

Bemessung von Durchbrüchen – erweiterte Möglichkeiten mit dem neuen Eurocode 5

Philipp Dietsch
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Karlsruhe, Deutschland



Martin Danzer
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Technische Universität München
München, Deutschland



Bemessung von Durchbrüchen – erweiterte Möglichkeiten mit dem neuen Eurocode 5

1. Einleitung

Architektonische Gründe oder auch nutzerspezifische Anforderungen an das verfügbare Lichtraumprofil führen häufig dazu, dass Leitungen für Zu-/Abwasser, Lüftung, Heizung etc. in der Ebene der Tragkonstruktion angeordnet werden. Infolgedessen sind in den Trägern Durchbrüche erforderlich, welche das Tragverhalten deutlich beeinflussen. Hinsichtlich der Bemessung derartiger Durchbrüche existieren derzeit auf europäischer Ebene im Eurocode 5 [1] keine normativen Bemessungsregeln. Einzelne Mitgliedsstaaten bieten zwar in den Nationalen Anhängen Bemessungs- und Konstruktionsregeln in Form nicht widersprechender, ergänzender Regelungen (NCI) an, jedoch führen diese Regelungen wie im Fall der Nationalen Anhänge von Deutschland [2] und Österreich [3] zu nicht unerheblichen Einschränkungen hinsichtlich der Größe und der Positionierung der Durchbrüche. So sind unverstärkte Durchbrüche nur bis zu einer Größe von $0,15h$ zulässig, Anordnungen von Durchbrüchen in Gruppen ($l_z < 1,5h$) bislang nicht zulässig. Auch eine exzentrische Anordnung ist bisher nur in sehr begrenztem Maße zulässig ($h_{ro(ru)} \geq 0,35h$). Um die offensichtliche Lücke im Eurocode 5 zu schließen, wurde das Thema *Durchbrüche* auf der Liste der Arbeitspakete als vorrangig eingestuft [4]. Die allgemein anerkannten Ergebnisse jüngerer Forschungsarbeiten erlauben die Erweiterung der bislang bekannten Regeln auf größere Durchmesser, um exzentrisch angeordnete Durchbrüche und die Anordnung von Durchbrüchen in Gruppen.

2. Hintergründe

Der Entwurf der Abschnitte *Durchbrüche* und *Verstärkte Durchbrüche* für den neuen Eurocode 5 lag in der Verantwortung der europäischen Arbeitsgruppe CEN/TC 250/SC 5/WG 7 *Reinforcement*. Unterstützt wurde die Arbeit durch zwei sog. Project Teams (PTs), PT SC5.T1 *CLT + Reinforcement* und PT SC5.T3 *Cluster EC5*. Neben dem Normentext incl. Zeichnungen hatte die WG7 mit Unterstützung der Project Teams ein Hintergrunddokument zu erarbeiten, welches die technischen Begründungen und wissenschaftlichen Hintergründe für den vorgeschlagenen Normentext beschreibt. Während der Bearbeitungsphase durchlief der Entwurf vier Phasen der Kommentierung seitens der nationalen Normenausschüsse. Bis Ende des Jahres 2023 liegen die Abschnitte *Durchbrüche* und *Verstärkte Durchbrüche* als Teil des Gelbdrucks des neuen Eurocode 5, prEN1995-1-1:2023 [5], der Fachöffentlichkeit zur Kommentierung vor [6].

Im Folgenden werden die wichtigsten Inhalte und Hintergründe zu Entwurf und Bemessung von Durchbrüchen im Gelbdruck des EC 5 vorgestellt. Auch der Entwurf und die Bemessung von Verstärkungen für Durchbrüche werden kurz behandelt, für eine umfassendere Erläuterung zu Entwurf und Bemessung von Verstärkungen im neuen Eurocode 5 wird auf den gleichlautenden Beitrag zum IHF 2019 verwiesen [7].

Für das Verständnis der Normangaben relevante Hintergrundinformationen werden zur besseren Nachvollziehbarkeit im Fließtext kursiv dargestellt.

3. Entwurf von Durchbrüchen nach prEN1995-1-1

Der aktuell zur Kommentierung durch die Fachöffentlichkeit vorliegende Entwurf des neuen Eurocode 5, prEN1995-1-1:2023 [5] enthält folgende Angaben und Randbedingungen zum normgemäßen Entwurf von Durchbrüchen.

Durchbrüche in Bauteilen mit einer Abmessung größer oder gleich $\min\{50\text{ mm}, 0,1h\}$ sind entsprechend dieses Abschnittes nachzuweisen. *Diese Grenzwerte sind nationalen Regeln [2], [3] entnommen.* Der Nachweis von Längs- oder Biegespannungen ist auf Basis des Nettoquerschnitts an der Position des Durchbruchs zu führen. Bei rechteckigen Durchbrüchen ist die Auswirkung zusätzlicher Biegespannungen aufgrund der Rahmenwirkung zu berücksichtigen. Im Nachweis der Schubspannungen ist die Auswirkung von Spannungskonzentrationen an den Rändern des Durchbruchs zu berücksichtigen. Ohne genaueren Nachweis sollten keine Durchbrüche mit einer Abmessung größer oder gleich $\min\{50\text{ mm}; 0,1h\}$ in unverstärkten Bereichen von Bauteilen mit planmäßigen last- oder geometriebedingten Querkzugspannungen angeordnet werden (z.B. gekrümmte Träger).

Kreisförmige Durchbrüche sollten gegenüber rechteckigen Durchbrüchen bevorzugt werden. Durchbrüche sollten vorzugsweise so angeordnet werden, dass sich ihr Schwerpunkt auf der neutralen Achse des Bauteils befindet. Eine exzentrische Anordnung sollte nur bei kreisförmigen Durchbrüchen angewendet werden. Bei einer exzentrischen Anordnung sollte eine Anordnung des Durchbruchs in biegedruckbeanspruchten Bereichen gegenüber einer Anordnung in biegezugbeanspruchten Bereichen bevorzugt werden. Die maximal mögliche Exzentrizität ist durch die Werte h_{ru} und h_{rl} (siehe Tabelle 1 und Abbildung 1) begrenzt, siehe auch Abbildung 1.

Der Einfluss von Gebäudetechnik (z.B. Heizungsrohren oder Lüftungsauslässen) auf die lokale Holzfeuchte der Bauteile (z.B. schnelles und/oder intensives Austrocknen) sollte berücksichtigt werden. Die Verstärkung von Durchbrüchen führt zu einem robusteren Langzeitverhalten, insbesondere bei großen Bauteilabmessungen und/oder erwarteten größeren Änderungen der Holzfeuchte.

