

Verformungsbasierte Bemessung bei Querdruck

Lukas Windeck

Zusammenfassung

Unter einer Druckbelastung quer zur Faser verhält sich Holz ausgesprochen duktil. Insbesondere bei Vollholz und Brettschichtholz kann die Belastung nur bis zu einem gewissen Punkt gesteigert werden. Danach nehmen die Verformungen bei einem verhältnismäßig geringen Anstieg der Lasten deutlich zu. Bei Furnierschichthölzern tritt ein ähnliches, jedoch nicht so stark ausgeprägtes Verhalten auf. Dieses Materialverhalten lieferte den Anstoß zur Herleitung eines verformungsbasierten Bemessungsansatzes für Brettschichtholz und Furnierschichthölzer, der das Last-Verformungs-Verhalten bei einer Querdruckbelastung vollständig beschreiben soll. Er wird dem im EC5 geregelten Verfahren gegenübergestellt und in einem Anwendungsbeispiel erläutert.

1 Einleitung

In den meisten Fällen verhält sich Holz unter einer Druckbeanspruchung quer zur Faser sehr duktil. Selbst bei großen Verformungen ist kein Abnehmen der aufgebrachtene Last zu verzeichnen, wobei gleichzeitig nur eine geringe Laststeigerung stattfindet.

Das Bemessungsmodell im EC5 [1] basiert auf der Arbeit von Blaß und Görlacher [2]. Der Spannungsnachweis quer zur Faser kann dabei mit Gleichung (1) geführt werden.

$$\frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d} \quad (1)$$

A_{ef} ist eine wirksame Kontaktlänge, die mit der realen Auflagerlänge und einer seitlichen Verlängerung von bis zu 30 mm je Auflagerseite berechnet wird. Der Faktor $k_{c,90}$ ist abhängig von der Auflagersituation und wird unterschieden zwischen einer Schwellen- und einer Balkenlagerung. Für Schwellen aus BSH kann dabei ein Wert von $k_{c,90} = 1,5$ und für Balken ein Wert von $k_{c,90} = 1,75$ angesetzt werden. Es wird nur ein Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) berücksichtigt. Eine Berücksichtigung von Verformungen, die zwangsläufig auftreten, findet nicht statt. Ebenso ist nicht klar, welche Verformungen im Holz unter einer angesetzten Belastung auftreten.

Unter Berücksichtigung des duktilen Versagens sowie der erreichten Verformungen soll den bemessenden Ingenieuren ein genauerer Blick auf die Querdruckproblematik ermöglicht werden. Sie sollen von Fall zu Fall in der Lage sein, zu entscheiden, welche Verformungen für das Tragwerk verträglich sind. Es soll ihnen ermöglicht werden, die verformungsverursachenden Lasten zu begrenzen oder die Tragfähigkeit in vollem Umfang auszunutzen, da mit keinem Versagen der Bauteile gerechnet werden muss.

Im Folgenden werden die durchgeführten Versuche sowie die Herleitung eines verformungsbasierten Bemessungsansatzes vorgestellt, der die Last-Verformungs-Kurven der Versuche beschreibt. Dabei wird gezeigt, dass die Tragfähigkeit in einen Anteil aus Druckspannungen in der Kontaktfläche und einen Anteil aus der mitwirkenden Faserlänge aufgeteilt werden kann.

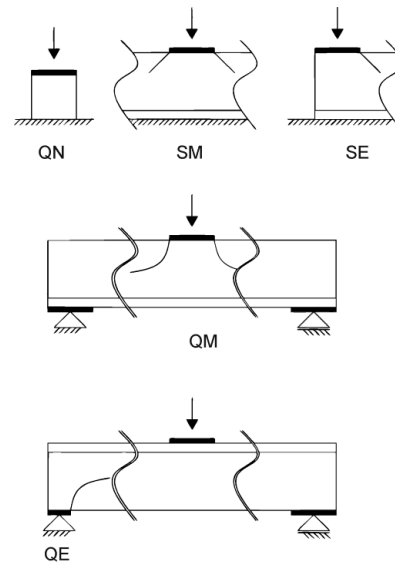


Abb. 1 In den Versuchen untersuchte Laststellungen; QN: Versuch nach EN 408, SM: mittig belastete Schwelle, SE: am Ende belastete Schwelle, QM: Zwischenauflager eines Trägers, QE: Endauflager eines Trägers

2 Durchgeführte Versuche

Um das Modell im EC5 zu evaluieren und eine Basis für die Entwicklung eines neuen Ansatzes zu schaffen, wurden insgesamt 386 Versuche (101 an Brett-schichtholz, 134 an Furnierschichtholz (FSH) aus Nadelholz und 151 an FSH aus Buchenholz) durchgeführt. Bei den Versuchen an Brett-schichtholz wurden die Auflagerlänge und die Laststellung variiert (Abb. 1).

Zusätzlich wurde bei den Furnierschichthölzern die Furnierorientierung variiert. Es wurden ebenfalls Versuche in Anlehnung an EN 408:2012 [3] durchgeführt, um den Basiswert der Querdruckfestigkeit der Stichprobe zu generieren (Reihen QN). Die Versuche wurden mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 3 mm/min durchgeführt und beendet, nachdem eine Gesamtverformung von 15 mm erreicht war. Die Versuche an Brett-schichtholz wurden beendet, als keine signifikante Laststeigerung mehr erreicht wurde. Dies trat bereits bei kleineren Verformungen als 15 mm ein.

2.1 Versuche an Brettschichtholz aus Nadelholz

Bei den Versuchen an Brettschichtholz wurde die Kontaktlänge ℓ in einem Bereich von 50 bis 200 mm variiert. Dabei wurde die Trägerbreite mit 100 mm und die Höhe mit 300 mm konstant gehalten. Die Aufteilung der Versuche zeigt Tab. 1, die Laststellungen sind Abb. 1 zu entnehmen. Die Verformungen wurden dabei in drei Bereichen über die Trägerhöhe gemessen. Die oberen 50 mm direkt unterhalb der Lasteinleitung wurden separat erfasst, da nur in diesem Bereich plastische Verformungen zu erwarten waren.

Die Verformungen in den unteren 200 mm der gesamten Messlänge von 250 mm wurden in zwei 100 mm langen Messbereichen erfasst. Die unterste Lamelle des Querschnitts wurde in Buchen-FSH ausgeführt, um bei den Reihen QM und QE ein vorzeitiges Biegeversagen zu vermeiden.

Mit Hilfe der Versuche nach EN 408 (Reihe QN) wurde eine mittlere Querdruckfestigkeit $f_{c,90,mean} = 3,24 \text{ N/mm}^2$ sowie ein Elastizitätsmodul quer zur Faser von $E_{90,mean} = 326 \text{ N/mm}^2$ bestimmt. Mit Hilfe von EN 14358:2013 [4] wurde ein charakteristischer Festigkeitswert von $f_{c,90,k} = 2,75 \text{ N/mm}^2$ berechnet. Die Stichprobe liegt damit oberhalb der Festigkeitswerte, die in EN 14080:2013 [5] für die Querdruckfestigkeit angegeben sind. Abb. 2 zeigt beispielhaft die Last-Verformungs-Kurven eines Versuchs der Reihe QM mit Auflagerlänge 200 mm. Erwartungsgemäß konnte während des Versuchsablaufs kein Abfallen der Last registriert werden. Dabei tritt der Hauptteil der Verformungen im oberen Messbereich direkt unter der Lasteinleitung auf. Jedoch ist der elastische Verformungsanteil in den unteren Trägerbereichen nicht zu vernachlässigen. Er beträgt für die größeren untersuchten Auflagerlängen bis zu 40 % der Gesamtverformungen. Daher können diese Verformungsanteile im Folgenden nicht vernachlässigt werden. Auf Grund dieser Erkenntnis werden im Folgenden die gesamten Verformungen über die Trägerhöhe berücksichtigt. Es ist jedoch anzumerken, dass rund 90 % der Verformungen in den oberen 150 mm der Trägerhöhe auftreten.

