebolzen oder eingeklebte gerippte Betonstabstähle.

Die folgenden flächenförmigen Verstärkungselemente dürfen verwendet werden:

- Aufgeklebtes Sperrholz oder Massivholzplatten nach EN 13986
- Aufgeklebtes Furnierschichtholz nach EN 14374
- Aufgeklebte Lamellen aus Vollholz nach EN 14081-1 oder Sperrholz nach EN 13986 oder Furnierschichtholz nach EN 14374.
- Eingepresste Nagelplatten

Die Verstärkungselemente müssen für die Anwendung im zu verstärkenden Holzprodukt und die vorliegende Nutzungsklasse zugelassen sein. Für alle Verstärkungselemente gilt, dass diese so nah wie möglich an den Ort der Querspannungen und/oder Schubspannungen, d.h. unter Verwendung der minimal möglichen Abstände angeordnet werden sollten. Die Abstandsregelungen entsprechen [3] NA.6.8.1 (NA.5), für Vollgewindeschrauben und Gewindestangen mit Holzschraubengewinde gelten die Angaben der zugehörigen ETA. Für geneigt (d.h. unter einem Winkel $< 90^\circ$) eingebrachte, stiftförmige Verstärkungselemente dürfen die Abstände vom Schwerpunkt des Schraubengewindes im Bauteil aus bestimmt werden, siehe Abb. 3 und Abb. 4. Aufgrund des beschränkten Einflussbereichs von Verstärkungselementen sollte in blockverklebten Querschnitten jeder Teilquerschnitt für sich verstärkt werden. Querschnittsschwächungen sind zu berücksichtigen.

4. Querzugverstärkungen

4.1. Bemessung der Verstärkungselemente

Querzugverstärkungen in Holz sind vergleichbar mit einer schlaffen Bewehrung bei Betonbauteilen. Da Holz auf Zug quer zur Faser eine geringe Festigkeit und ein sprödes Versagen aufweist, wird die Querzugfestigkeit des Holzes in der Bemessung von verstärkten Bauteilen nicht berücksichtigt, d.h. es wird mit gerissener Querzugzone gerechnet.

Die Bemessung der Verstärkungselemente für Querzugverstärkungen wurde überarbeitet mit dem Ziel der Harmonisierung, der Unabhängigkeit vom zu verstärkenden Bauteil/Detail und einer übersichtlichen Darstellung an einem Ort («ease-of-use»):

$$\frac{F_{t,90,Ed}}{F_{t,90,Rd}} \leq 1,0 \quad (1)$$

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit von stiftförmigen oder flächenförmigen Verstärkungselementen, $F_{t,90,Rd}$, entspricht dem kleinsten Wert aus den folgenden Formeln (2) – (4):

Für Vollgewindeschrauben oder Gewindestangen mit Holzschraubengewinde (siehe auch [2], 8.7.2):

$$F_{t,90,Rd} = n_r \cdot \min \left\{ \begin{array}{l} f_{ax,d} \cdot d \cdot \ell_{ad} \\ f_{tens,d} \end{array} \right. \quad (2)$$

Für eingeklebte Gewindebolzen oder eingeklebte gerippte Betonstabstähle:

$$F_{t,90,Rd} = n_r \cdot \min \left\{ \begin{array}{l} f_{b1,d} \cdot \pi \cdot d \cdot \ell_{ad} \\ f_{yb,d} \cdot A \\ 0,9 \cdot f_{ub,d} \cdot A_S \end{array} \right. \quad (3)$$

Für aufgeklebte flächenförmige Verstärkungselemente:

$$F_{t,90,Rd} = n_r \cdot \min \begin{cases} f_{b2,d} \cdot \ell_{ad} \cdot b_r \\ \frac{f_{t,d}}{k_k} \cdot b_r \cdot t_r \end{cases} \quad (4)$$

mit:

$$\ell_{ad} = \min \begin{cases} \ell_{ad,t} \\ \ell_{ad,c} \end{cases} \quad (\text{siehe Abb. 3 – 6}) \quad (5)$$

Eine Erläuterung der einzelnen Symbole kann dem Anhang entnommen werden. Festigkeitskennwerte für Klebfugen dürfen Tabelle 1 entnommen werden.

Mit dem Beiwert k_k wird die ungleichförmige Spannungsverteilung in flächenförmigen Verstärkungselementen berücksichtigt. Ohne weiteren Nachweis darf der Wert k_k angenommen werden zu:

$$k_k = \begin{cases} 1,0 & \text{für gekrümmte Träger und Satteldachträger} \\ 2,0 & \text{für rechtwinklige Ausklinkungen an} \\ & \text{Biegestäben mit Rechteckquerschnitt} \\ 2,0 & \text{für Durchbrüche bei Biegestäben} \\ & \text{mit Rechteckquerschnitt} \\ 1,5 & \text{für Queranschlüsse} \end{cases} \quad (6)$$

Tabelle 1: Mindestwerte für charakteristische Festigkeitskennwerte in N/mm² für Klebfugen bei Verstärkungen^a

	Wirksame Einkleblänge ℓ_{ad} des Stahlstabes, in mm		
	≤ 250	$250 < \ell_{ad} \leq 500$	$500 < \ell_{ad} \leq 1000$ ^c
Klebfuge zwischen Stahlstab und Bohrlochwandung, $f_{b1,k,r}$ in N/mm ² ^{b,c}	4,0	$5,25 - 0,005 \cdot \ell_{ad}$	$3,5 - 0,0015 \cdot \ell_{ad}$
Klebfuge zwischen Trägeroberfläche und Verstärkungsplatte / Lamelle für eine annähernd dreiecksförmige Spannungsverteilung, $f_{b2,k,r}$ in N/mm ² ^b	0,75		

^a Für die Ausführung von eingeklebten oder aufgeklebten Verstärkungen oder Verbindungen können nationale Bestimmungen gelten.

^b Die Informationen in dieser Tabelle sollten nur angewendet werden, wenn die Werte für das verwendete Klebstoffsystem nachgewiesen wurden.

^c Für Anwendungen, in denen $\ell_{ad} > \min \{40 \cdot d; 1000\}$ in mm, sollte die für $\ell_{ad} = \min \{40 \cdot d; 1000\}$ ermittelte Tragfähigkeit angenommen werden.

Hinweis: an europäischen Regelungen zur Bemessung und Herstellung von eingeklebten Gewindestangen wird momentan in CEN/TC 250/SC 5/WG 5 «Verbindungen» gearbeitet.