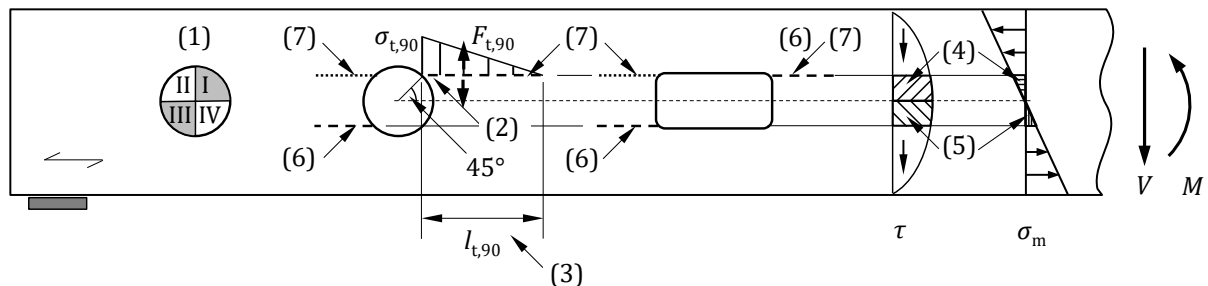


Abbildung 1: Durchbrüche in biegebeanspruchten Bauteilen

Legende

1 Durchbruch in Bauteil, kann in Quadranten I-IV unterteilt werden; der Quadrant mit der möglichen Rissentwicklung ist von der Art der Belastung und der Lage im Bauteil abhängig

2 mögliche Risslinie, (vereinfachte) Verteilung der Querkzugspannungen $\sigma_{t,90}$ und Querzugkraft $F_{t,90}$

3 Verteilungslänge (der Querkzugspannungen)

4 Anteil der über den oberen Restquerschnitt zu übertragenden Schub- und Biegespannungen

5 Anteil der über den unteren Restquerschnitt zu übertragenden Schub- und Biegespannungen

6 mögliche Risslinie an Positionen mit hohen Schubspannungen ($F_{t,90,V,Ed} \geq F_{t,90,M,Ed}$)

7 mögliche Risslinie an Positionen mit überwiegenden Biegespannungen ($F_{t,90,M,Ed} \gg F_{t,90,V,Ed}$)

Versuche an Biegeträgern aus BSH mit kreisförmigen, exzentrisch angeordneten Durchbrüchen ergaben höhere Beanspruchbarkeiten für Träger mit in der Biegedruckzone angeordneten Durchbrüchen, verglichen mit Trägern mit in der Biegezugzone angeordneten Durchbrüchen [8]. In Verbindung mit dem spröden Versagensmechanismus auf Biegezug ergibt sich o.g. Empfehlung der Anordnung. Durch Durchbrüche in Bauteilen verlaufende Installationen können einen erheblichen Einfluss auf die örtliche relative Luftfeuchtigkeit haben, siehe z.B. [9]. Darüber hinaus liegt in Durchbrüchen ungeschütztes Hirnholz vor, wodurch signifikante Überlagerungen von feuchteinduzierten Querkzugspannungen mit last- und geometrieabhängigen Querkzugspannungen auftreten können.

Die im folgenden Abschnitt gegebenen Bemessungsregeln gelten für Durchbrüche mit geometrischen Randbedingungen gemäß Tabelle 1 in biegebeanspruchten Bauteilen aus den Nadelholzprodukten Balkenschichtholz (GST), (blockverklebtes) Brettschichtholz (GL, BGL) und Furnierschichtholz mit parallelen Furnierlagen (LVL-P, GLVL-P). Hochkant biegebeanspruchtes Nadel-Furnierschichtholz mit Querlagen (LVL-C, GLVL-C) sollten entsprechend dem Abschnitt *Verstärkung von Durchbrüchen* bemessen werden. Durchbrüche in Nadelholzbauteilen aus festigkeitssortiertem Bauholz (ST) und keilgezinktem Vollholz (FST) sind zu verstärken.

Die Einschränkung der anwendbaren Holzprodukte beruht auf der Notwendigkeit, Schwind- und Quellschwindspannungen (einschließlich potenzieller Rissbildung) um Durchbrüche zu reduzieren, sowie auf den vergleichsweise großen, nach den Sortierregeln für Vollholz, zulässigen Risstiefen. Die Mindestabstände und maximalen Abmessungen von Durchbrüchen basieren auf [2], beschrieben in [10] und [11]. Der Grund für die erhöhten zulässigen Größen verstärkter Durchbrüche im Vergleich zu unverstärkten Durchbrüchen ist die Tatsache, dass die Verstärkung zu einer erhöhten Robustheit von Bauteilen mit Durchbrüchen führt, da sie eine zweite Barriere gegen spröde Versagensmechanismen wie Schub- und Querkzugversagen darstellt. Die größeren zulässigen Abmessungen von Durchbrüchen mit außenliegenden, flächenförmigen Verstärkungen ergeben sich aus der gleichmäßigeren Übertragung von Spannungen um den Durchbruch herum. Die Sperrwirkung von Verstärkungselementen bei einem Heruntertrocknen des Bauteils in dauerhaft trockenem Klima kann zu einer Reduzierung der Schubbeanspruchbarkeit führen, in diesem Fall sollte der Abstand zwischen dem Durchbruch und dem Trägerende vergrößert werden. Die Erweiterung der zulässigen Abmessungen sowie Reduktion der Mindestabstände basiert auf experimentellen und numerischen Untersuchungen in [8]. Grund für die Begrenzung der Exzentrizität von Durchbrüchen sind die konzentrierten Längsspannungen an den oberen und unteren Durchbruchrändern aufgrund der Umleitung von Biegespannungen um den Durchbruch. Nach [8] können diese Spannungen um ein Vielfaches höher sein als die Biegespannungen am Trägerrand. Allerdings treten diese Spannungen nur lokal begrenzt auf, sodass ein positiver Volumeneffekt die Wirkung der Spannungskonzentrationen an den Durchbruchrändern teilweise kompensiert. Die Anforderung, die Ecken rechteckiger Durchbrüche mit gegebenen Radien auszurunden, ergibt sich aus der Notwendigkeit der Verteilung der Schubspannungen, um den Nachweis der erhöhten Schubspannungen zu ermöglichen.

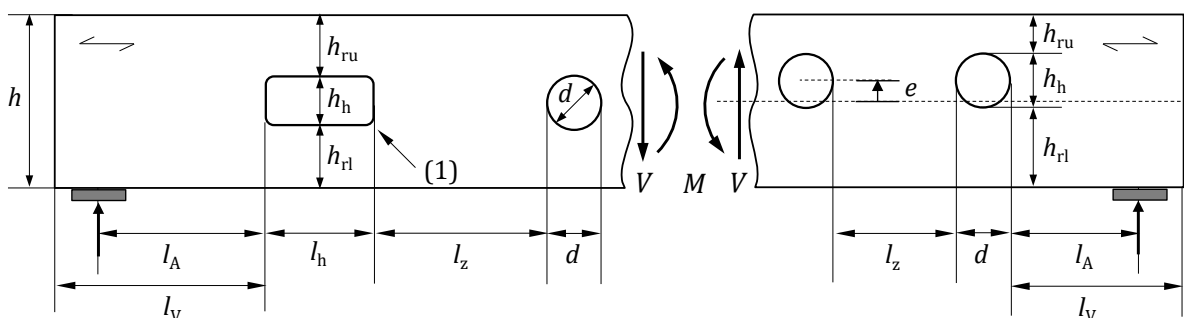


Abbildung 2: Kreisförmige und rechteckige Durchbrüche in biegebeanspruchten Bauteilen

Legende

- 1 abgerundete Ecken: Ausrundungsradius $r \geq 20$ mm, wenn $h_h \leq 200$ mm
Ausrundungsradius $r \geq 40$ mm, wenn $h_h > 200$ mm