Tab. 1 Durchgeführte Versuche an BSH

Reihe	Auflagerlänge [mm]				Gesamt
	50	100	150	200	
EN 408 (QN)	-	-	-	20	20
Zwischenaufleger (QM)	6	6	6	6	24
Endaufleger (QE)	6	6	-	-	12
Schwellenende (SE)	5	6	4	6	21
Schwellenmitte (SM)	6	6	6	6	24

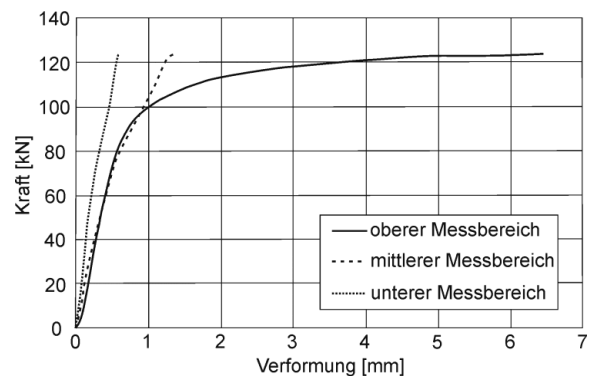


Abb. 2 Beispielhafte Last-Verformungs-Kurven eines Zwischenauflagerversuchs, $\ell=200 \text{ mm}$

2.2 Versuche an Nadel-Furnierschichtholz

Die Versuche an FSH wurden lediglich an Schwellen sowie nach EN 408 durchgeführt. Insgesamt wurden 134 Versuche an Schwellen mit Auflagerlängen von 50 mm bis 400 mm durchgeführt. Untersucht wurde sowohl FSH mit ausschließlich parallelen Lagen (Typ P) sowie mit einem Querlagenanteil von etwa 20 % (Typ Q). Zusätzlich wurde die Furnierorientierung variiert, da bei FSH zwei Belastungsrichtungen quer zur Faser möglich sind: Die Last kann parallel (Abb. 3, links) oder senkrecht zu den Furnierlagen (Abb. 3, rechts) aufgebracht werden. Die Träger mit einer Belastung senkrecht zu den Furnierlagen wiesen Abmessungen von $h = 280 \text{ mm}$ und $b = 100 \text{ mm}$ (bei FSH Typ P $b = 89,25 \text{ mm}$) auf. Eine Auflistung der Versuche ist in Tab. 2 zu finden.

Mit den Versuchen nach EN 408:2012 wurde eine charakteristische Querdruckfestigkeit $f_{c,90,k} = 3,0 \text{ N/mm}^2$ sowie ein E-Modul $E_{90,mean} = 170 \text{ N/mm}^2$ für Typ P und $f_{c,90,k} = 3,2 \text{ N/mm}^2$ sowie $E_{90,mean} = 180 \text{ N/mm}^2$ für Typ Q bei Belastung rechtwinklig zu den Furnierlagen berechnet. Wie bei BSH war kein Lastabfall in den Last-Verformungs-Kurven zu erkennen.

Erfolgte die Belastung parallel zu den Furnierlagen ergaben sich bei Prüfkörperabmessungen von $h = 220$ mm und $b = 80$ mm (FSH Typ P $b = 105,5$ mm) Festigkeitswerte von $f_{c,90,k} = 8,0$ N/mm² sowie $E_{90,mean} = 460$ N/mm² für Typ P und $f_{c,90,k} = 8,2$ N/mm² und $E_{90,mean} = 1800$ N/mm² für Typ Q. Bei diesen Versuchen trat ein Lastabfall in Folge Ausknickens der Furnierlagen auf (Abb. 3).

2.3 Versuche an Buchen-Furnierschichtholz

Für Buchen-FSH wurden die gleichen Auflagerlängen und Geometrien wie für Nadel-FSH untersucht. Lediglich für Buchen-FSH Typ Q wurde die Auflagerlänge von 400 mm nicht untersucht. Ein Überblick der durchgeführten Versuche ist in Tab. 3 zu finden. Für eine Belastung rechtwinklig zur Furnierorientierung wurde bei Typ P ein Abfallen der Tragfähigkeit für zunehmende Verformungen festgestellt Dabei zeigt sich ein rollschubähnliches Versagen (Abb. 4). Eine mögliche Ursache für dieses Versagen könnte die Verwendung einer Kugelkalotte sein, die auf Grund der verwendeten Prüfmaschine notwendig war. Bei parallel zu den Furnierlagen aufgebrachter Last war lediglich in den Versuchen nach EN 408 an Typ P ein mit einem Lastabfall verbundenes Versagen zu erkennen. Auch hier knickten die Furnierlagen aus. Dieses Verhalten trat bei Schwellenversuchen nicht auf.

Das Versagen von Buchen-FSH Typ Q (Reihen QN) mit parallel zu den Furnierlagen gerichteter Belastung führt ebenfalls zu ausknickenden Furnieren (Abb. 5). Hier war auch bei Schwellenversuchen ein Lastabfall feststellbar. Erfolgte die Belastung bei Typ Q rechtwinklig zu den Furnierlagen war kein Versagen feststellbar.

An Hand der Versuche nach EN 408 wurde für Typ P bei senkrechter Belastung zu den Furnierlagen ein charakteristischer Wert der Querdruckfestigkeit von $f_{c,90,k} = 14,8$ N/mm² und $E_{90,mean} = 790$ N/mm² und bei paralleler Belastung von $f_{c,90,k} = 16,3$ N/mm² und $E_{90,mean} = 860$ N/mm² errechnet. Für Typ Q konnten bei rechtwinkliger Belastung Werte von $f_{c,90,k} = 14,6$ N/mm² ($E_{90,mean} = 800$ N/mm²) und bei paralleler Belastung von $f_{c,90,k} = 18,5$ N/mm² ($E_{90,mean} = 3100$ N/mm²) bestimmt werden.

Tab. 2 Durchgeführte Versuche an Nadel-FSH

	Lastrichtung	Auflagerlänge [mm]				Gesamt	
		Reihe	50	100	200		400
Typ Q	⊥	SE	5	5	5	5	20
		SM	5	5	5	4	19
		QN	-	-	5	-	5
		SE	5	2	5	5	17
		SM	5	5	5	4	19
		QN	-	-	5	-	5
Typ P	⊥	SE	2	3	4	3	12
		SM	4	2	2	-	8
		QN	-	-	3	-	3
		SE	3	4	3	-	10
		SM	3	4	3	-	10
		QN	-	-	6	-	6



Abb. 3 Versagen von parallel (||) belastetem FSH auf Grund ausknickender Furnierlagen (links). Belastungsrichtung rechtwinklig (⊥) zu den Furnierlagen (rechts).



Abb. 4 Ausknicken der Furnierlagen bei Buchen-FSH Typ Q unter Belastung parallel zur Furnierorientierung



Abb. 5 Rollschubähnliches Versagen von senkrecht zur Furnierlage belastetem Buchen-FSH Typ P

Tab. 3 Durchgeführte Versuche an Buchen FSH

	Lastrichtung	Auflagerlänge [mm]				Gesamt	
		Reihe	50	100	200		400
Typ Q	⊥	SE	5	5	5	-	15
		SM	5	5	5	-	15
		QN	-	-	5	-	5
		SE	5	5	5	-	15
		SM	5	5	5	-	15
		QN	-	-	5	-	5
Typ P	⊥	SE	5	5	5	3	18
		SM	5	4	5	2	16
		QN	-	-	15	-	15
		SE	4	5	3	-	12
		SM	5	5	-	-	10
		QN	-	-	10	-	10

3 Entwicklung eines verformungsbasierten Bemessungsansatzes

3.1 Einleitung

Für den nachfolgenden Vergleich der Versuchsergebnisse zu den mit Hilfe des EC5 berechneten Werten wird eine Verformung über die gesamte Querschnittshöhe von 5 mm zu Grunde gelegt. Dies entspricht einer Stauchung von 2 % über die Messlänge von 250 mm. Abb. 6 zeigt die mit Hilfe $f_{c,90,mean}$ berechneten Tragfähigkeiten nach EC5 im Vergleich zu den Versuchsergebnissen bei einer Verformung von 5 mm über die Trägerhöhe. Es ist erkennbar, dass die berechneten Werte für eine mittig belastete Schwelle (SM) gut mit den Versuchsergebnissen übereinstimmen. Für die übrigen untersuchten Konfigurationen berechnen sich nach EC5 höhere Werte als in den Versuchen erreicht wurden. Dies gilt ebenfalls, wenn größere Verformungen als 5 mm angesetzt werden. Die Abweichungen betragen bis zu 24 %. Für alle untersuchten Laststellungen beträgt das Verhältnis EC5 zu Versuchen im Mittel 1,11 bei einer Standardabweichung von 0,09 (COV 8,1 %). Dies bedeutet, dass die Berechnung nach EC5 auf der unsicheren Seite liegt.