4.2. Effekte von Holzfeuchteänderungen

Steife Verstärkungselemente, z.B. in Form von rechtwinklig zur Faser eingebrachten Vollgewindeschrauben oder Gewindestangen, verhindern das freie Schwinden bzw. Quellen des Holzes in ihrem Wirkungsbereich. Diese Sperrwirkung führt zu feuchteinduzierten Spannungen quer zur Faser, die im Fall von Schwindspannungen zu tiefen Schwindrissen und einer damit verbundenen Reduzierung der Tragfähigkeit führen können. Normativ wird die Sperrwirkung rechtwinklig oder geneigt zur Faser eingebrachter Verstärkungen derzeit nicht berücksichtigt. Eine rechnerische Erfassung der Sperrwirkung von Verstärkungsmassnahmen bei Klimawechseln wie auch die Angabe eines zugehörigen Nachweisformats ist komplex. Es existieren aber langjährige Erfahrungen mit querzugbewehrten Bauteilen und Anschlüssen. Auf diese wurde bei der Formulierung entsprechender Konstruktionsregeln zurückgegriffen. Zusätzlich zu den üblichen Massnahmen (z.B. Herstellung mit erwarteter Ausgleichsfeuchte, Schutz vor Feuchteaufnahme während Transport, Lagerung und Einbau) werden weitere Massnahmen zur Reduzierung der Sperrwirkung von Verstärkungen angegeben [9]:

- grössere Abstände zwischen den Verstärkungselementen
- Verringerung der Höhe der verstärkten Bereiche im Holzbauteil
- Verringerung des Winkels zwischen stiftförmigen Verstärkungselementen und der Faserrichtung des verstärkten Holzbauteils.

Sollen Holzbauteile in dauerhaft trockenem oder häufig wechselndem Klima eingesetzt werden, so empfiehlt es sich, aussen vollflächig aufgeklebte Verstärkungselemente einzusetzen. Diese dämpfen zum einen die Austrocknung des Holzquerschnitts, zum anderen resultiert das kleinere Steifigkeitsverhältnis zwischen Verstärkungselement und Holzbauteil in geringeren feuchteinduzierten Querspannungen. Für trockene Umgebungsbedingungen sollten zudem Massnahmen für eine kontrollierte Trocknung der Bauteile auf die Ausgleichsfeuchte vorgesehen werden. Es werden Angaben gemacht, welche Ausgleichsfeuchten in welchen Umgebungsbedingungen zu erwarten sind (z.B. Nadelholz in gedämmten und geheizten Gebäuden: 7 % - 10 % mit jährlichen Amplituden von ± 3 %; Nadelholz in überdachten, ungedämmten und ungeheizten Gebäuden: 12 % - 16 %). Die Informationen sind eng an die Angaben in [10] angelehnt.

4.3. Verstärkung von Satteldachträgern mit geradem Untergurt, gekrümmten Trägern und Satteldachträgern mit gekrümmtem Untergurt

Für Satteldachträger und gekrümmte Träger werden Angaben zur Verstärkung für die vollständige Aufnahme der Querspannungen gemacht. Die Formeln zur Bestimmung der Beanspruchung in den Verstärkungselementen, $F_{t,90,Ed}$, entsprechen den Formeln (NA.101) und (NA.102) in [3]. Die aus [3] bekannten Angaben zu Verstärkungen für die Aufnahme zusätzlicher klimabedingter Querspannungen (Teilbewehrung) wurden nicht übernommen. Neuere Untersuchungen [9] deuten an, dass bereits eine Abnahme der Holzfeuchte von 1 - 2 % im Umfeld der Verstärkung zur Neutralisierung des Verstärkungseffektes, d.h. der anteiligen Abtragung der geometrie-/lastbedingten Querspannungen durch das Verstärkungselement im ungerissenen Holzbauteil führen kann. Bei trockenen Umgebungsbedingungen könnte eine mögliche Spannungsfreisetzung in Form von tiefen Schwindrissen aufgrund des Sperreffektes der Teilbewehrung gegenüber dem freien Schwinden des Holzbauteils Fragen nach der Resttragfähigkeit aufwerfen.

In Erweiterung der Angaben in [3] und [4] werden auch Angaben zur Bemessung von Satteldachträgern mit nachgiebig verbundener Firstspitze und hochgesetzter Trockenfuge gemacht. Bei diesen ist die Abstufung der Querszugverstärkung vom First nach aussen hin abnehmend nicht mehr zutreffend. Vielmehr sollte eine Verteilung der Querszugverstärkung in Abhängigkeit der Querspannungen im gekrümmten Bereich und in den Nebenfirsten angestrebt werden. Die Querszugbeanspruchungen im Nebenfirst können nach [11] bestimmt werden. Es wird empfohlen, die für den Nebenfirst ermittelte Verstärkung, ausgehend von einem Verstärkungselement direkt im Nebenfirst, zum First hin über eine Länge von mindestens $2 \cdot h_{ap}$, vom Nebenfirst in Richtung Auflager über eine Länge von mindestens h_{ap} anzuordnen. Danach sollten die für den gekrümmten Bereich ermittelten Querszugverstärkungen über den verbleibenden gekrümmten Bereich zwischen den Nebenfirsten sowie ggfs. über die verbleibenden gekrümmten Bereiche ausserhalb der Nebenfirste angeordnet werden.

Eine Anpassung der Abstände zwischen den Verstärkungselementen, a_1 , entsprechend der Verteilung der Querspannungen über die Länge des querszugbeanspruchten Bereichs ist zulässig. Die weiteren Angaben zu Mindest- und Maximalabständen ($250 \text{ mm} \leq a_1 \leq 0,75 \cdot h_{ap}$) und Einbindelängen entsprechen den Angaben in [3] NCI NA.6.8.6.

4.4. Verstärkung von rechtwinkligen Ausklinkungen an den Enden von Biegestäben mit Rechteckquerschnitt

Die Angaben zur Verstärkung von rechtwinkligen Ausklinkungen lehnen sich eng an die Angaben in [3] an. Dazu gehört die Formel zur Bestimmung der Beanspruchung in den Verstärkungselementen, $F_{t,90,Ed}$, welche (NA.77) in [3] gleicht, sowie die wirksame Fläche

von aufgeklebten flächenförmigen Verstärkungselementen, welche (NA.84) in [3] entspricht. Erweitert wurden diese Regelungen um die Begrenzung der Tragfähigkeit von Ausklinkungen mit rechtwinklig zur Faser angeordneten stiftförmigen Verstärkungselementen auf das Zweifache der Tragfähigkeit der unverstärkten Ausklinkung. Diese Begrenzung basiert auf der maximal aufnehmbaren Bruchenergie bei Schubbeanspruchung [12]. Im Sinne einer robusten Konstruktion wird eine Mindestlänge der Verstärkung über der Ausklinkung angegeben, siehe Abb. 3. Geneigte, stiftförmige Verstärkungselemente können näher an den Ort der Spannungsspitzen herangeführt werden. Zusätzlich besitzen geneigte, stiftförmige Verstärkungselemente das Potential, sowohl Querzug- als auch Schubspannungen abzutragen. Die Tragfähigkeit der verstärkten Ausklinkung darf mit dem Beiwert $k_v = 1,0$ ermittelt werden, d.h. es ist ein Schubspannungsnachweis für den Restquerschnitt mit der Höhe h_{ef} zu führen.