Tabelle 1: Mindestabstände und maximale Abmessungen von unverstärkten und verstärkten Durchbrüchen in Bauteilen mit rechteckigem Querschnitt ^a

	Mindestabstände				Maximale Abmessungen		
	Ende	Abstand	Auflager	Ränder	Rechteckige Durchbrüche		Kreisförmige Durchbrüche
Unverstärkt	$l_v \geq h^b$	Einzelner Durchbruch: $l_z \geq 1,5 h$, mindestens 300 mm	$l_A \geq h/2$	$h_{ru} \geq 0,15 h^d$ mindestens eine Lamelle ^e $h_{rl} \geq 0,2 h^d$ mindestens 1,5 Lamellen ^e	$l_v/h_h \leq 2,5$ $l_h \leq 0,5h$	$h_h \leq 0,2h$	für $e \leq \pm 0,1h$: $d \leq 0,3h$ für $e > \pm 0,1h$: $d \leq 0,2h$
		Gruppe kreisförmiger Durchbrüche: $l_z \geq d^c$					
Verstärkt	$l_v \geq h^b$	Einzelner Durchbruch: $l_z \geq 1,0 h$, mindestens 300 mm	$l_A \geq h/2$	$h_{ru} \geq 0,15 h^d$ mindestens eine Lamelle ^e $h_{rl} \geq 0,2 h^d$ mindestens 1,5 Lamellen ^e	$l_v/h_h \leq 2,5$ $l_h \leq h$	$h_h \leq 0,3 h^f$ $h_h \leq 0,4 h^g$	$d \leq 0,3 h^f$ $d \leq 0,4 h^g$
		Gruppe kreisförmiger Durchbrüche: $l_z \geq d^c$					

^a Für Geometrieparameter (z.B. $l_A, l_v, l_z, h_{ru}, h_{rl}, h_h, e$) siehe Abbildung 2.
^b In Anwendungen mit durchgängig trockenem oder häufig wechselndem Klima sollte l_v erhöht werden ($l_v \geq 1,5h$).
^c Bei Gruppen von kreisförmigen Durchbrüchen ist ein Abminderungsfaktor anzuwenden, siehe 4.3.
^d Die unterschiedlichen Abstandsregelungen decken die unterschiedlichen Auswirkungen von Biegedruck- und Biegezugspannungen ab. Die Auswirkung exzentrischer Anordnungen ist nachzuweisen.
^e Für LVL-P: $h_{ru} \geq 40$ mm, $h_{rl} \geq 60$ mm.
^f Für Durchbrüche mit innenliegenden, stiftförmigen Verstärkungselementen.
^g Für Durchbrüche mit außenliegenden, flächenförmigen Verstärkungen, z.B. Platten, Lamellen, LVL-C und Nagelplatten und für Durchbrüche in hochkant biegebeanspruchtem LVL-C und GLVL-C aus Nadelholz.

4. Bemessung von Durchbrüchen nach prEN1995-1-1

4.1. Bemessung symmetrisch angeordneter Durchbrüche

Für Biegeträger mit Durchbrüchen, deren Schwerpunkt sich auf der neutralen Achse des Bauteils befindet, sollte folgender Nachweis erfüllt sein.

$$\frac{\frac{F_{t,90,V,Ed}}{l_{t,90,V}} + \frac{F_{t,90,M,Ed}}{l_{t,90,M}}}{0,5 b k_{vol} k_{space} f_{t,90,d}} \leq 1,0 \quad (1)$$

mit

$$F_{t,90,V,Ed} = \frac{V_d 0,7 d_h}{4h} \left[3 - \left(\frac{0,7 d_h}{h} \right)^2 \right] k_{diam} \quad (2)$$

$$k_{diam} = 1,1 + 1,3 \left[\frac{d_h}{h} - \left(\frac{d_h}{h} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$l_{t,90,V} = 1,3 d_h \quad (4)$$

$$F_{t,90,M,Ed} = 0,09 \frac{M_d}{h} \left(\frac{d_h}{h} \right)^2 \quad (5)$$

$$l_{t,90,M} = 0,8 d_h \quad (6)$$

$$k_{vol} = \left(\frac{V_{ref}}{0,25 b d_h^2} \right)^{0,2} \quad (7)$$

dabei ist

- k_{space} Beiwert zur Berücksichtigung von bis zu 3 kreisförmigen, in Gruppe angeordneten, Durchbrüchen
 = 1,0 für Bauteile mit einzelnen Durchbrüchen;
 für Biegeträger mit Gruppen von kreisförmigen Durchbrüchen, siehe 4.3;
- d_h der anzuwendende Durchmesser des Durchbruchs
 = d (Durchmesser) für kreisförmige Durchbrüche
 = $k_{\text{shape}} h_h$ für rechteckige Durchbrüche
- V_{ref} ist das Referenzvolumen
 mit $V_{\text{ref}} = 0,01 \text{ m}^3$ für Nadelholzprodukte GST, GL und BGL
 mit $V_{\text{ref}} = 0,0015 \text{ m}^3$ für hochkant biegebeanspruchte Nadelholzprodukte LVL, GLVL

Eine Erläuterung der weiteren Symbole kann dem Anhang entnommen werden.

Der Weibull-basierte Bemessungsansatz, d.h. die Einbeziehung eines Volumeneffekts, basiert auf [12], wurde in [8] ergänzt und in das vorliegende Bemessungsformat übertragen. Die Basis des Volumenfaktors k_{vol} ist ein Ringsegment mit einem Öffnungswinkel $\theta = 50^\circ$, einer Ausdehnung in radialer Richtung von $\Delta r = 3/8d$ und einer Dicke gleich der Bauteilbreite b . Die Variation dieser geometrischen Parameter hat einen eher vernachlässigbaren Einfluss auf die Ergebnisse. Der Ansatz zur Bestimmung der Querkraft aufgrund der Übertragung von Biegespannungen um den Durchbruch basiert auf [13]. Die effektive Verteilungslänge, $l_{t,90}$, hängt von der Durchbruchgröße und der Art der übertragenen Spannungen ab, sie ist bei Schubspannungen größer als bei Biegespannungen. Zur Vereinfachung wird die Verteilung der Querkraftspannungen entlang der Verteilungslänge als dreiecksförmig angenommen. Die angegebenen Referenzvolumen basieren auf den zugehörigen Prüfnormen der Holzprodukte.

Auch rechteckige Durchbrüche dürfen unter Verwendung eines äquivalenten Durchmessers mit obenstehendem Bemessungsansatz nachgewiesen werden. Für Biegeträger mit rechteckigen Durchbrüchen mit einem Ausrundungsradius der Ecken $r/h_h \geq 0,1$, die in einem Bereich platziert sind, in dem das Schnittgrößenverhältnis

$0 \leq \frac{|V_d| h}{|M_d|} \leq 1$ beträgt, darf der Faktor k_{shape} wie folgt bestimmt werden:

$$k_{\text{shape}} = 1,25 + 0,3 \frac{l_h}{h_h} \left[4 \frac{V_d h}{M_d} - 3 \left(\frac{V_d h}{M_d} \right)^2 \right] \quad (8)$$

Eine Erläuterung der Symbole kann dem Anhang entnommen werden.