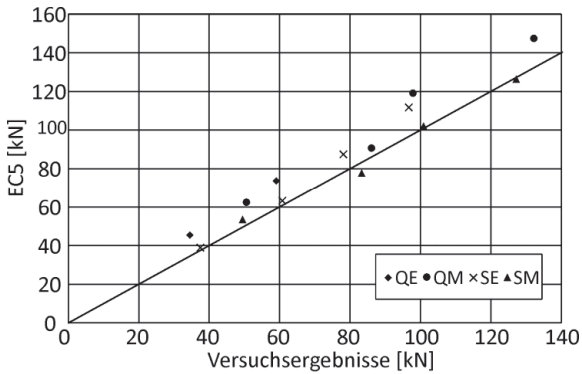


Abb. 6 Berechnete Werte nach EC5 im Vergleich zu den Versuchsergebnissen bei 5 mm Verformung

Im EC5 wird der Querdruckbeiwert $k_{c,90}$ nach der Auflagersituation „Schwelle“ und „Balken“ unterschieden. Wird $k_{c,90}$ mit Hilfe Gleichung (1) und den Versuchsergebnissen für alle untersuchten Lager-situationen bei einer Verformung von 5 mm rückgerechnet, ist deutlich erkennbar, dass ein Zusammenhang zwischen der Art der Lastausbreitung (Belastung am Ende oder Belastung in der Mitte) besteht. Ebenso weichen die Werte in Ihrer Größe von den Angaben im EC5 deutlich ab (Tab. 4).

Tab. 4 Berechnete Werte für $k_{c,90}$ und nach EC5

Reihe	$k_{c,90}$	
	EC5	Versuche
QM	1,75	1,52
QE	1,75	1,37
SM	1,50	1,50
SE	1,50	1,37

Auf Grund des Zusammenhangs in der Lastausbreitung wird im weiteren Verlauf nicht mehr zwischen Balken (Reihen Q) und Schwellen (Reihen S) unterschieden. Es findet lediglich noch eine Unterscheidung zwischen einem einseitigen und zweiseitigen Überstand statt.

3.2 Herleitung auf Basis der Ergebnisse von Brettschichtholz

Auf Grund dieser Beobachtungen ist ein neuer Ansatz für die Querdruckbemessung notwendig. Analog zu Madsen [6] kann die Querdrucktragfähigkeit in zwei

Anteile aufgeteilt werden: Einen Querdruckanteil, der direkt in der Kontaktfläche wirkt sowie den Anteil, der als mitwirkende Faserlänge bezeichnet wird. Dies kann anhand einfacher Überlegungen gezeigt werden, die im Folgenden vorgestellt werden sollen.

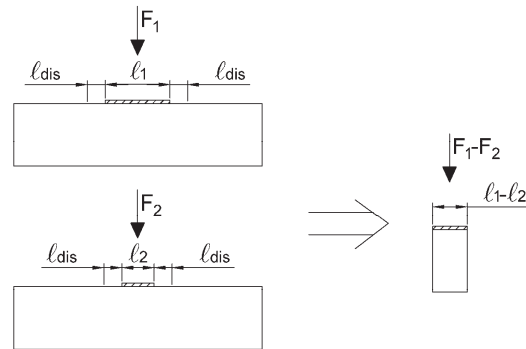


Abb. 7 Vorgehen zur Bestimmung der wirksamen Querdruckspannungen

Abb. 7 zeigt das Vorgehen, dass zur Ermittlung einer effektiven Querdruckspannung unter der Kontaktfläche herangezogen wurde. Die mittleren Last-Verformungs-Kurven der jeweiligen Versuchsreihen werden überlagert, indem jeweils die Lastverschiebungskurve für eine bestimmte Kontaktlänge ℓ von der Lastverschiebungskurve für die gleiche Auflagersituation, jedoch mit einer größeren Kontaktlänge, subtrahiert wird. Ausgehend von der Annahme, dass die mitwirkende Faserlänge unabhängig von der Kontaktlänge ist, entfällt für die resultierenden Werte der Anteil der mitwirkenden Faserlänge. Ein kurzes Beispiel soll dies verdeutlichen: Werden von den Messwerten für eine mittig belastete Schwelle mit Auflagerlänge 200 mm die Messwerte einer mittig belasteten Schwelle mit Auflagerlänge 100 mm subtrahiert, erhält man eine Last-Verschiebungskurve für eine 100 mm lange Kontaktfläche ohne Überstand, ähnlich einem Versuch nach EN 408.

Die resultierenden Spannungen können so in Abhängigkeit der Verformungen u erfasst werden. Abb. 8 zeigt dies beispielhaft für die untersuchten Kombinationen an Brettschichtholz der Reihe SE. Es ist erkennbar, dass die so berechneten Spannungskurven – mit den für Holz üblichen Streuungen – auf einem ähnlichen Niveau liegen. Dies bedeutet, dass in der Kontaktfläche bei gleichen erreichten Verformungen

auch die gleichen Spannungen erreicht werden. Dabei spielt die belastete Trägerlänge keine Rolle. Die Kurven können durch eine Modifikation der Querdruckfestigkeit, die sich nach EN 408 ergibt, angenähert werden (siehe Gleichung (2)). Die Faktoren k_a und k_b sind materialabhängig und können für BSH zu $k_a = 1,5$ und $k_b = 0,4$ für eine einseitige Lastausbreitung bestimmt werden. Die berechneten Näherungswerte sind ebenfalls in Abb. 8 dargestellt.

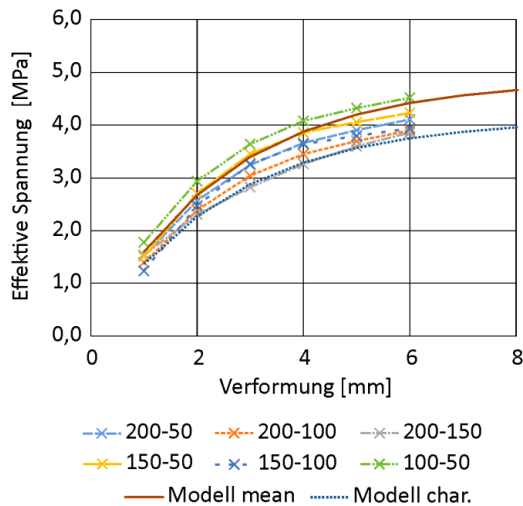


Abb. 8 Effektive Querdruckspannungen und Näherungskurven für BSH Reihe SE

Es ist eine gute Übereinstimmung erkennbar. Werden die wirksamen Querdruckspannungen mit Hilfe der charakteristischen Querdruckfestigkeit $f_{c,90,k}$ berechnet, liegen die Werte erwartungsgemäß an der Untergrenze der Kurvenschar.

$$\sigma_{c,90,eff} = k_a \cdot (1 - e^{-k_b \cdot u}) \cdot f_{c,90} = k_{c,90} \cdot f_{c,90} \quad (2)$$

Im nächsten Schritt wird die mitwirkende Faserlänge ℓ_{dis} bestimmt. Die in den Versuchen gemessenen Lasten abzüglich des Beitrags der Querdruckspannungen $\sigma_{c,90,eff}$ in der Kontaktfläche sind diejenigen Kraftanteile, die von der mitwirkenden Faserlänge übernommen werden. Auch dieser Anteil ist verformungsabhängig. In der späteren Bemessung wird die Querdruckfestigkeit verwendet. Daher wird die mitwirkende Faserlänge mit dem Wert $f_{c,90,mean}$ berechnet. Gleichung (3) ergibt für jeden Verformungsschritt eine mitwirkende Faserlänge, die in Abb. 9 dargestellt ist. Es ist ersichtlich, dass mit zunehmender

der Verformung die mitwirkende Faserlänge ansteigt. Dies ist insofern plausibel, da sich die Holzfasern mit zunehmender Verformung quer zur Faser immer weiter einhängen.

$$\ell_{dis}(u) = \frac{F(u) - \sigma_{c,90,eff}(u) \cdot b \cdot \ell}{f_{c,90,mean} \cdot b} \quad (3)$$

Um das Berechnungsmodell einfach zu halten, werden die mitwirkenden Faserlängen ebenfalls angenähert. In einem Verformungsbereich von 5 mm bis 15 mm Verformung kann der Beitrag der mitwirkenden Faserlänge mit $\ell_{dis} = 60$ mm als konstant angenommen werden. Für kleinere Werte kann zwischen $\ell_{dis} = 0$ mm für $u = 0$ mm und $\ell_{dis} = 60$ mm für $u = 5$ mm interpoliert werden.