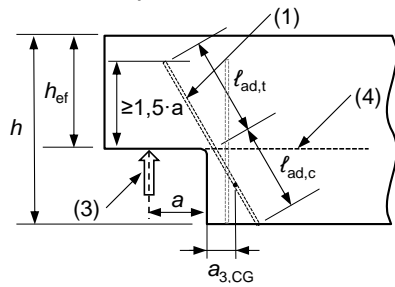


Abbildung 3: Verstärkte Ausklinkung
(1 – geneigtes stiftförmiges Verstärkungselement;
4 – mögliche Risslinie)

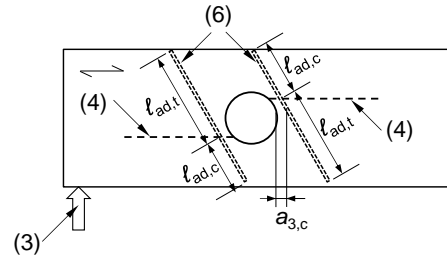


Abbildung 4: Verstärkter Träger mit Durchbruch
(4 – mögliche Risslinie; 6 – geneigte Verstärkung
im Fall von z.B. hohen Schubbeanspruchungen)

4.5. Verstärkung für Durchbrüche bei Biegestäben mit Rechteckquerschnitt

Die Angaben zur Verstärkung von Durchbrüchen lehnen sich eng an die Angaben in [3] an. Dazu gehören die geometrischen Grenzen für Durchbrüche, welche den Angaben in [3] NCI NA.6.8.4 (NA.1) entsprechen, die Formel zur Bestimmung der Beanspruchung in den Verstärkungselementen, $F_{t,90,Ed}$, welche (NA.66) in [3] gleicht sowie die wirksame Fläche von aufgeklebten flächenförmigen Verstärkungselementen, welche (NA.91) und (NA.92) in [3] entspricht. Erweitert wurden diese Regelungen um die Formeln zur Bestimmung der erhöhten Schubspannungen an den Ecken von mit stiftförmigen Verstärkungselementen verstärkten Durchbrüchen [13]:

$$\tau_{\max} = 1,84 \cdot \left[1 + \frac{a}{h} \right] \cdot \left(\frac{h_d}{h} \right)^{0,2} \cdot \frac{1,5 \cdot V_d}{b_{ef} \cdot (h - h_d)} \quad (7)$$

Eine Erläuterung der einzelnen Symbole kann dem Anhang entnommen werden. Im Fall von runden Durchbrüchen darf anstelle von h_d der Wert $0,7 \cdot h_d$ eingesetzt werden. Ist die Formel (7) nicht erfüllt, sollten keine rechtwinklig zur Faser angeordneten, stiftförmigen Verstärkungselemente eingesetzt werden. Grund ist der in Abs. 5.2 diskutierte Sperrereffekt, die im Fall von tiefen Schwindrissen frei werdenden Schubspannungen können von rechtwinklig zur Faser angeordneten, stiftförmigen Verstärkungselementen nur in sehr geringem Masse aufgenommen werden. Abhilfe bieten geneigte Verstärkungselemente. Neuere Untersuchungen belegen, dass eine geneigte Anordnung von Verstärkungselementen im auflagernahen Bereich zu einer deutlichen Steigerung der Tragfähigkeit im Vergleich zur Anordnung rechtwinklig zur Faser führt [14], [15]. Aktuell werden Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Bemessungsgleichungen ((NA.66) in [3]) auf geneigte Verstärkungselemente durchgeführt.

4.6. Querzugverstärkung für Queranschlüsse

Die Angaben zur Querzugverstärkung für Queranschlüsse lehnen sich eng an die Angaben in [3] an. Dazu gehört die Formel zur Bestimmung der Beanspruchung in den Verstärkungselementen, $F_{t,90,Ed}$, welche (NA.69) in [3] gleicht sowie die wirksame Fläche von aufgeklebten flächenförmigen Verstärkungselementen, welche (NA.76) in [3] entspricht. Erweitert wurden diese Regelungen um die Anforderung, dass die Verstärkungselemente

eine effektive Höhe von $0,7 \cdot h$ abdecken sollten, um ein Querzugversagen an der Spitze bzw. am oberen Rand der Verstärkungselemente zu vermeiden, siehe Abb. 5. Sollte diese Grenze nicht eingehalten sein, so ist ein Nachweis des Queranschlusses auf der Höhe der Spitze bzw. des oberen Randes der Verstärkungselemente zu führen.

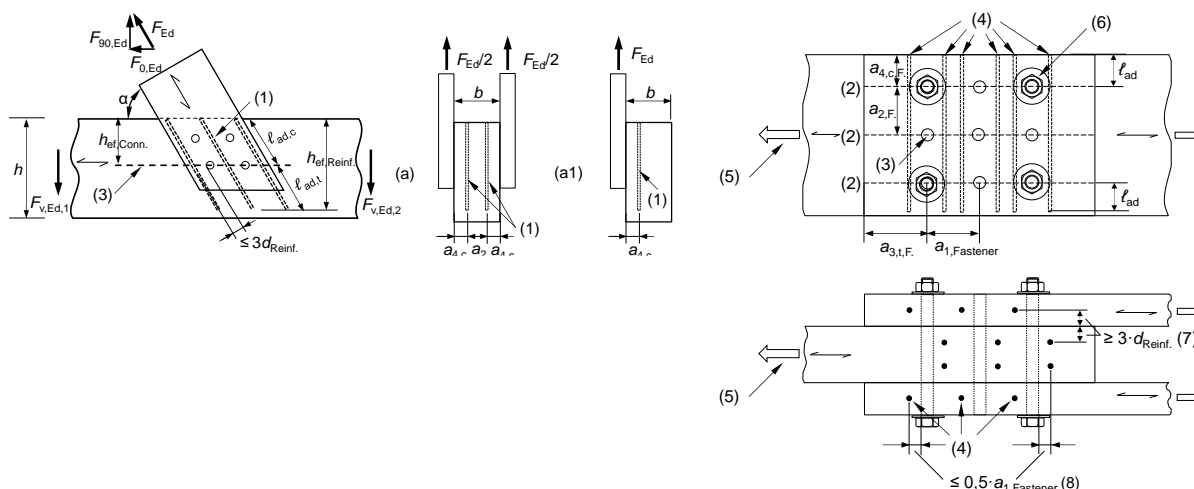


Abbildung 5: Verstärkter Queranschluss
(1 – stiftförmiges Verstärkungselement;
3 – mögliche Risslinie)