Der Beiwert k_{shape} wird verwendet, um äquivalente Querkraftspannungen zu bestimmen. Die geometrischen Grenzwerte in Tabelle 1 sind nicht auf k_{shape} anwendbar. Die geometrischen Grenzwerte in Tabelle 1 umfassen auch Robustheitskriterien und berücksichtigen zusätzliche Auswirkungen wie Spannungskonzentrationen aus Schub und Biegung an den Durchbruchrändern.

Gleichung (8) ermöglicht die Bemessung von rechteckigen Durchbrüchen mit den Bemessungsregeln für kreisförmige Durchbrüche mittels eines äquivalenten Durchmessers, der zu einer vergleichbaren Querkraft, $F_{t,90}$, führt. Die Nachweise der Biege- und Schubspannungen sind mit den realen Abmessungen des rechteckigen Durchbruchs zu führen. Die Erweiterung der Bemessungsregeln für kreisförmige Durchbrüche auf rechteckige Durchbrüche basiert auf [14] und wurde durch numerische Parameterstudien und experimentelle Ergebnisse aus der Literatur verifiziert. In [15] wird ein alternativer Ansatz vorgestellt, bei dem die Auswirkungen von kreisförmigen und rechteckigen Durchbrüchen durch verschiedene Formfaktoren berücksichtigt werden. Beide Ansätze haben den gleichen Anwendungsbereich und führen für die genormten Standardfälle zu ähnlichen Ergebnissen.

Für Biegeträger mit rechteckigen Durchbrüchen dürfen die Bemessungswerte der Biegespannungen in dem Trägerquerschnitt mit dem rechteckigen Durchbruch, $\sigma_{m,d}$, wie folgt bestimmt werden:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W_{\text{net}}} + \frac{M_{\text{res,d}}}{W_{\text{res}}} \quad (9)$$

mit

$$M_{\text{res,d}} = \frac{V_d l_h}{2} \quad (10)$$

$$W_{\text{res}} = \frac{b h_{\text{res}}^2}{6} \quad (11)$$

$$h_{\text{res}} = (h - h_h)/2 \quad (12)$$

Eine Erläuterung der Symbole kann dem Anhang entnommen werden.

In Biegeträgern mit Durchbrüchen sollten die erhöhten Schubspannungen im Restquerschnitt am Durchbruch berücksichtigt werden. Hierbei darf der Bemessungswert der maximalen Schubspannung $\tau_{\text{max,d}}$ wie folgt bestimmt werden:

$$\tau_{\text{max,d}} = k_\tau \frac{1,5 V_d}{b(h - h_h)} \quad (13)$$

mit

$$k_\tau = k_{\text{rad}} \left(1 + \frac{l_h}{h}\right) \left(\frac{h_h}{h}\right)^{0,2} \quad (14)$$

dabei ist:

h_h die Durchbruchhöhe, für kreisförmige Durchbrüche $h_h = 0,7d$;

k_{rad} Beiwert zur Berücksichtigung der Auswirkung des Abrundungsradius der Ecken auf die Schubspannung. Für Durchbrüche in Biegeträgern aus Nadelholzprodukten GST, GL, BGL und hochkant biegebeanspruchtem LVL-P, GLVL-P darf der Wert für k_{rad} ohne weiteren Nachweis zu 1,8 angenommen werden.

Gleichungen (13) und (14) basieren auf [16]. Nach [17] liegen die mit Gleichungen (13) und (14) ermittelten Schubspannungen für kreisförmige Durchbrüche auch bei Anwendung einer Durchbruchhöhe $h = 0,7d$ deutlich auf der sicheren Seite.

4.2. Bemessung exzentrisch angeordneter Durchbrüche

Ein von den Autoren durchgeführtes Forschungsvorhaben [8] verdeutlichte folgenden Zusammenhang. Mit zunehmender Ausmitte verändern sich die beiden umzulagernden Spannungsanteile, siehe Abbildung 1, in der Größe dahingehend, dass diese im Fall der Schubspannungen geringfügig abnehmen sowie im Fall der Biegespannungen deutlich zunehmen. Dementsprechend wirken sich eine zunehmende Ausmitte im Hinblick auf das Tragverhalten im Fall der umzulagernden Schubspannungen günstig jedoch im Fall der umzulagernden Biegespannungen deutlich ungünstig aus. Für jede Gesamtbetrachtung eines Durchbruchs ist eine Superposition dieser beiden gegenläufigen Effekte erforderlich. Die Position des Durchbruchs im Träger (Ausmitte e/h , Schnittkraftverhältnis M/V) bestimmt dabei, inwieweit daraus ein günstiger/ungünstiger Effekt resultiert.

Exemplarisch wird das Verhalten exzentrischer Einzeldurchbrüche im unverstärkten Zustand anhand des numerisch abgeschätzten Querzugversagens in Abbildung 3 dargestellt. Ein Vergleich numerischer Berechnungen in Kombination mit einem Weibull-basierten Bemessungsansatz und der Versuchsergebnisse unverstärkter Durchbrüche zeigte, dass sich entsprechende Durchrisslasten auf diese Weise recht gut abschätzen lassen. In Abbildung 3 sind die ermittelten Durchrisslasten am Beispiel der im Forschungsprojekt [8] experimentell untersuchten Trägergröße $b/h = 120\text{mm}/400\text{mm}$ (Kleinversuche) und zweier verschiedener Durchbruchgrößen dargestellt. Der zugrundeliegende Mittelwert der Querzugfestigkeit beträgt $\bar{f}_{t,90,\text{mean}} = 0,83\text{ N/mm}^2$. Bei sehr kleinen Schnittkraftverhältnissen (Einfluss des Moments gering) zeigt sich demnach ein geringfügig positiver Effekt der Ausmitte, welcher sich mit zunehmendem Schnittkraftverhältnis (zunehmender Einfluss des Biegemoments) deutlich ins Negative wandelt.

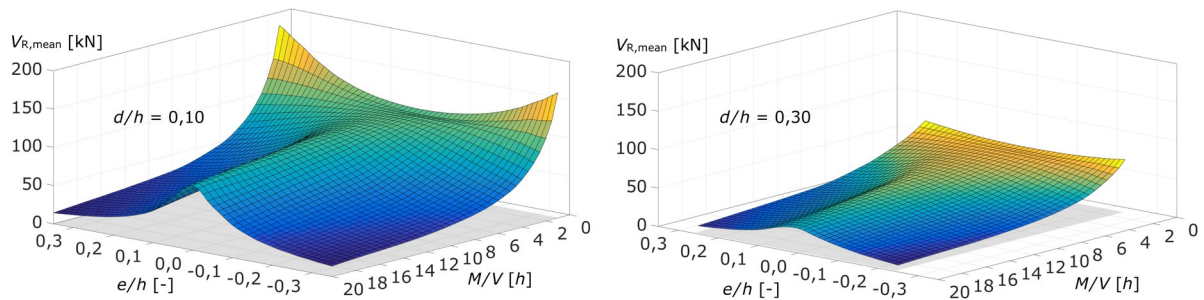


Abbildung 3: Ermittelte Durchrisslasten zweier Durchbruchgrößen (links: klein, rechts: groß) in Abhängigkeit der Position des Durchbruchs im Träger [8]

Im Unterschied zum Bemessungsansatz für auf der neutralen Achse angeordnete Durchbrüche sind bei exzentrischer Anordnung zwei mögliche Orte maximaler Querspannungen (Quadrant I und III, siehe Abbildung 1) zu berücksichtigen. Dabei sind die Anteile der Querspannungen infolge Schub und Biegung in Abhängigkeit des Drehsinns des Biegemoments in unterschiedlichen Varianten zu kombinieren (Schub kombiniert mit positivem oder negativem Biegemoment). D.h. je nach Drehsinn des Biegemoments (abh. vom statischen System) ist eine der Kombinationen a bzw. b anzuwenden. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen [8] wurden folgende Bemessungsgleichungen für den Entwurf zum neuen Eurocode 5 vorgeschlagen.