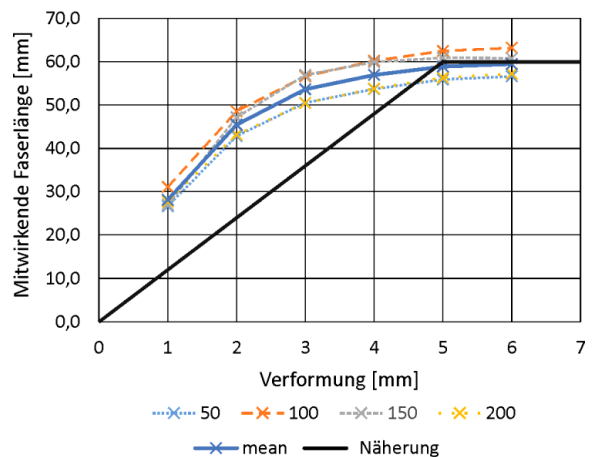


Abb. 9 Mitwirkende Faserlänge in Abhängigkeit der Verformung für die Reihen BSH SE

Das gleiche Vorgehen wird für eine mittig belastete Schwelle (zweiseitige Lastausbreitung) durchgeführt. Es ergeben sich Werte von $k_a = 1,7$, $k_b = 0,6$ sowie $\ell_{dis} = 40$ mm. Im späteren Berechnungsmodell wird vereinfacht sowohl für eine einseitige als auch eine zweiseitige Lastausbreitung ein Wert von $\ell_{dis} = 40$ mm je Auflagerseite für BSH angesetzt. Um die Last quer zur Faser in Abhängigkeit der Verformung zu berechnen, werden die beiden Anteile addiert. Dies resultiert in Gleichung (4).

$$F_{c,90} = b \cdot (k_{c,90}(u) \cdot \ell + \ell_{dis}) \cdot f_{c,90} \quad (4)$$

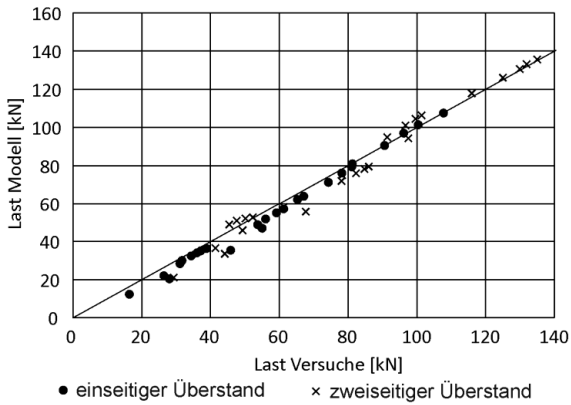


Abb. 10 Vergleich der Modellwerte mit den Versuchsergebnissen für BSH im Verformungsbereich 1 mm bis 12 mm

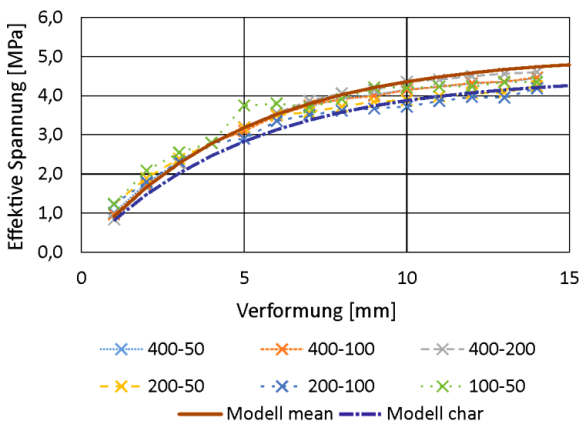


Abb. 11 Effektive Querdruckspannungen bei Nadel-FSH Typ Q ⊥, Serie SE

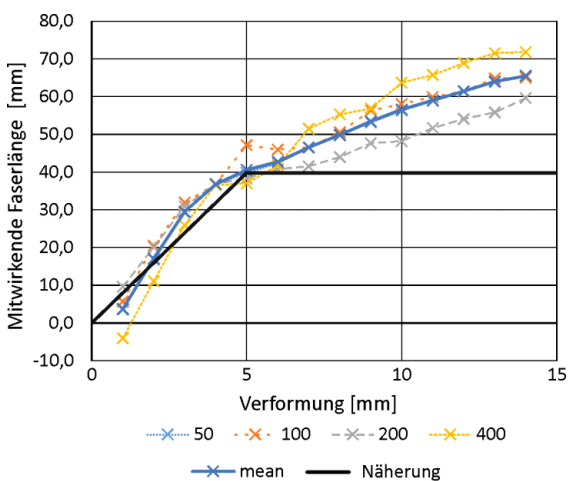


Abb. 12 Mitwirkende Faserlänge bei Nadel-FSH Typ Q ⊥, Serie SE

Abb. 10 zeigt einen Vergleich der mit Hilfe von Gleichung (4) berechneten Tragfähigkeiten gegenüber den Versuchswerten im Verformungsbereich 1 mm bis 12 mm. Es ist eine gute Übereinstimmung erkennbar und die Abweichungen des hier vorgestellten Ansatzes sind geringer als diejenigen des EC5. Die Anpassung der mitwirkenden Faserlänge führt jedoch dazu, dass die berechneten Lasten für einen einseitigen Überstand die Versuchsergebnisse leicht unterschätzen. Der mittlere Verhältnisswert aus Modell/Versuch beträgt 0,99 bei einer Standardabweichung von 0,08 (COV = 7,8 %).

3.3 Übertragung auf FSH

Die gleiche Herangehensweise kann auf FSH übertragen werden. Im Folgenden wird das Vorgehen bei den einzelnen Furnierschichthölzern kurz erläutert.

Nadel-FSH Typ P

Für Nadel-FSH Typ P können bei Belastung rechtwinklig zu den Furnierlagen ebenso wie für BSH wirksame Querdruckspannungen berechnet werden. Mit den Faktoren $k_a = 1,60$ und $k_b = 0,2$ für eine einseitige Lastausbreitung und $k_a = 1,80$ und $k_b = 0,2$ für eine zweiseitige Lastausbreitung können diese mit Hilfe Gleichung (2) angenähert werden. Mit dem unter Abschnitt 3.2 geschilderten Vorgehen wird eine mittlere mitwirkende Faserlänge je Auflagerseite von $\ell_{d1s} = 40$ mm bestimmt, die im Verformungsbereich von 5 mm bis 15 mm gilt.

Nadel-FSH Typ Q

FSH aus Nadelholz mit Querlagen verhält sich in beiden Lastkonfigurationen wie Nadel-FSH Typ P. Durch die quer verklebten Furnierlagen ist das Verhalten jedoch steifer, insbesondere, wenn die Last parallel zu den Furnierlagen aufgebracht wird.

Da in den Versuchen bei Beanspruchung rechtwinklig zu den Furnierlagen selbst bei großen Verformungen kein Lastabfall zu verzeichnen war, kann der hier vorgestellte Ansatz verwendet werden.

Eine Betrachtung der wirksamen Querdruckspannungen (Abb. 11) zeigt ein ähnliches Bild wie für Brett-schichtholz. Jedoch werden die gleichen Spannungswerte erst bei größeren Verformungen erreicht, was

bedeutet, dass sich der Werkstoff weicher verhält. Dies ist in den oben angegebenen Werten für die Elastizitätsmoduln begründet. Die Faktoren $k_a = 1,40$ und $k_b = 0,2$ können sowohl für eine Berechnung mit einer einseitigen als auch mit einer zweiseitigen Lastausbreitung verwendet werden. Die berechnete mitwirkende Faserlänge ist in Abb. 12 dargestellt. Der negative Wert in der Reihe SE400 kann dabei mit einem Anfangsschlupf im Versuchsaufbau erklärt werden. Die so ermittelten Werte steigen bis zu einer Verformung von 3 mm linear an. Danach beginnen sich auch hier plastische Effekte bemerkbar zu machen, was in diesem Fall heißt, dass die Fasern zu reißen beginnen. Über alle Werte lässt sich ein Mittelwert von $\ell_{dis} = 45$ mm bilden. Für eine zweiseitige Lastausbreitung berechnet sich ein Wert von $\ell_{dis} = 40$ mm, wobei hier bereits bei 2 mm Verformung die Fasern an der Trägeroberkante abzureißen beginnen. Für den Modellansatz wird ein Wert von $\ell_{dis} = 40$ mm gewählt, der wiederum für eine Verformung von 5 mm bis 15 mm gilt. Darunter darf linear interpoliert werden.