Abbildung 6: Verstärkte Stabdübelverbindung
(2 – mögliche Risslinien; 3 – Stabdübel/Bolzen;
4 – stiftförmiges Verstärkungselement;
5 - Richtung der äusseren Last; 6 - Bolzen
zur Reduktion des Exzentrizitätsmomentes;
7 – empfohlen: $3 \cdot d_{\text{Verstärkung}}$; 8 – empfohlen:
 $2 \cdot d_{\text{Verstärkung}}$)

4.7. Verstärkung von Stabdübelverbindungen

Die aus [3] bekannten Angaben zur Verstärkung von Stabdübel- bzw. Bolzenverbindungen mit dem Ziel, die volle Anzahl der stiftförmigen Verbindungsmittel im Nachweis der Verbindung ($n_{\text{ef}} = n$) ansetzen zu können, wurden übernommen und um konstruktive Angaben erweitert, siehe Abbildung 6. Die Zugkraft in der Verstärkung darf unter Ansatz der Beanspruchung auf einen Bolzen/Stabdübel und eine Scherfuge bestimmt werden [16]:

$$F_{t,90,Ek} = 0,3 \cdot F_{v,Rk} \quad (8)$$

Der Nachweis gegen Blockscherversagen gemäss [2], Anhang A, ist auch für verstärkte Stabdübelverbindungen zu führen.

5. Querdruckverstärkungen

5.1. Auflagerverstärkungen

Nicht nur querzugbeanspruchte Bauteile, sondern auch Bereiche konzentrierter Querdruckbeanspruchung, z.B. Auflagerbereiche, müssen aufgrund der geringen Beanspruchbarkeiten rechtwinklig zur Faser häufig verstärkt werden. Im Unterschied zum Nachweis von Querzugverstärkungen darf der Nachweis von Querdruckverstärkungen unter der Annahme eines additiven Zusammenwirkens zwischen dem querdruckbeanspruchten Holzquerschnitt und der druckbeanspruchten Vollgewindeschrauben geführt werden. Diese Annahme trifft zu, wenn eine gewisse plastische Verformung des Holzquerschnitts unter Querdruck akzeptiert wird. Bislang waren zugehörige Bemessungs- und Konstruktionsregeln nur in bauaufsichtlichen Zulassungen (abZ, ETAs) enthalten. Da diese allesamt auf einer Forschungsarbeit [16] beruhen, variieren die Regeln nur geringfügig. Die im Entwurf *Verstärkungen* gegebenen Formeln orientieren sich eng an den Angaben in den bauaufsichtlichen Zulassungen. Der Nachweis der Vollgewindeschrauben auf Druck ergibt sich aus dem Kleinstwert der Beanspruchbarkeit auf Hineindrücken und gegen Knicken der Schraube. Die Tragfähigkeit einer Vollgewindeschraube auf Hineindrücken entspricht

der Tragfähigkeit auf Herausziehen, d.h. diese darf mit dem Ausziehparameter $f_{ax,k}$ ermittelt werden. Des Weiteren ist nachzuweisen, dass die Querdruckbeanspruchbarkeit des unverstärkten Holzes im Bereich der Schraubenspitze ausreichend ist. Für diesen Nachweis ist die aufgrund der Wirkungsweise der Vollgewindeschrauben erweiterte wirksame querdruckbeanspruchte Fläche, $\ell_{ef,2} \cdot b$ zu ermitteln, siehe Abb. 6. Aufgrund des im Vergleich zum Holzquerschnitt in der Auflagerfläche unterschiedlichen Versagens an der Schraubenspitze in Form einer seitlichen Querdehnung des Holzes rechtwinklig zur Faserrichtung (d.h. Querzug), darf beim Nachweis im Bereich der Schraubenspitzen der Erhöhungsbeiwert $k_{c,90}$ nicht in Ansatz gebracht werden.

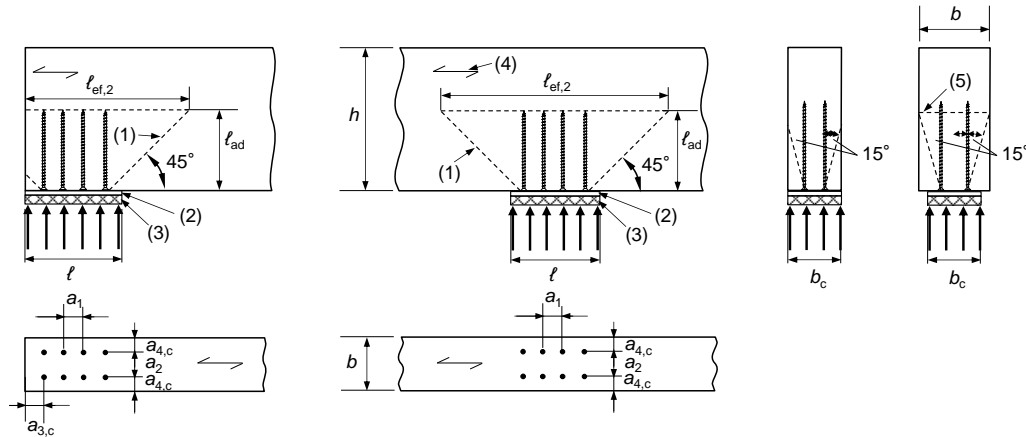


Abbildung 7: Querdruckverstärkung mit Vollgewindeschrauben (1 – Lastausbreitung; 2 – steifes Auflagermaterial, z.B. Stahlplatte; 3 – z.B. Elastomer; 4 – Faserrichtung; 5 – Ebene der voll aktivierten Bauteilbreite).

Die Tragfähigkeit einer verstärkten Auflagerung kann wie folgt berechnet werden:

$$F_{c,90,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} k_{c,90} \cdot b_c \cdot \ell_{ef,1} \cdot f_{c,90,k} \\ + n \cdot \min \{ F_{ax,\alpha,Rk}; F_{b,Rk} \} \\ b \cdot \ell_{ef,2} \cdot f_{c,90,k} \end{array} \right. \quad (9)$$

Eine Erläuterung der einzelnen Symbole ist dem Anhang zu entnehmen.