Für Biegeträger aus Brettschichtholz (GL, BGL) mit kreisförmigen Durchbrüchen, deren Schwerpunkt exzentrisch zur Längsachse des Bauteils liegt, sollten die Komponenten der Querspannungen für Nachweise in den Quadranten I und III entsprechend Gleichung (1) in folgenden Varianten kombiniert werden:

- a) für den Fall eines positiven Biegemoments
 - 1) $F_{t,90,V,I}$ und $F_{t,90,M,I}$ (Kombination a.I)
 - 2) $F_{t,90,V,III}$ und $F_{t,90,M,III}$ (Kombination a.III)
- b) für den Fall eines negativen Biegemoments
 - 1) $F_{t,90,V,I}$ und $F_{t,90,M,III}$ (Kombination b.I)
 - 2) $F_{t,90,V,III}$ und $F_{t,90,M,I}$ (Kombination b.III)

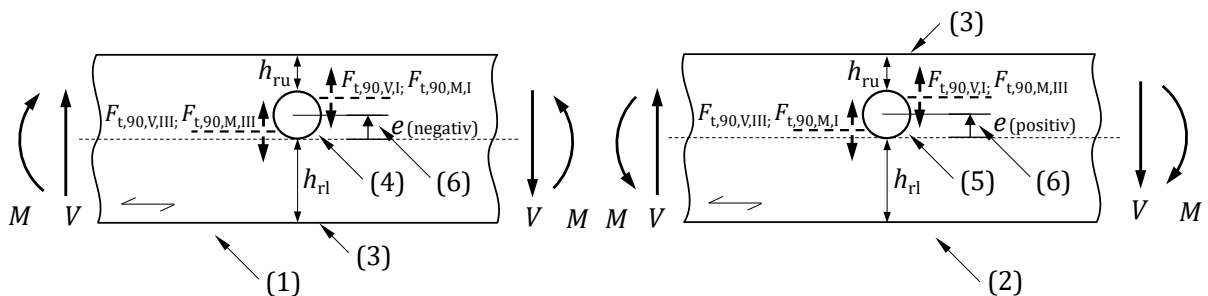


Abbildung 4: Exzentrisch angeordnete Durchbrüche in Biegeträgern

Legende

- 1 Biegeträger unter positivem Biegemoment (z.B. Einfeldträger unter Vertikallast)
- 2 Biegeträger unter negativem Biegemoment (z.B. Kragträger oder Durchlaufträger über Auflager)
- 3 (Biege-)Zugspannung ausgesetzter Bauteilrand
- 4 Durchbruch mit Exzentrizität in Richtung des Bauteilrandes unter Biegedruckspannungen (bevorzugt)
- 5 Durchbruch mit Exzentrizität in Richtung des Bauteilrandes unter Biegezugspannungen
- 6 Exzentrizität zwischen dem Schwerpunkt des Durchbruchs und der neutralen Achse des Bauteils
 - e ist negativ in Richtung des Bauteilrandes unter Biegedruckspannungen
 - e ist positiv in Richtung des Bauteilrandes unter Biegezugspannungen

Für diese Fälle dürfen die Bemessungswerte der Querkzugkräfte $F_{t,90,V,Ed}$ und $F_{t,90,M,Ed}$ wie folgt bestimmt werden:

$$F_{t,90,V,Ed} = F_{t,90,V,I/III,Ed} = \frac{V_d 0,7d}{4h} \left[3 - \left(\frac{0,7d}{h} \right)^2 \right] k_{ecc,I/III} \quad (15)$$

mit

$$k_{ecc,I} = 0,1 + \frac{d}{h} + 4,5 \frac{h_{ru}}{h} - 5,0 \left(\frac{h_{ru}}{h} \right)^2 \quad (16)$$

$$k_{ecc,III} = 0,1 + \frac{d}{h} + 4,5 \frac{h_{rl}}{h} - 5,0 \left(\frac{h_{rl}}{h} \right)^2 \quad (17)$$

$$l_{t,90,V} = l_{t,90,V,I/III} \quad \text{entsprechend Gleichung (4)}$$

und

$$F_{t,90,M,Ed} = F_{t,90,M,I,Ed} = M_d \frac{d}{h^3} \max \begin{cases} -0,62 (e - 0,13d) \\ -0,2 (e - 0,45d) \\ 0,3 (e - 0,08d) \end{cases} \quad (18)$$

$$l_{t,90,M} = l_{t,90,M,I} = 0,8d \left(1 - \frac{e}{d} \right) \quad \text{mit } 0,6d \leq l_{t,90,M,I} \leq 1,0d \quad (19)$$

und

$$F_{t,90,M,Ed} = F_{t,90,M,III,Ed} = M_d \frac{d}{h^3} 0,22 (e + 0,19d) \quad \text{mit } F_{t,90,M,III,Ed} \geq 0 \quad (20)$$

$$l_{t,90,M} = l_{t,90,M,III} = 0,4d \quad (21)$$

Eine Erläuterung der Symbole kann dem Anhang entnommen werden.

4.3. Bemessung von Gruppen von Durchbrüchen

Ein von den Autoren durchgeführtes Forschungsvorhaben [8] verdeutlichte folgenden Zusammenhang. Das Ausmaß des gegenseitigen Einflusses mehrerer nebeneinanderliegender Durchbrüche ist nicht nur abhängig vom lichten Abstand, sondern auch von der Position im Träger, d.h. der Beanspruchungssituation. Während ein zunehmender Momenteneinfluss einen eher positiven Einfluss hat, tritt der größte tragfähigkeitsmindernde Einfluss im auflagernahen, vorwiegend schubbeanspruchten Bereich auf. Dementsprechend wird der Abminderungsfaktor k_{space} durch eine bi-lineare Kurve in Abhängigkeit vom lichten Abstand zwischen zwei Durchbrüchen dargestellt, welche stellvertretend ist für die Ergebnisse der ungünstigsten Anordnung. Aufbauend auf den numerischen und experimentellen Untersuchungen zu Gruppen nebeneinanderliegender Durchbrüche in Brettschichtholzträgern wurden folgende Bemessungsgleichungen für den Entwurf zum neuen Eurocode 5 vorgeschlagen. [8] enthält auch einen Vorschlag zur Berücksichtigung einer Gruppe vertikal übereinander angeordneter Durchbrüche.