Abb. 13 zeigt den Vergleich der mit Gleichung (4) berechneten Tragfähigkeiten und den Versuchsergebnissen in einem Verformungsbereich von 1 mm bis 15 mm. Alle untersuchten Auflagerlängen von 50 mm bis 400 mm sind enthalten. Der mittlere Verhältniswert beträgt 0,98 bei einer Standardabweichung von 0,08 (COV = 8,2 %).

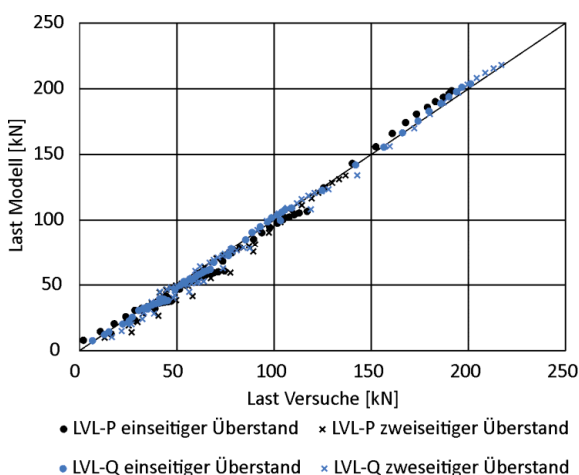


Abb. 13 Vergleich der berechneten Tragfähigkeiten mit den Versuchswerten für Nadel-FSH \perp im Verformungsbereich 1 bis 15 mm

Buchen-FSH Typ P

Bei Buchen-FSH Typ P \parallel konnte in Trägerversuchen (im Gegensatz zu den Versuchen nach EN 408) bei einer Belastung parallel zu den Furnierlagen kein Abfall in den Last-Verformungs-Kurven festgestellt werden.

Die effektiven Spannungen sind in Abb. 14 dargestellt. Auf Grund der deutlich höheren Querdruckfestigkeit von Buchen-FSH sind die erreichten Spannungen ebenfalls höher. Diese liegen für eine Verformung von 14 mm bei etwa 20 MPa bis 25 MPa. Diese Spannungswerte können mit den Faktoren $k_a = 1,60$ und $k_b = 0,15$ für eine Näherung mit Hilfe der Gl. (2) verwendet werden. Die Abweichungen der Näherungsfunktion gegenüber den berechneten Werten sind auf den ersten Blick größer als bei den übrigen bisher betrachteten Werkstoffen.

Abb. 15 zeigt die mitwirkenden Faserlängen für Buchen-FSH Typ P \parallel für eine am Ende belastete Schwelle. Auch hier ist für eine zunehmende Verformung quer zur Faser eine kontinuierliche Zunahme der mitwirkenden Faserlänge erkennbar. Über alle Verformungsschritte berechnet sich ein Mittelwert $\ell_{dis} = 37$ mm für eine einseitige Lastausbreitung. Für eine zweiseitige Lastausbreitung beträgt $\ell_{dis} = 28$ mm. Um das Modell einfach zu halten, wird ein Wert von $\ell_{dis} = 30$ mm gewählt. Da dieser kleiner ist als der für eine einseitige Lastausbreitung bestimmte Wert, müssen die berechneten Tragfähigkeiten quer zur Faser mit Hilfe der Näherung der effektiven Spannungen etwas nach oben korrigiert werden. Daher trifft die Näherung für Buchen-FSH Typ P für eine einseitige Lastausbreitung nicht die berechneten effektiven Spannungen, ist jedoch aus praktischen Gründen notwendig. Für einen zweiseitigen Überstand sind die gleichen Werte für k_a und k_b gültig. Der Vergleich der berechneten Lasten mit den in den Versuchen erreichten führt zu einem mittleren Verhältnis von 0,99 bei einer Standardabweichung von 0,09 (COV = 9,1 %).

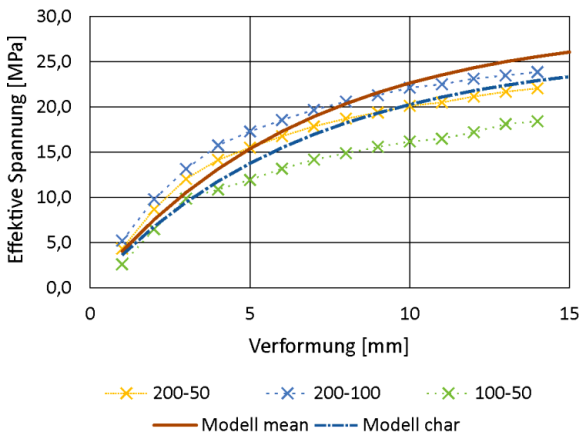


Abb. 14 Wirksame Spannungen für Buchen-FSH Typ P ||, Serie SE

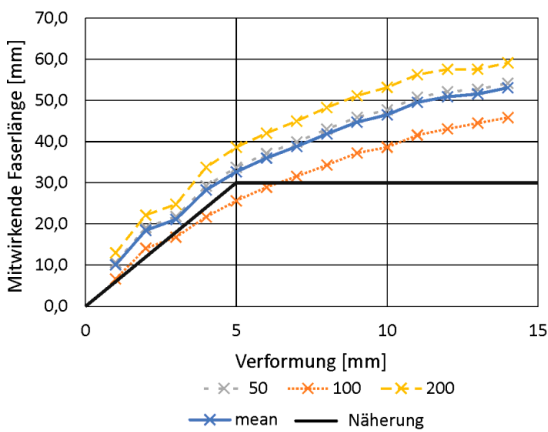


Abb. 15 Mitwirkende Faserlänge für Buchen-FSH Typ P ||, Reihe SE

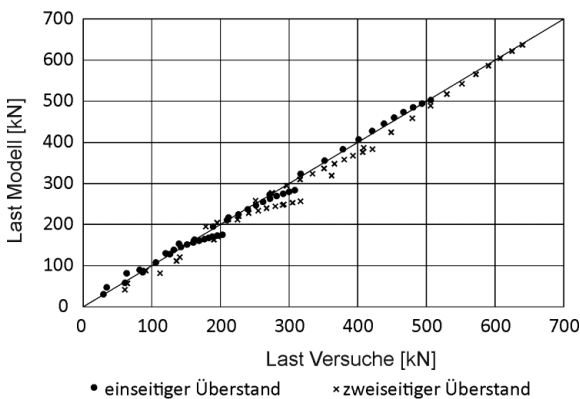


Abb. 16 Vergleich der berechneten Tragfähigkeit mit den Versuchswerten bei Buchen-FSH Typ Q im Verformungsbereich 1 mm bis 15 mm

Buchen-FSH Typ Q

Buchen-FSH Typ Q verhält sich ähnlich wie Nadel-FSH Typ Q. Ebenso wie bei den anderen Materialien lassen sich unter der Kontaktfläche wirkende Querdrukkspannungen berechnen. Diese liegen für eine Beanspruchung rechtwinklig zur Furnierorientierung bei einer Verformung von 14 mm bei rund 20 N/mm² und können mit Hilfe von Gl. (2) unter Verwendung von $k_a = 1,5$ und $k_b = 0,15$ für eine einseitige und $k_a = 2,0$ und $k_b = 0,10$ für eine zweiseitige Lastausbreitung approximiert werden. In beiden Fällen lässt sich eine mitwirkende Faserlänge von $\ell_{dis} = 40$ mm berechnen. Im Vergleich der mit Gleichung (4) berechneten Tragfähigkeiten mit den Versuchswerten ergibt sich im Verformungsbereich von 1 mm bis 15 mm ein Mittelwert von 0,99 bei einer Standardabweichung von 0,08. Auf Grund der höheren Reststeifigkeit bei großen Verformungen nehmen die Abweichungen mit zunehmenden Verformungen zu (Abb. 16), die berechneten Tragfähigkeiten sind jedoch konservativ.