Die Bestimmung der Tragfähigkeit einer Vollgewindeschraube gegenüber Knicken, $F_{b,Rk}$, wurde gegenüber den Angaben in den abZ/ETAs auf der sicheren Seite vereinfacht [17]:

$$F_{b,Rk} = 1,18 \cdot k_c \cdot N_{pl,k} \quad (10)$$

mit:

$$N_{pl,k} = \pi \cdot \frac{d_1^2}{4} \cdot f_{y,k} \quad (11)$$

Tabelle 2: Abminderungsbeiwert k_c zur Bestimmung der Tragfähigkeit auf Knicken ($\rho_k \geq 350 \text{ kg/m}^3$)

Charakteristische Streckgrenze des Stahls	Winkel α zwischen Schraubenachse und Faserrichtung	
	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 0^\circ$
$f_{y,k} = 1000 \text{ N/mm}^2$	$k_c = 0,60$	$k_c = 0,50$
$f_{y,k} = 800 \text{ N/mm}^2$ (z.B. feuerverzinkter Stahl)	$k_c = 0,65$	$k_c = 0,55$
$f_{y,k} = 500 \text{ N/mm}^2$ (z.B. nichtrostender Stahl)	$k_c = 0,75$	$k_c = 0,65$

Zwischenwerte (Winkel α sowie charakteristische Streckgrenzen) dürfen linear interpoliert werden

Die Vollgewindeschrauben sind rechtwinklig zur Auflagerfläche einzubringen, es sind Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ erlaubt. Um das Zusammenwirken der Vollgewindeschrauben und des Holzes sicherzustellen muss gewährleistet sein, dass die Druckkraft gleichmässig auf alle Vollgewindeschrauben verteilt wird und die Pressung aus den Schraubenköpfen vom Auflagermaterial aufgenommen werden kann. Diese beiden Anforderungen können nur durch ein steifes, ebenes Auflagermaterial erfüllt werden, zumeist realisiert über eine Stahlplatte mit ausreichender Dicke. Die Dicke der Stahlplatte kann überschlägig bestimmt werden zu:

$$t \geq \max \left(5, 0; 1, 45 \cdot \sqrt{\frac{F_{c,\alpha,Ed}}{f_{y,d}}} \right) \quad (12)$$

Bei Trägerauflagern wird zudem oft ein Elastomer unter der Stahlplatte angeordnet, um die Verdrehbarkeit des Auflagers und die gleichmässige Lasteinleitung zu gewährleisten.

Die Vollgewindeschrauben müssen gleichmässig über die Auflagerfläche verteilt sein. Die Schraubenköpfe sind so einzudrehen, dass die Oberkante der Schraubenköpfe bündig mit der Holzoberfläche ist. Die Abstandsregelungen entsprechen denen für zugbeanspruchte Vollgewindeschrauben. Eine Abminderung auf eine effektiv wirksame Anzahl an Vollgewindeschrauben, n_{ef} , ist nicht notwendig.

Beim Schubnachweis von Bauteilen mit Auflagerverstärkungen sollte von der Anwendung einer abgeminderten Querkraft (6.1.7 (3) in [2]) abgesehen werden. Grund ist, dass der Schub nicht von der Auflagerplatte, sondern von den Schraubenspitzen angezogen wird. Die Schubspannungen am Auflagerrand sind – im Vergleich zum unverstärkten Auflager – höher, die positive Interaktion zwischen Querdruckspannungen und Schubfestigkeit stellt sich aufgrund der Querdruckverstärkung nicht ein.

5.2. Querdruckverstärkungen zur Lastdurchleitung

Allgemeines

Eine erweiterte Anwendung von Querdruckverstärkungen im Hinblick auf die Durchleitung von Querdruckspannungen durch Bauteile wurde zuerst im Rahmen vorgespannter Rahmenkonstruktionen untersucht [18]. Anschliessend fand diese Anwendung Eingang in eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung [19]. Die Vollgewindeschrauben (VGS) werden mit einer Übergreifungslänge ausgeführt, welche die Übertragung der Druckkräfte von den Vollgewindeschrauben, eingebracht von der Trägeroberseite, zu den gegenüberliegenden Vollgewindeschrauben, eingebracht von der Trägerunterseite, sicherstellen soll. Wird diese Lastübertragung erreicht, darf auf den Nachweis der Querdruckspannungen an den Schraubenspitzen (unterer Term in Gl. (9)) verzichtet werden. Ein potenzieller Markt für diese Anwendung liegt z.B. im mehrgeschossigen Holzbau.

Vor Aufnahme in den Entwurf *Verstärkungen* waren ein paar Detailfragen zu lösen, z.B. nach der minimalen Übergreifungslänge, dem minimalen Abstand zwischen den Schraubenspitzen und der gegenüberliegenden Auflagerfläche sowie der bestmöglichen Anordnung der beiden gegenüberliegenden Schraubengruppen. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der hierzu durchgeführten Untersuchungen vorgestellt. Für eine umfassende Darstellung der Ergebnisse wird auf [20] und [21] verwiesen.

Numerische Untersuchungen

Sowohl für die numerischen als auch die folgenden experimentellen Untersuchungen wurde eine Prüfkörperhöhe von $40 \cdot d$ gewählt, da diese Übergreifungslängen $0 \leq l_{lap} \leq 20 \cdot d$ bei gleichzeitig verbleibendem Abstand zwischen den Schraubenspitzen und der gegenüberliegenden Auflagerfläche $10 \cdot d \leq l_{tc} \leq 20 \cdot d$ ermöglichte. Die zugehörigen numerischen Untersuchungen (linear-elastisch) ergaben die homogensten Verformungen für $l_{lap} = 10 \cdot d$. Eine weitere Erhöhung der Übergreifungslänge l_{lap} bei ansonsten gleichbleibender Geometrie verschiebt den Ort der maximalen Querdruckspannungen in Richtung der Auflagerflächen, die Druckkräfte in den Vollgewindeschrauben steigern sich nur noch marginal. Eine gleichzeitige Erhöhung beider Längen l_{tc} und l_{lap} ergab keine weiteren Erkenntnisse, da in diesem Fall die Knicktragfähigkeit der Vollgewindeschrauben zur

limitierenden Grösse wird. Aufgrund des Gruppeneffektes zwischen Holz und Schraubengruppe sind die Druckspannungen in den aussenliegenden Vollgewindeschrauben um bis zu 25 % höher als die Druckspannungen der innenliegenden Vollgewindeschrauben.

Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden 7 verschiedenen Konfigurationen mit insgesamt 32 Prüfkörpern geprüft. Die erste Konfiguration (zu Vergleichszwecken) repräsentierte ein unverstärktes Mittelauflager. Konfigurationen 2 – 5 bildeten verstärkte Mittelauflager ab mit Übergreifungslängen $l_{lap} = \{5 \cdot d, 10 \cdot d, 15 \cdot d, 20 \cdot d\}$, vier VGS von oben, 6 VGS von unten, siehe Abb. 8 (a). Konfiguration 6 wurde mit einer abwechselnden Anordnung von je fünf VGS von oben und unten ausgeführt ($l_{lap} = 10 \cdot d$), siehe Abb. 8 (b). Die letzte Konfiguration stellte ein Endauflager dar ($l_{lap} = 10 \cdot d$), siehe Abb. 8 (c). Der Durchmesser der VGS wurde zu $d = 8 \text{ mm}$ gewählt. Die resultierenden Abmessungen der Prüfkörper (GL24h, $\rho_{mean} = 444 \text{ kg}$, $u_{mean} = 10,9 \%$) waren $l / h / b = 600/320/100 \text{ mm}^2$, die Auflagerfläche betrug $l / b = 200/100 \text{ mm}^2$.

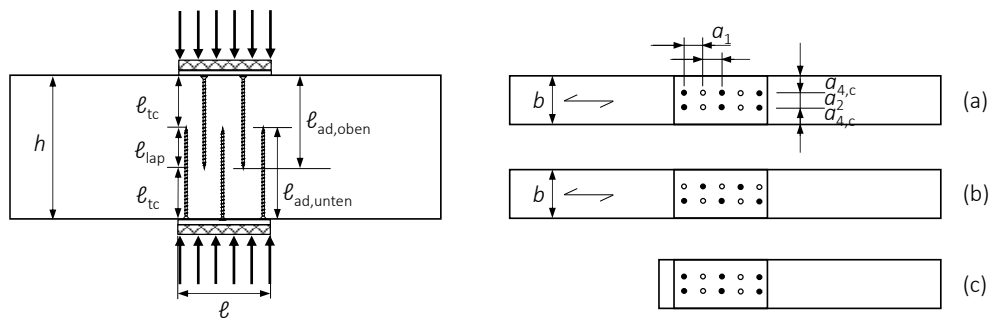


Abbildung 8: Querdruckverstärkungen zur Lastdurchleitung - Prüfkörperkonfiguration

Während der Versuche stieg die Last-Verformungskurve zunächst linear an. Anschliessend reduzierte sich ihre Steigung bis zum Erreichen der Höchstlast, gefolgt von leicht abnehmender Last bei zunehmender Verformung. Diese Phase war gekennzeichnet durch das Zusammendrücken der Holzfasern bei gleichzeitigem Versagen der Vollgewindeschrauben (zumeist auf Knicken).

Abb. 9 verdeutlicht die beträchtliche Steigerung der Tragfähigkeit und Steifigkeit der verstärkten Prüfkörper im Vergleich zur unverstärkten Konfiguration. Die Mittelwerte und charakteristischen Werte zeigen einen leichten Anstieg zwischen $l_{lap} = 5 \cdot d$ und $10 \cdot d$, gefolgt von einer leichten Reduktion für $l_{lap} = 15 \cdot d$ und $20 \cdot d$ bei gleichzeitig zunehmender Streuung der Werte. Die besten Ergebnisse zeigt die Konfiguration mit alternativer Schraubenanordnung (Abb. 8 (b); 7 % höhere Mittelwerte bei sehr geringer Streuung). Die mittleren Tragfähigkeiten der besten verstärkten Konfigurationen ($l_{lap} = 10 \cdot d$) liegen 119 % bzw. resp. 135 % über dem Mittelwert der unverstärkten Konfiguration, siehe Abb. 9. Die mittlere Tragfähigkeit der verstärkten Endauflager liegt 23 % unter den Werten für das vergleichbare Mittelauflager.

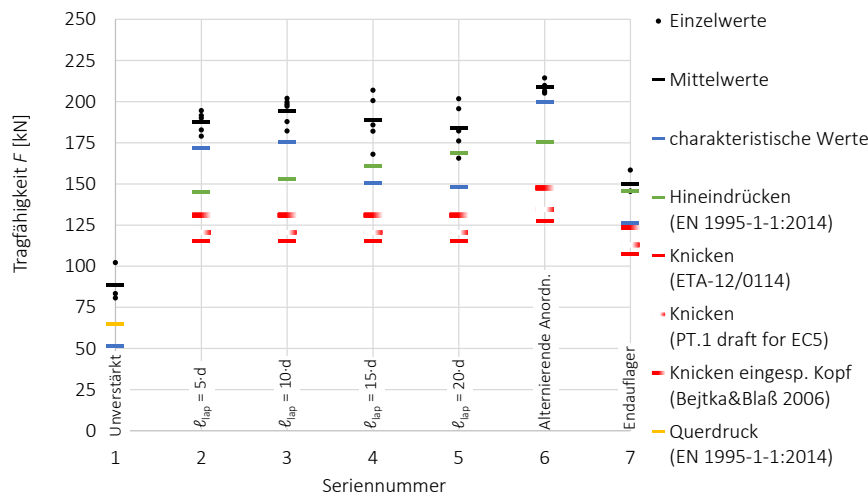


Abbildung 9: Experimentell ermittelte Tragfähigkeiten im Vergleich mit Bemessungsansätzen

Der Grossteil der Prüfkörper versagte durch Ausknicken der Vollgewindeschrauben senkrecht zur Faser in Richtung der näheren Seitenfläche des Prüfkörpers. Dies entspricht den mit den Bemessungsansätzen ermittelten Beziehungen. Nur die verstärkten Endauflager zeigten ein Spaltversagen aufgrund der horizontalen Ausdehnung des Holzes oberhalb der Schraubenspitzen. Ein Vergleich mit verfügbaren Bemessungsansätzen zeigt, dass alle Versuchsergebnisse über den mittels Bemessungsansätzen ermittelten Beanspruchbarkeiten liegen.

Ein Vergleich der Versuchsreihen 3 - 5 zeigt leicht abnehmende Tragfähigkeiten (mit zunehmender Streuung) bei abnehmendem Abstand zwischen den Schraubenspitzen und der gegenüberliegenden Auflagerfläche $l_{tc} = \{15 \cdot d, 12,5 \cdot d, 10 \cdot d\}$. Die numerischen Berechnungen sowie die Verformungsmessungen an den Prüfkörpern zeigten, dass eine Reduktion des Abstandes l_{tc} zu einer Konzentration der Verformungen in diesem Bereich und damit zu erhöhten Querdruckspannungen zwischen den Schraubenspitzen und der gegenüberliegenden Auflagerfläche führt. Querdruckspannungen führen zu einer horizontalen Ausdehnung des Holzes. Diese wiederum reduziert die elastische Bettung der Schrauben im Holz und damit die Tragfähigkeit auf Knicken im Bereich der höchsten Druckbeanspruchung in der Schraube. Die Versuchsergebnisse in Kombination mit den numerischen Ergebnissen zeigen, dass der Abstand zwischen den Schraubenspitzen und der gegenüberliegenden Auflagerfläche $l_{tc} \geq 15 \cdot d$ betragen sollte.