Für Biegeträger aus Balkenschichtholz (GST) oder Brettschichtholz (GL, BGL) aus Nadelholz mit Gruppen von 2 oder 3 parallel zur Faser angeordneten, kreisförmigen Durchbrüchen mit dem gleichen Durchmesser d , der gleichen Exzentrizität e und dem gleichen Abstand parallel zur Faser l_z , siehe Abbildung 2, und in Übereinstimmung mit Gleichung (22), sollte Gleichung (1) für jeden Durchbruch mit Gleichung (23) erfüllt sein:

$$d \leq l_z < \begin{cases} 1,5 h & \text{für unverstärkte Durchbrüche} \\ 1,0 h & \text{für verstärkte Durchbrüche} \end{cases} \quad (22)$$

$$k_{space} = \min \begin{cases} 1 \\ 1 - 0,2 \frac{1,5 h - l_z}{1,5 h} \\ 1 - 0,4 \frac{5 d - l_z}{5 d} \end{cases} \quad (23)$$

Eine Erläuterung der Symbole kann dem Anhang entnommen werden.

Für Gruppen von Durchbrüchen mit einer Gesamtlänge parallel zur Faser l_G von nicht mehr als $2h$, gemessen zwischen den Außenkanten der Gruppe der Durchbrüche, sollte der Abstand l_V zwischen dem Ende des Bauteils und des nächsten Durchbruchrands mindestens $1,5h$ betragen.

Eine Gruppe kleiner Durchbrüche, deren Schwerpunkte auf der neutralen Achse des Bauteils liegen, siehe Abbildung 5, darf unter Anwendung eines umschreibenden rechteckigen Durchbruchs bemessen werden, sofern der umschreibende Durchbruch innerhalb der in Tabelle 1 und Abbildung 2 enthaltenen geometrischen Grenzen liegt.

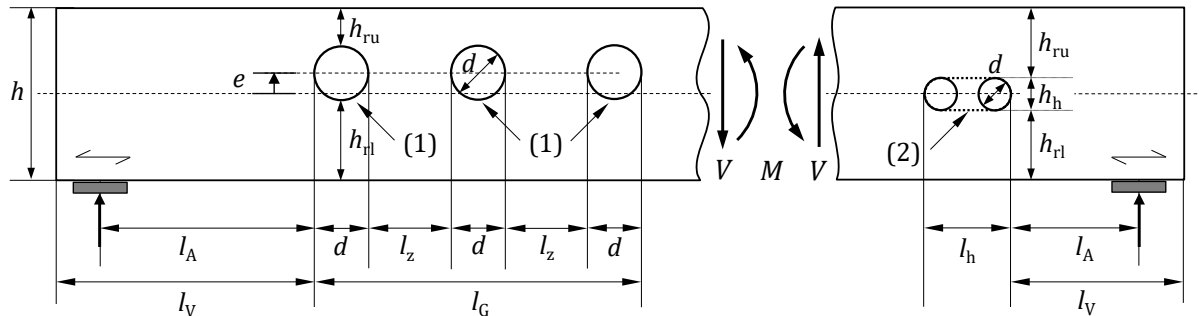


Abbildung 5: Gruppen von Durchbrüchen in Biegeträgern

Legende

1 Gruppe von Durchbrüchen, für die Gleichung (23) berücksichtigt werden sollte

2 Gruppe kleiner Durchbrüche, die unter Anwendung eines umschreibenden rechteckigen Durchbruchs bemessen werden dürfen

Bei einer Gruppe von Durchbrüchen in der Nähe des Bauteilendes wird der Mindestabstand l_V vergrößert, um die Robustheit des Bauteils gegenüber sprödem (Schub-)Versagen zu erhöhen, welches durch das mehrfache Auftreten von Spannungsspitzen in Verbindung mit der Nähe zum Hirnholz und damit erhöhten Holzfeuchteänderungen begünstigt wird. Die Möglichkeit, eine Gruppe von kleinen Durchbrüchen durch einen umschriebenen Durchbruch nachzuweisen, basiert auf [18].

5. Entwurf und Bemessung verstärkter Durchbrüche

Die Angaben zur Verstärkung von Durchbrüchen sind anwendbar auf biegebeanspruchte, technisch getrocknete Bauteile aus den Nadelholzprodukten festigkeitssortiertes Bauholz (ST), keilgezinktes Vollholz (FST), Balkenschichtholz (GST), (blockverklebtes) Brettchichtholz (GL, BGL) und Furnierschichtholz mit parallelen Furnierlagen (LVL-P, GLVL-P), welche mit den geometrischen Randbedingungen in Tabelle 1 übereinstimmen.

Die Begrenzung der Anwendung verstärkter Durchbrüche auf technisch getrocknete Holzbauteile beruht auf der Notwendigkeit, feuchtigkeitsinduzierte Verformungen (Schwinden einschließlich möglicher Risse) von verstärkten Holzbauteilen zu reduzieren. Die Angaben zu Entwurf und Bemessung lehnen sich eng an die Angaben in [2] und [3] an, so dass in diesem Beitrag nur ausgewählte Inhalte des zugehörigen Abschnittes in prEN 1995-1-1:2023-10 wiedergegeben werden.