Eine Zusammenfassung der bestimmten Parameter k_a , k_b und ℓ_{dis} ist am Ende des Beitrags im vorgestellten Bemessungsvorschlag zu finden.

3.4 Werkstoffe mit einem abnehmendem Tragverhalten bei großen Verformungen

Die Werkstoffe Nadel-FSH Typ P || und Q || sowie Buchen-FSH Typ P ⊥ und Typ Q || zeigen abnehmende Lasten bei größeren Verformungen, d. h. es lässt sich in den Versuchen eine Höchstlast bestimmen. Die maximale Tragfähigkeit kann auf ähnliche Weise bestimmt werden, jedoch entfällt die verformungs-basierte Berechnung. Für diesen Zweck wird der Querdrukkbeiwert $k_{c,90}$ in Gl. (2) für die maximale Last bei entsprechender Verformung bestimmt.

Im Fall von Nadel-FSH Typ P mit einer Beanspruchung parallel zu den Furnierlagen wurde eine abnehmende Last bei zunehmender Verformung auf Grund der ausknickenden Furniere festgestellt (siehe Abb. 3). Die Berechnung von $k_{c,90}$ erfolgt lediglich für eine Verformung von 6 mm, da bei dieser Verformung die Höchstlast erreicht ist. Der Wert $k_{c,90} = 1,0$ ist passend für die Berechnung der Tragfähigkeit. Die mitwirkende Faserlänge wird zu $\ell_{dis} = 25$ mm bestimmt,

die bei Erreichen der Tragfähigkeit wirksam ist. Auf Grund der Höchstlast bei einer Verformung von 6 mm sollte in diesem Fall immer ein GZT betrachtet werden, da ein Überschreiten dieser Verformung zum Versagen des Querschnitts führt.

Für Nadel-FSH Typ Q mit paralleler Beanspruchung zu den Furnierlagen wurde wie bei Typ P ebenfalls ein Lastabfall in den Versuchen festgestellt. Die Furnierlagen beginnen bei einer aufgebrachten Verformung von 2 mm bis 4 mm auszuknicken. An diesem Punkt lassen sich Werte von $\ell_{dis} = 25$ mm sowie $k_{c,90} = 1,3$ berechnen, die zur Berechnung der Tragfähigkeit im GZT verwendet werden können.

Auf Grund des Rollschubversagens bei größeren Verformungen wurde für eine Beanspruchung senkrecht zu den Furnierlagen bei Buchen-FSH Typ P auch in Trägerversuchen eine abnehmende Last mit zunehmender Verformung gemessen. Die Berechnung von ℓ_{dis} ergibt einen Wert von 30 mm je Seite. Obwohl die Tragfähigkeit bis zu einer Verformung von 14 mm ansteigt, wird nur ein Wert von $k_{c,90} = 1,6$ als sinnvoll erachtet, da die Schädigung nicht lokal ist, sondern sich bei Erreichen der Tragfähigkeit auf den gesamten Querschnitt auswirkt (siehe Abb. 5).

Wie in Abschnitt 2.3 angegeben, war bei einer Belastung parallel zu den Furnierlagen bei Buchen-FSH Typ Q eine Höchstlast in den Versuchen feststellbar. Daher werden für die Berechnung der Tragfähigkeit Werte von $\ell_{dis} = 30$ mm sowie für eine Verformung von 10 mm $k_{c,90} = 1,35$ vorgeschlagen.

4 Diskussion des Bemessungsansatzes

Im aktuell gültigen Bemessungsmodell des EC5 ist es nicht möglich, Aussagen über die auftretenden Verformungen bei Querdruckbeanspruchung zu machen. Ebenso scheint eine Berechnung in Abhängigkeit der Stauchung (vergleiche [7]) nicht sinnvoll, da sich für hohe Träger damit unrealistisch große Verformungen ergeben. Daher muss in diesem Fall eine Begrenzung der Trägerhöhe erfolgen, wie von Leijten 2016 vorgeschlagen [8], der die rechnerische Trägerhöhe auf 140 mm begrenzt. Dies deckt sich mit den

hier vorgestellten Ergebnissen, wo im oberen Trägerbereich bis in eine Tiefe von 150 mm rund 90 % der Gesamtverformung aufgetreten ist.

In vielen Fällen scheint die Betrachtung eines GZT für bestimmte Holzprodukte nicht notwendig. Dies gilt insbesondere für Schwellen. Ausnahmen hingegen bilden diskrete Trägerauflager, z. B. Zwischenaufleger von Durchlaufträgern, wo lokale Verformungen die effektive Trägerhöhe reduzieren und so die Höhe von Biege- und Schubspannungen beeinflussen. Daher können große Verformungen, hervorgerufen durch eine Querdruckbeanspruchung, zu einem Tragfähigkeitsversagen, z. B. unter Biegung führen. Im Gegensatz dazu ist für kontinuierlich gelagerte Träger oder Endauflager eine Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) passender, da hier kein Versagen auf Grund einer Querdruckbeanspruchung auftritt. Daher sollte der bemessende Ingenieur in jedem Fall entscheiden, ob ein Sekundärversagen, verursacht durch Querdruckverformungen, auftreten kann oder nicht. In beiden Fällen ist es möglich, die Tragfähigkeit quer zur Faser durch die zugelassenen Verformungen zu begrenzen. Auf Grund der geringeren Teilsicherheitsbeiwerte für Nachweise im GZG ($\gamma = 1,0$) ist es daher möglich, höhere Lasten zu übertragen, ohne ein Versagen zu riskieren. Natürlich muss dem Ingenieur bewusst sein, dass die Wahrscheinlichkeit des Eintretens der angesetzten Verformungen signifikant größer ist als im GZT. Analog zu Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln ist eine maximale Verformung von 15 mm zulässig. Ein kurzes Beispiel soll die Funktion verdeutlichen: In BSH wird die Verformung von 15 mm im GZG in einigen Fällen erreicht werden, wohingegen im GZT lediglich Verformungen von 1,5 mm bis 3 mm zu erwarten sind. Dieser Verformungswert ist das Resultat aus der Annahme des maximal möglichen Wertes für $k_{c,90} = 1,7$ sowie der Teilsicherheitsbeiwerte γ_F und γ_M .

Das vorgestellte Bemessungsmodell liefert einen sinnvollen Ansatz, da eine direkte Berechnung der Querdrucktragfähigkeit in Abhängigkeit der zu erwartenden Verformung möglich ist. Es muss zwischen einer einseitigen und zweiseitigen Lastausbreitung unterschieden werden, wobei von einer zweiseitigen Lastausbreitung ausgegangen werden kann, wenn die Lasteinleitungsfläche einen Mindestabstand von

200 mm zum Trägerende einhält. Der Hauptteil der Verformungen wird dabei auf den vertikalen Nahbereich der Kontaktfläche begrenzt, was ebenso für höhere Träger gilt. Für flachere Träger kann der vorgestellte Ansatz ebenso verwendet werden, wobei die berechneten Tragfähigkeiten konservativ sind. Hier wäre für die Zukunft die Modifikation mit Hilfe eines Faktors denkbar, der die Trägerhöhe berücksichtigt. Die mitwirkende Faserlänge l_{dis} ist dabei analog zu EC5 auf einen seitlichen Trägerüberstand a oder die Kontaktlänge l zu begrenzen die gleichen Grenzwerte wie im EC5 angegeben. Nichtsdestotrotz ist eine Evaluierung des Modells mit einer größeren Stichprobe sowie die Überprüfung der Anwendbarkeit auf Träger mit einer größeren Höhe als 250 mm wünschenswert.

5 Gegenüberstellung EC5

Im Folgenden sollen der hier vorgestellte Bemessungsansatz sowie das Berechnungsmodell des EC5 im GZT und GZG für BSH miteinander verglichen werden. Dabei wird so vorgegangen, dass die Gleichungen (1) und (4) so umgestellt werden, dass alle tragfähigkeitserhöhenden Anteile im Faktor X zusammengefasst werden:

$$\frac{F_{c,90,k}}{A} = X \cdot f_{c,90,k} \cdot k_{mod} \quad (5)$$

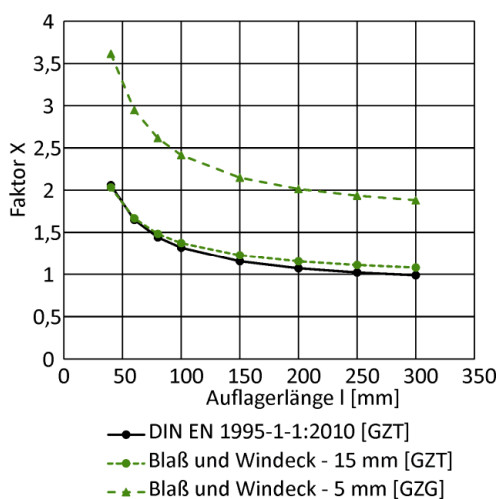


Abb. 17 Faktor X im GZT und GZG für eine mittig belastete Schwelle aus BSH

Der Faktor X beinhaltet dabei den Einfluss der mitwirkenden Faserlänge l_{mit} bzw. l_{dis} sowie den Querdruckbeiwert $k_{c,90}$. Die Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_F = 1,4$ und $\gamma_M = 1,3$ werden ebenfalls im Faktor X berücksichtigt.