Der effektive Elastizitätsmodul $E_{90,tot,ef}$ der verstärkten Konfigurationen war im Vergleich zur unverstärkten Konfiguration mindestens verdoppelt ($800 \leq E_{90,tot,ef} \leq 1050$). Die mit dem in [16] beschriebenen Modell errechneten Steifigkeitswerte liegen durchschnittlich 15 % unter den experimentell ermittelten Werten $E_{90,tot,mean}$.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen für die Praxis

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass selbstbohrende Vollgewindeschrauben, von gegenüberliegenden Trägerseiten eingebracht und mit einer Übergreifung im Bereich der Schraubenspitzen ausgeführt, eine effiziente Lösung zur Durchleitung hoher Lasten quer zur Faser darstellen. Die im Versuch geprüften Konfigurationen weisen im Vergleich zur unverstärkten Variante mindestens doppelte Tragfähigkeiten und Steifigkeiten auf. Im Hinblick auf ein zuverlässiges Verhalten dieses Details sollten folgende Randbedingungen eingehalten werden:

- Die gegenüberliegenden Auflagerflächen sollten axialsymmetrisch angeordnet sein;
- Die Vollgewindeschrauben sollten gleichmässig und symmetrisch zur Auflagerfläche angeordnet sein;
- Die Übergreifungslänge sollte mindestens $l_{ap} = 10 \cdot d$ betragen;
- Der Abstand zwischen den Schraubenspitzen und der gegenüberliegenden Auflagerfläche sollte mindestens $l_{tc} = 15 \cdot d$ betragen. Geringere Abstände l_{tc} führen zu geringeren Tragfähigkeiten;
- Im Bereich der Übergreifung sollten die Vollgewindeschrauben unter Verwendung der Mindestabstände angeordnet werden;
- Eine alternierende Anordnung der Vollgewindeschrauben (alternative Anordnung in Abb. 9) führt zur höchsten Verbesserung der Tragfähigkeit und Steifigkeit;
- Eine Variation des Schraubendurchmessers zeigte nur einen geringen Einfluss auf die beschriebenen Beziehungen. Angesichts fehlender experimenteller Daten für Schrauben mit grossem Durchmesser wird jedoch empfohlen, die Anwendung dieses Details auf Vollgewindeschrauben mit $d \leq 12$ mm zu beschränken.

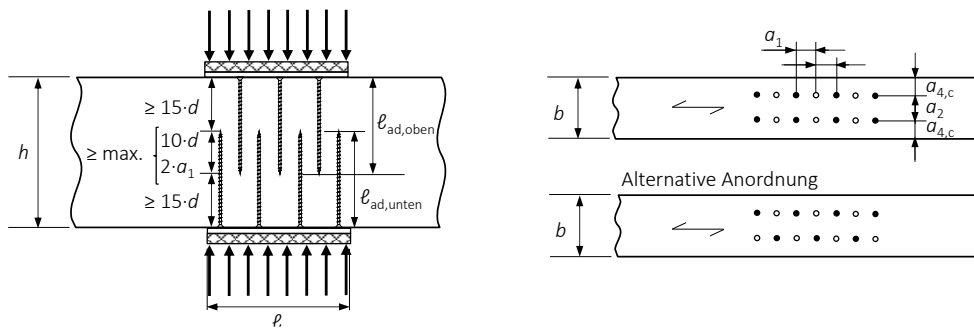


Abbildung 10: Querdrukverstärkungen zur Lastdurchleitung – Normvorschlag

Im Vergleich zu den Versuchen liegen die Knicklasten, die sich aus den aktuellen ETAs und Normentwürfen ableiten lassen, weit auf der sicheren Seite. Um höhere Knicktragfähigkeiten für diese Art von verstärkten Details zu ermöglichen wird empfohlen, die Tragfähigkeit von Vollgewindeschrauben im Holz weiter zu untersuchen. Bei verstärkten Endauflagern könnten in die Seitenflächen oberhalb der Schraubenspitzen eingebrachte Vollgewindeschrauben eine Verstärkung gegenüber einem vorzeitigem Spaltversagen des Holzes darstellen.

6. Danksagung

Der Entwurf *Verstärkungen* wurde in Zusammenarbeit zwischen dem Autor und Dipl.-Ing. Alfons Brunauer, Wiehag AG (1963-2018) erstellt. Der Autor dankt Ass.-Prof. Dr.-Ing. Robert Jockwer, Dr.-Ing. Tobias Wiegand und Harald Liven für Ihre Beiträge im Rahmen der Arbeit der WG 7. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Blass und Dr.-Ing. Ireneusz Bejtka sei gedankt für die wertvollen Hinweise zu den Querdrukverstärkungen. Herrn Sebastian Rodemeier, MSc. gebührt Dank für seine aufschlussreichen Untersuchungen zu den beidseitigen Querdrukverstärkungen.

7. Literatur

- [1] Dietsch, P.; Brandner, R. (2015): Self-tapping screws and threaded rods as reinforcement for structural timber elements – A state-of-the-art report. *Construction and Building Materials*, Vol. 97, S. 78-89.
- [2] EN 1995-1-1:2004; Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, + AC (2006) + A1 (2008) + A2 (2014). CEN European committee for standardization, Brüssel, Belgien.
- [3] DIN EN 1995-1-1/NA:2013; Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Holzbau. DIN, Berlin.
- [4] ÖNORM B 1995-1-1:2015-06, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau - Nationale Festlegungen zur Umsetzung der ÖNORM EN 1995-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen. ASI Austrian Standards International.
- [5] Dietsch, P., Winter, S. (2012): Eurocode 5 - Future Developments towards a more comprehensive code on timber structures. *Structural Engineering International*, Vol. 22, H. 2, S. 223-231.
- [6] CEN/TC 250 N1239 (2014): Position paper on enhancing ease of use of the Structural Eurocodes. CEN/TC 250 Document N1239, Brüssel, Belgien.
- [7] Kleinhenz, M., Winter, S., Dietsch, P. (2016): Eurocode 5 – a halftime summary of the revision process, in: *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering WCTE 2016*, Wien, Österreich.