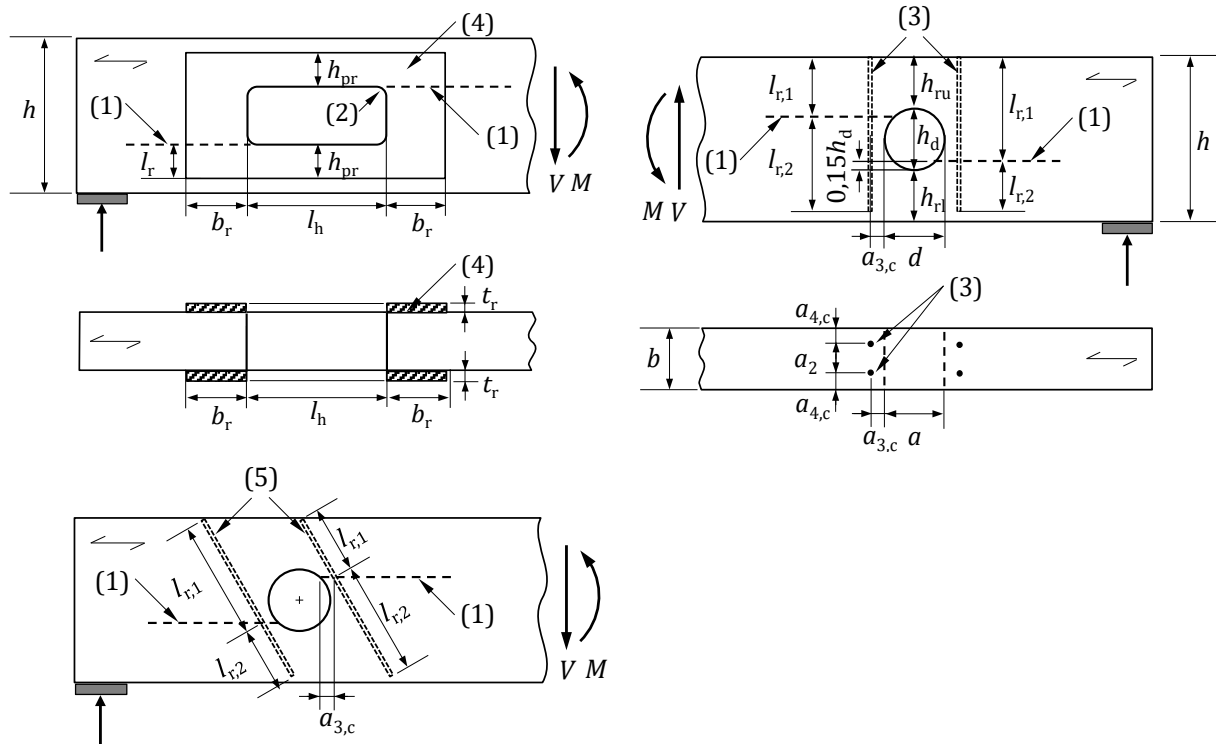


Abbildung 6: Verstärkung von Biegeträgern mit Durchbrüchen

Legende

1 Mögliche Risslinie

2 Abgerundete Ecke: Ausrundungsradius $r \geq 20$ mm, wenn $h_h \leq 200$ mm
Ausrundungsradius $r \geq 40$ mm, wenn $h_h > 200$ mm

3 Innenliegende, stiftförmige Verstärkungselemente

4 Außenliegende, flächenförmige Verstärkungselemente

5 Geneigt angeordnete, innenliegende, stiftförmige Verstärkungselemente, z.B. in Bereichen hoher Schubspannungen

Die Verstärkung eines Durchbruchs in Biegeträgern sollte auf folgenden Bemessungswert der Zugkraft, $F_{t,90,Ed}$, ausgelegt werden:

$$F_{t,90,Ed} = \frac{F_{t,90,V,Ed} + F_{t,90,M,Ed}}{k_{space}} \quad (23)$$

Die Bestimmung der Bemessungswerte der Querszugkräfte $F_{t,90,V,d}$ und $F_{t,90,M,d}$ erfolgt entsprechend den vorderen Abschnitten. Für Angaben zu ansetzbaren Einbindelängen oder ansetzbaren Längen bzw. Breiten flächenförmiger Verstärkungselemente bei der Ermittlung der Beanspruchbarkeit der Verstärkungselemente wird auf die Angaben in [2] bzw. [3] sowie [7] verwiesen. Sofern innenliegende, stiftförmige Verstärkungselemente zur Anwendung kommen, sollte nur eine Reihe Verstärkungselemente im Abstand $a_{3,c}$ zum Durchbruchrand rechnerisch angesetzt werden, siehe Abbildung 6. Der Abstand zwischen dem Ort der maximalen Querszugspannungen und den stiftförmigen Verstärkungselementen sollte minimiert werden. Im Fall kreisförmiger Durchbrüche kann dies durch geneigte innenliegende, stiftförmige Verstärkungselemente erreicht werden. Die Anwendung senkrecht zur Faser angeordneter, stiftförmiger Verstärkungselemente sollte auf Bereiche geringer Schubspannungen begrenzt werden. Wenn der Nachweis der Schubspannungen mit τ_{max} aus Gleichung (13) nicht erfüllt ist, sollten senkrecht zur Faser angeordnete, innenliegende, stiftförmige Verstärkungselemente nicht angewendet werden.

Die Verstärkungswirkung von stiftförmigen oder flächenförmigen Verstärkungselementen ist stark abhängig vom Abstand zwischen dem Verstärkungselement und dem Ort der Spannungsspitze (bei Querzug oder Schub). Um diesen Abstand zu verringern, können stiftförmige Verstärkungselemente geneigt werden, z.B. auf 45° oder 60°. Darüber hinaus ermöglicht eine geneigte Anordnung auch die Übertragung von Schubspannungen, was zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit im Vergleich zu einer senkrecht zur Faser angeordneten Verstärkung führt. In [8] durchgeführte Versuche an unverstärkten und mittels geneigt (45° bzw. 60°) angeordneten Vollgewindeschrauben verstärkten, exzentrisch angeordneten Durchbrüchen zeigen Tragfähigkeitssteigerungen im Vergleich zum unverstärkten Zustand von bis zu 98%, abhängig von der exzentrischen Position der Durchbrüche, siehe Abbildung 7 links. Die Begrenzung der Anwendbarkeit senkrecht zur Faser angeordneter, stiftförmiger Verstärkungselemente auf Bereiche mit geringen Schubspannungen beruht auf der Tatsache, dass diese Anordnung zu einer Sperrwirkung gegenüber Schwind- und Quellverformungen führt. Gesperrte Schwindverformungen führen zu Querzugspannungen und damit zu einer reduzierten Schubbeanspruchbarkeit des verstärkten Holzbauteils, welches im Umkreis von Durchbrüchen signifikant erhöhten Schubspannungen ausgesetzt ist. Die im Fall von tiefen Schwindrissen freiwerdenden Schubspannungen können von rechtwinklig zur Faser angeordneten, stiftförmigen Verstärkungselementen nur in sehr geringem Maße aufgenommen werden. Experimentelle Untersuchungen in [19] belegen, dass eine geneigte Anordnung von Verstärkungselementen im auflagernahen Bereich zu einer deutlichen Steigerung der Tragfähigkeit im Vergleich zur Anordnung rechtwinklig zur Faser führt, der Sperreffekt bei Austrocknung wird reduziert, siehe Abbildung 7 rechts.

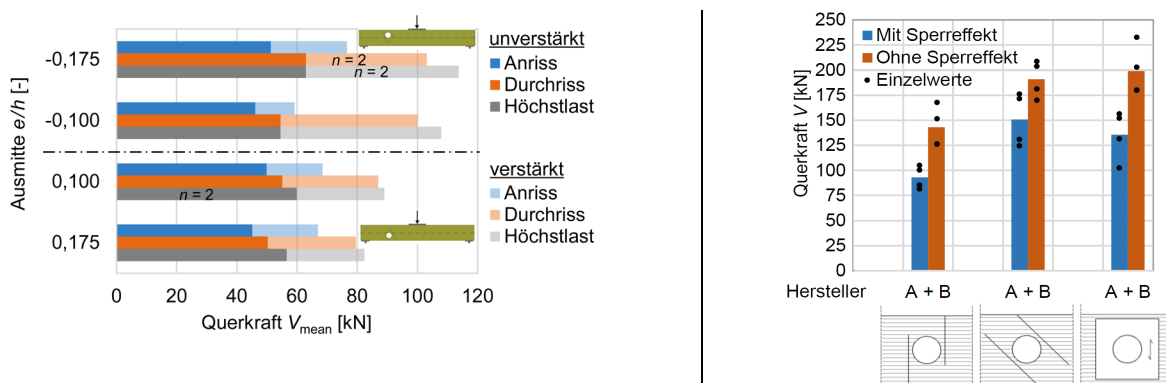


Abbildung 7: links: Versuchsergebnisse an exzentrischen Einzeldurchbrüchen $d/h = 0,35$ [8]; rechts: Versuchsergebnisse an verstärkten Durchbrüchen ohne und mit Sperreffekt (Δu 2,3 % – 5,3 %) [19]

6. Danksagung

Der Entwurf *Durchbrüche* wurde in Zusammenarbeit zwischen dem Autor und Prof. Dr. Roberto Tomasi erstellt. Der Entwurf *Verstärkungen* wurde in Zusammenarbeit zwischen dem Autor und Dipl.-Ing. Alfons Brunauer (1963-2018) erstellt. Die Autoren danken Dr. Simon Aicher, Dr. Cristóbal Tapia Camú, Prof. Dr. Erik Serrano, Ass.-Prof. Dr. Henrik Danielsson, Dr.-Ing. Tobias Wiegand, Assoc.-Prof. Dr.-Ing. Robert Jockwer und Dipl.-Ing. Harald Liven für Ihre Beiträge im Rahmen der Arbeit der WG 7.