Beispielhaft soll eine mittig belastete Schwelle betrachtet werden. Abb. 17 zeigt die Werte für den Faktor X in Abhängigkeit der Auflagerlänge. Für eine mittig belastete Schwelle im GZT ($\gamma_F = 1,4$ und $\gamma_M = 1,3$) liegen beide Bemessungsmodelle auf einem Niveau, d. h., dass in beiden Modellen die Querdruckfestigkeit um den gleichen Faktor erhöht wird und damit auch ähnliche Tragfähigkeiten resultieren. Der hier vorgestellte Ansatz ermöglicht jedoch im GZG ($\gamma_F = \gamma_M = 1,0$) eine um ca. 70 % erhöhte Ausnutzung für Schwellen gegenüber der aktuell gültigen Normung im EC5, wenn Verformungen von 5 mm für das Tragwerk verträglich sind.

6 Anwendungsbeispiele

Beispielhaft soll im Folgenden eine mittig belastete Schwelle aus BSH sowie Buchen-FSH Typ P || betrachtet werden, um die Unterschiede zwischen dem EC5 und dem hier vorgestellten Ansatz in der Bemessung aufzuzeigen. Das Bauteil habe einen Querschnitt von (BxH) 100x250 mm² und die Auflagerlänge betrage $l = 100$ mm. Zur Berechnung wird die in den Versuchen bestimmte charakteristische Querdruckfestigkeit $f_{c,90,k}$ herangezogen sowie der Modifikationsbeiwert $k_{mod} = 1,0$ gesetzt.

Es ist ersichtlich, dass das hier vorgestellte Modell in der Lage ist, die Tragfähigkeiten im GZT gut zu reproduzieren (siehe Tab. 5 und Tab. 6). Dies ist jedoch nur für mittig belastete Schwellen der Fall, da bei dieser Konfiguration auch mit dem EC5-Modell eine gute Übereinstimmung erreicht wurde (siehe Abb. 6). Für andere Laststellungen treten gegenüber dem EC5 teils starke Abweichungen auf, da mit der aktuellen Normung die in den Versuchen erreichten Tragfähigkeiten überschätzt werden.

Im präsentierten Modellansatz ist eine Umrechnung der Tragfähigkeiten in Bemessungswerte für Schwellen jedoch nicht notwendig, da kein Versagen eintreten kann. Die berechneten Werte im GZG erscheinen

niedrig, jedoch muss angemerkt werden, dass die Teilsicherheitsbeiwerte γ_F auf der Einwirkungsseite zu 1,0 angesetzt werden können. Daher ist die aufbringbare Last deutlich größer als nach EC5. Sind Verformungen bis zu 15 mm verträglich mit dem Bauwerk, kann die Last unter Berücksichtigung aller Teilsicherheitsbeiwerte ($\gamma_F = \gamma_M = 1,0$) gegenüber dem GZT für BSH um bis zu 90 % und für Buchen-FSH Typ P || um bis zu 130 % gesteigert werden.

Tab. 5 Beispielrechnung für BSH

EC5	
A_{ef}	$= 100 \cdot (100 + 2 \cdot 30) = 16000 \text{ mm}^2$
$k_{c,90}$	$= 1,5$
$f_{c,90,k}$	$= 2,75 \text{ MPa}$
$F_{c,90,k}$	$= A_{ef} \cdot k_{c,90} \cdot f_{c,90} = 66,0 \text{ kN}$
$F_{c,90,d}$	$= \frac{1,0}{1,3} \cdot 66,0 = 50,7 \text{ kN}$
Modell	
u	$= 15 \text{ mm}$ im GZT
$k_{c,90}$	$= 1,7 \cdot (1 - e^{-0,6 \cdot u}) = 1,70$
$F_{c,90}^{GZT}$	$= 100 \cdot (1,70 \cdot 100 + 2 \cdot 40) \cdot 2,75 = 68,7 \text{ kN}$
$F_{c,90,d}$	$= \frac{1,0}{1,3} \cdot 68,7 = 52,9 \text{ kN}$
Modell	
u	$= 15 \text{ mm}$ im GZG
$F_{c,90}^{GZG}$	$= 100 \cdot (1,70 \cdot 100 + 2 \cdot 40) \cdot 2,75 = 68,7 \text{ kN}$
Modell	
u	$= 5 \text{ mm}$ im GZG
$k_{c,90}$	$= 1,7 \cdot (1 - e^{-0,6 \cdot u}) = 1,62$
$F_{c,90}^{GZG}$	$= 100 \cdot (1,62 \cdot 100 + 2 \cdot 40) \cdot 2,75 = 66,5 \text{ kN}$

Insbesondere für FSH lassen sich auf Grund der hohen Reststeifigkeit unterschiedliche Tragfähigkeiten bei verschiedenen Verformungen berechnen. Ist eine Verformung von 5 mm verträglich mit der Konstruktion, kann eine Last von 235 kN übertragen werden, wohingegen nach EC5 eine charakteristische Last von $201 \text{ kN}/\gamma_F = 143 \text{ kN}$ aufgebracht werden kann. Daher kann mit dem vorgestellten Berechnungsmodell die charakteristische Last um 65 % gesteigert werden, obwohl vergleichsweise geringe Verformungen angesetzt werden.

Tab. 6 Beispielrechnung für Buchen-FSH Typ P

EC5	
A_{ef}	$= 100 \cdot (100 + 2 \cdot 30) = 16000 \text{ mm}^2$
$k_{c,90}$	$= 1,0$
$f_{c,90,k}$	$= 16,3 \text{ MPa}$
$F_{c,90,k}$	$= 261 \text{ kN}$
$F_{c,90,d}$	$= \frac{1,0}{1,3} \cdot 261 = 201 \text{ kN}$
Modell	
u	$= 15 \text{ mm}$ im GZT
$k_{c,90}$	$= 1,6 \cdot (1 - e^{-0,15 \cdot u}) = 1,43$
$F_{c,90}^{GZT}$	$= 100 \cdot (1,43 \cdot 100 + 2 \cdot 30) \cdot 16,3 = 331 \text{ kN}$
$F_{c,90,d}$	$= \frac{1,0}{1,3} \cdot 331 = 255 \text{ kN}$
Modell	
u	$= 15 \text{ mm}$ im GZG
$F_{c,90}^{GZG}$	$= 100 \cdot (1,43 \cdot 100 + 2 \cdot 30) \cdot 16,3 = 331 \text{ kN}$
Modell	
u	$= 5 \text{ mm}$ im GZG
$k_{c,90}$	$= 1,6 \cdot (1 - e^{-0,15 \cdot u}) = 0,84$
$F_{c,90}^{GZG}$	$= 100 \cdot (0,84 \cdot 100 + 2 \cdot 30) \cdot 16,3 = 235 \text{ kN}$

7 Bemessungsvorschlag

Auf der Basis von 386 Versuchen wurde gezeigt, dass der Faktor $k_{c,90}$ unabhängig von der Auflagersituation ist und nach der Art der Lastausbreitung (einseitig/zweiseitig) unterschieden werden sollte. Dies bildet die Grundlage für den folgenden Bemessungsvorschlag, in dem die zu erwartenden Verformungen direkt berücksichtigt werden können.