- [8] Dietsch, P. (2019): Reinforcement of Timber Structures – Standardization towards a new section for EC 5. Proceedings of the 5th International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures SHATIS, Guimarães, Portugal.
- [9] Dietsch, P. (2017): Effect of reinforcement on shrinkage stresses in timber members. Construction and Building Materials, Vol. 150, S. 903–91.
- [10] Gamper, A., Dietsch, P., Merk, M., Winter, S. (2014): Gebäudeklima – Auswirkungen auf Konstruktion und Dauerhaftigkeit von Holzbauwerken, in: Görlacher, R. (Hrsg.): Karlsruher Tage: Holzbau – Forschung für die Praxis, KIT Scientific Publishing, ISBN 978-3-7315-0267-8.
- [11] BVPI (2013): Spannungsnachweise bei Satteldachträgern aus Brettschichtholz. Technische Mitteilung 06 / 011 der Bundesvereinigung der Prüfeningenieure für Bautechnik e.V., Berlin.
- [12] Jockwer, R. (2014): Structural behaviour of glued laminated timber beams with unreinforced and reinforced notches. Dissertation, IBK Bericht Nr. 365, ETH Zürich.
- [13] Blass, H.J., Ehlbeck, J., Kreuzinger, H., Steck, G. (2004): Erläuterungen zu DIN 1052:2004-08, Bruderverlag, Karlsruhe.
- [14] Danzer, M., Dietsch, P., Winter, S. (2016): Einfluss exzentrisch positionierter runder Einzeldurchbrüche und Gruppen von Durchbrüchen auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern. Schlussbericht zu IGF-Vorhaben 18048 N, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.
- [15] Dröscher, J., Schickhofer, G., Augustin, M. (2016): Durchbrüche in Tragstrukturen aus BSH und BSP. Forschungsbericht, holz.bau Forschungs GmbH, Graz.
- [16] Bejtka, I. (2005): Verstärkung von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben. Dissertation, Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau 2, Universitätsverlag Karlsruhe.
- [17] Jockwer, R. (2016): Simplification of the design approach for buckling failure of reinforcement in compression, Kurzbericht, ETH Zurich.
- [18] Watson, C.P., van Berschoten, W., Smith, T., Pampanin, S., Buchanan, A.H., Stiffness of screw reinforced LVL in compression perpendicular to the grain (2013): CIB-W18 / 46-12-4, Proceedings of the international council for research and innovation in building and construction, Working commission W18 - timber structures, Meeting 47, Vancouver.
- [19] Z-9.1-519:2014: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, SPAX-S Schrauben mit Vollgewinde als Holzverbindungsmittel, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin.
- [20] Dietsch, P., Rodemeier, S., Blass, H.J. (2019): Transmission of Perpendicular to Grain Forces Using Self-tapping Screws, INTER / 52 - 7 - 10, International Network on Timber Engineering Research INTER, Meeting 6, Tacoma, USA.
- [21] Rodemeier, S. (2019): Querdruckverstärkung von Holzbauteilen bei beidseitiger Druckkrafteinleitung, Master's thesis, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.

8. Anhang – Symbole

- a* Abstand; Länge eines Durchbruchs;
- b_c* Kontaktbreite, siehe Abb. 7;
- b_r* Breite des flächenförmigen Verstärkungselements;
- d* Durchmesser; Aussendurchmesser der Vollgewindeschraube oder Gewindestange/Gewindebolzen/Betonstabstahl ($d \leq 20$ mm);
- d₁* Innendurchmesser des Gewindes;
- f_{ax,d}* Bemessungswert der Ausziehfestigkeit der Vollgewindeschraube/Gewindestange mit Holzschraubengewinde;

- $f_{b1,d}; f_{b2,d}$ Bemessungswert der Festigkeitskennwerte für Klebfugen;
- $f_{t,d}$ Bemessungswert der Zugfestigkeit der flächenförmigen Verstärkung in Richtung der Zugkraft $F_{t,90,Ed}$;
- $f_{tens,d}$ Bemessungswiderstand auf Zug der Vollgewindeschraube/Gewindestange mit Holzschraubengewinde;
- $f_{ub,d}$ Bemessungswert der Bruchfestigkeit des Gewindebolzens/Betonstabstahls (mit γ_{M2} nach EN 1993-1-8 beziehungsweise γ_S nach EN 1992-1-1).
- $f_{yb,d}$ Bemessungswert der Streckgrenze des Gewindebolzens/Betonstabstahls (mit γ_{M2} nach EN 1993-1-8 beziehungsweise γ_S nach EN 1992-1-1).
- $f_{y,k}$ charakteristische Streckgrenze der Vollgewindeschraube;
- $f_{y,d}$ Bemessungswert der Streckgrenze der Stahlplatte, in N/mm^2 (ermittelt mit γ_{M0} nach EN 1993-1-1, 6.1).
- h_{ap} Höhe des Firstbereichs;
- h_d Durchbruchshöhe;
- h_{ef} wirksame Höhe;
- $h_{rl(ru)}$ Abstand zwischen unterem (oberen) Durchbruchrand und unterem (oberen) Trägerrand;
- l_{ad} wirksame Verankerungslänge; eingeklebte Länge; wirksame Höhe der aufgeklebten flächenförmigen Verstärkung;
- $l_{ad,t/c}$ wirksame Verankerungslänge oberhalb oder unterhalb der Bruchlinie;
- l_{dis} Verteilungslänge;
- $l_{ef,1}$ wirksame Kontaktlänge in Faserrichtung, siehe [2] [6.1.5.1(1)], siehe Abb. 7;
- $l_{ef,2}$ wirksame Verteilungslänge in Faserrichtung in der Ebene der Schraubenspitze, siehe Abb. 7;
- $n = n_0 \cdot n_{90}$ Anzahl der Verstärkungselemente (Vollgewindeschrauben oder Gewindestangen), siehe Abb. 7;
- n_r Anzahl der Verstärkungselemente;
- t Dicke (der Stahlplatte, in mm);
- t_r Dicke des flächenförmigen Verstärkungselements;
- A Bruttoquerschnittsfläche der Gewindebolzen oder Betonstabstähle (siehe EN 1993-1-8);
- A_s Spannungsquerschnittsfläche der Gewindebolzen oder Betonstabstähle (siehe EN 1993-1-8);
- $F_{ax,\alpha,Rk}$ charakteristische Tragfähigkeit auf Heraus ziehen einer Vollgewindeschraube unter einem Winkel α zur Faserrichtung nach [2] [8.7.2] oder ETA;
- $F_{b,Rk}$ charakteristische Tragfähigkeit einer Vollgewindeschraube gegen Knicken;
- $F_{c,\alpha,Ed}$ Bemessungswert der Druckkraft in einer Vollgewindeschraube oder Gewindestange, in N;
- $F_{t,90,Rd}$ Bemessungswert der Zugfestigkeit des stiftförmigen oder flächenförmigen Verstärkungselements;