7. Literatur

- [1] 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.
- [2] 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.

- [3] ÖNORM B 1995-1-1:2015-06, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holz bauten - 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, Wien.
- [4] Dietsch, P., Winter, S.; Eurocode 5 - Future Developments towards a more comprehensive code on timber structures. Structural Engineering International, Vol. 22, H. 2, S. 223-231, 2012.
- [5] prEN 1995-1-1:2023-10, Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN, Brüssel.
- [6] Winter, S.; Die Evolution des Eurocode 5 – ein Überblick mit Schwerpunkt auf der DIN EN 1995-1-1, Internationales Holzbau Forum IHF, Innsbruck, 2023.
- [7] Dietsch, P., Eurocode 5:2022 – Einführung in den neuen Abschnitt Verstärkungen mit Fokus auf Querdruckverstärkungen zur Lastdurchleitung, Internationales Holzbau Forum IHF, Innsbruck, 2019.
- [8] Danzer, M., Dietsch, P., Winter, S.; Einfluss exzentrisch positionierter runder Einzeldurchbrüche und Gruppen von Durchbrüchen auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern – Entwicklung von Bemessungsverfahren und Konstruktionsregeln für Verstärkungsmaßnahmen. Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 18048 N, TU München, 2017.
- [9] Gamper, A., Dietsch, P., Merk, M., Winter, S.; 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, 2014.
- [10] Aicher, S., Höfflin, L.; Glulam Beams with Holes Reinforced by Steel Bars, CIB-W18 / 42-12-1, Proceedings of the international council for research and innovation in building and construction, Working commission W18 - timber structures, Meeting 42, Zürich, 2009.
- [11] Aicher, S., Glulam Beams with Internally and Externally Reinforced Holes – Test, Detailing and Design, CIB-W18 / 44-12-4, Proceedings of the international council for research and innovation in building and construction, Working commission W18 - timber structures, Meeting 44, Alghero, 2011.
- [12] Höfflin, L., Runde Durchbrüche in Brettschichtholzträgern – Experimentelle und theoretische Untersuchungen, Dissertation, Schriftenreihe Heft 90, MPA Universität Stuttgart, 2005.
- [13] Aicher, S., Höfflin, L., Runde Durchbrüche in Biegeträgern aus Brettschichtholz - Teil 1: Berechnung, Bautechnik, Vol 78, pp. 706-715, 2001.
- [14] Danzer, M., Rodemeier, S., Dietsch, P.; Rechteckige Durchbrüche, Schlussbericht PRB-4.1, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München, 2019.
- [15] Tapia, C., Aicher, S., Evaluation of design concepts for holes in glulam beams – comparison with test results, Otto-Graf-Journal Vol. 18, pp. 329 – 344, 2019.
- [16] Blaß, H.J., Bejtka, I., Reinforcements perpendicular to the grain using self-tapping screws, Proceedings of the World Conference of Timber Engineering WCTE 2004, Lahti.
- [17] Aicher, S., Siby, C., Tapia, C., Glulam and LVL Members with Holes – elevated shear stresses at corners and condensation of multiple close holes, INTER / 56-12-4, International Network on Timber Engineering Research INTER, Meeting 10, Biel, Switzerland, 2023.
- [18] Tapia, C., Aicher, S., Mehrfach-Durchbrüche in Brettschichtholz, Proceedings 3. Stuttgarter Holzbau-Symposium, MPA Universität Stuttgart, 2015.
- [19] M. Danzer, P. Dietsch, S. Winter; Verhalten verstärkter Brettschichtholzbauteile unter Schwindbeanspruchung, Schlussbericht zum Zukunft Bau Forschungsvorhaben Nr. 10.08.18.7-17.22, TU München, 2020.

8. Anhang – Symbole

d	Durchmesser des kreisförmigen Durchbruchs;
e	Exzentrizität zwischen dem Schwerpunkt des kreisförmigen Durchbruchs und der neutralen Achse des Bauteils;
h_h	Höhe des Durchbruchs;
h_{res}	verbleibende Höhe h_{rl} bzw. h_{ru} zwischen Durchbruchrand und Trägerrand;
h_{rl}	verbleibende Höhe unter unterem Durchbruchrand;
h_{ru}	verbleibende Höhe über oberem Durchbruchrand;
k_{diam}	Beiwert zur Berücksichtigung der Spannungsverteilung und Lage der Risslinie;
$k_{ecc,I/III}$	Beiwert zur Berücksichtigung der Auswirkung der Exzentrizität auf die Übertragung von Schubkräften für den ersten bzw. dritten Quadranten;
k_{shape}	Beiwert zur Berücksichtigung der Form des rechteckigen Durchbruchs;
k_{vol}	Beiwert zur Berücksichtigung des Volumeneffektes;
l_A	Abstand zwischen Durchbruchrand und Auflager;
l_h	Länge des rechteckigen Durchbruchs;
$l_{t,90,M}$	Verteilungslänge für Querkzugspannungen aufgrund der Übertragung von Biegespannungen um den Durchbruch;
$l_{t,90,V}$	Verteilungslänge für Querkzugspannungen aufgrund der Übertragung von Schubspannungen um den Durchbruch;
l_V	Abstand zwischen Trägerende und Durchbruchrand;
l_z	Abstand in Faserrichtung zwischen zwei Durchbrüchen;
$F_{t,90,M,Ed}$	Bemessungswert der Querkzugkraft aufgrund der Übertragung von Biegespannungen;
$F_{t,90,M,I/III,Ed}$	Bemessungswert der Querkzugkraft aufgrund der Übertragung von Biegespannungen um den Durchbruch im ersten bzw. dritten Quadranten;
$F_{t,90,V,Ed}$	Bemessungswert der Querkzugkraft aufgrund der Übertragung von Schubspannungen;
$F_{t,90,V,I/III,Ed}$	Bemessungswert der Querkzugkraft aufgrund der Übertragung von Schubspannungen um den Durchbruch im ersten bzw. dritten Quadranten;
M_d	Bemessungswert des Biegemomentes am Durchbruchrand (Absolut-, d.h. positiver Wert);
$M_{res,d}$	Bemessungswert des Biegemomentes aus Rahmenwirkung um den Durchbruch;
V_d	Bemessungswert der Querkraft am Durchbruchrand (Absolut-, d.h. positiver Wert);
W_{net}	Widerstandsmoment des Nettoquerschnitts;
W_{res}	Widerstandsmoment des Restquerschnitts über und unter dem Durchbruch;