7.1 Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Die folgende Bedingung ist zu erfüllen:

$$\sigma_{c,90,d} \leq f_{c,90,d}$$

Wobei gilt:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}}$$

mit:

$\sigma_{c,90,d}$ ist der Bemessungswert der Spannung rechtwinklig zur Faser in der Kontaktfläche

$F_{c,90,d}$ ist der Bemessungswert der Kraft rechtwinklig zur Faser

A_{ef} ist die effektive Kontaktfläche

$f_{c,90,d}$ ist der Bemessungswert der Festigkeit rechtwinklig zur Faser

$k_{c,90}$ ist ein Faktor, der die Lastkonfiguration, die Möglichkeit eines Aufspalten sowie den Grad der Verformung berücksichtigt

Die effektive Kontaktfläche rechtwinklig zur Faser, A_{ef} , kann unter Berücksichtigung der effektiven Kontaktlänge in Faserrichtung bestimmt werden, wobei die modifizierte Kontaktlänge, $k_{c,90} \cdot \ell$, auf jeder Seite um die Länge ℓ_{dis} verlängert werden kann.

$$A_{ef} = b \cdot (k_{c,90} \cdot \ell + \ell_{dis,left} + \ell_{dis,right})$$

mit:

$$\ell_{dis} = \min\{\ell; \ell_{pro} \cdot \min(1; a / 150; \ell_1 / 300)\}$$

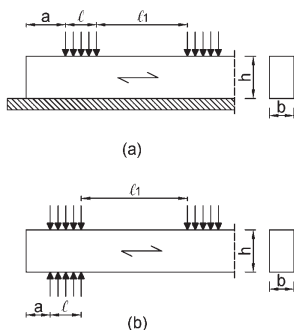


Abb. 18 (a) kontinuierlich gelagerter Träger und (b) mit Einzellagerung

Für $k_{c,90}$ gelten die folgenden Werte, sonst gilt $k_{c,90} = 1,0$ sowie $\ell_{dis} = 0$.

Material	Lastrichtung	$k_{c,90}$ für				Große Verformungen zulässig
		$a < 150$ mm oder $\ell_1 < 300$ mm	$a \geq 150$ mm und $\ell_1 \geq 300$ mm	ℓ_{pro} [mm]		
Vollholz und BSH aus Nadelholz	-	1,5	1,7	40	Ja ¹⁾	
Nadel-FSH Typ P	\perp	1,5	1,7	40	Ja ¹⁾	
Nadel-FSH Typ P	\parallel	1,0		25	Nein	
Nadel-FSH Typ Q	\perp	1,4		40	Ja ¹⁾	
Nadel-FSH Typ Q	\parallel	1,3		25	Nein	
Buchen-FSH Typ P	\perp	1,6		30	Nein	
Buchen-FSH Typ P	\parallel	1,4		40	Ja ¹⁾	
Buchen-FSH Typ Q	\perp	1,3		30	Ja ¹⁾	
Buchen-FSH Typ Q	\parallel	1,3		30	Nein	

¹⁾ Wenn größere Verformungen keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit oder die Stabilität des Systems haben, dürfen die Teilsicherheitsbeiwerte γ_F und γ_M zu 1,0 angenommen werden

7.2 Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Die Verformung u rechtwinklig zur Faser in einer Kontaktfläche kann durch eine Begrenzung der eingeleiteten Kraft eingeschränkt werden.

$$F_{c,90,k} \leq k_{mod} \cdot f_{c,90,k} \cdot b \cdot (k_a \cdot (1 - e^{-k_b \cdot u}) \cdot \ell + \ell_{dis,left} + \ell_{dis,right})$$

mit:

$$\ell_{dis} = k_u \cdot \min\{\ell; \ell_{pro} \cdot \min(1; a / 150; \ell_1 / 300)\}$$

$$k_u = \min\{1; u / 5 \text{ mm}\}$$

mit:

$F_{c,90,k}$ ist die charakteristische Last rechtwinklig zur Faser

$f_{c,90,k}$ ist die charakteristische Festigkeit rechtwinklig zur Faser

b ist die Breite der Kontaktfläche rechtwinklig zur Faser

u ist die gewählte Begrenzung der Verformung in der Kontaktfläche in mm

Material	Lastrichtung	a < 150 mm oder $\ell_1 < 300$ mm		a \geq 150 mm und $\ell_1 \geq 300$ mm		ℓ_{pro} [mm]	Max u [mm]
		k_a	k_b	k_a	k_b		
Vollholz und BSH aus Nadelholz	-	1,5	0,4	1,7	0,6	40	15
Nadel-FSH Typ P	\perp	1,6	0,2	1,8	0,2	40	15
	\parallel	1,8	0,2	1,8	0,2	25	4
Nadel-FSH Typ Q	\perp	1,4	0,2	1,4	0,2	40	15
	\parallel	2,4	0,2	2,4	0,2	25	4
Buchen-FSH Typ P	\perp	3,5	0,15	3,5	0,15	30	4
	\parallel	1,6	0,15	1,6	0,15	40	15
Buchen-FSH Typ Q	\perp	1,5	0,15	1,5	0,15	30	15
	\parallel	3,0	0,15	3,0	0,15	30	4

Für die Bezeichnungen gilt Abb. 18 analog.

7.3 Festigkeitswerte

Die charakteristischen Querdruckfestigkeiten sind nicht Bestandteil des Bemessungsvorschlags, werden der Vollständigkeit halber aber in Tab. 7 angegeben.

Tab. 7 Charakteristische Festigkeitswerte $f_{c,90,k}$ der untersuchten Holzwerkstoffe

Material	Lastrichtung	$f_{c,90,k}$ [N/mm ²]
Vollholz und BSH aus Nadelholz	-	2,75
Nadel-FSH Typ P	\perp	3,0
	\parallel	8,0
Nadel-FSH Typ Q	\perp	3,2
	\parallel	8,2
Buchen-FSH Typ P	\perp	14,8
	\parallel	16,3
Buchen-FSH Typ Q	\perp	14,6
	\parallel	18,5

8 Fazit

Im Grundsatz beschreibt der Ansatz die Last-Verformungs-Kurven der durchgeführten Versuche. Das Modell ermöglicht die Berechnung der Querdrucktragfähigkeit in direkter Abhängigkeit einer festgelegten Verformungsgrenze und erlaubt eine Abschätzung der Steifigkeit eines Anschlusses. Allgemein ist für die Werkstoffe, für die große Verformungen zulässig sind, eine Bemessung unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte nicht nötig, da kein sprödes Materialversagen eintritt. Nur in Fällen, in denen Verformungen zu übermäßigen Reduktionen der Querschnittsfläche führen und daher höhere Spannungen in Biegung und Schub zur Folge haben können, sollten diese berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu wird empfohlen, Werkstoffe, die nur geringe Verformungen erreichen, immer im GZT zu bemessen da große Schädigungen über den gesamten Querschnitt zu einem Lastabfall bei höheren Verformungen führen. Der entwickelte Ansatz stimmt gut mit den durchgeführten Versuchen in einem Verformungsbereich von 1 mm bis 15 mm Gesamtverformung überein. Die direkte Berücksichtigung der zulässigen Verformungen hebt ihn von den anderen Modellen ab. Dem bemessenden Ingenieur wird so ein genauere Blick auf die Querdruckproblematik ermöglicht, da er von Fall zu Fall in der Lage ist, zu entscheiden, welche Verformung für das Tragwerk verträglich ist. Sind große Verformungen zulässig, können die Teilsicherheitsbeiwerte in der Bemessung zu 1,0 gesetzt werden. Nichtsdestotrotz ist der Modifikationsbeiwert k_{mod} zur Berücksichtigung der Lasteinleitungsdauer und der Holzfeuchte im GZG anzusetzen.

9 Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 1995-1-1:2010-12. Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.
- [2] Blaß, H.J. und Görlacher, R. (2004): Compression perpendicular to the grain. Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering, Lahti, Finland.
- [3] DIN EN 408:2012-10. Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften.
- [4] DIN EN 14358:2013-09. Berechnung der charakteristischen 5%-Quantile und Mittelwerte für Erstprüfung und werkseigene Produktionskontrolle.
- [5] DIN EN 14080:2013-09. Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen.
- [6] Madsen, B. (2001): Behaviour of timber connections. Canadian Journal of Civil Engineering, 28 (3), 546.
- [7] van der Put, T.A.C.M. (2008): Derivation of the bearing strength perpendicular to the grain of locally loaded timber blocks. Holz als Roh- und Werkstoff, 66 (6), 409–417.
- [8] Leijten, A.J.M. (2016): The bearing strength capacity perpendicular to grain of Norway spruce – Evaluation of three structural timber design models. Construction and Building Materials, 105, 528–535.

10 Autor

Lukas Windeck, M.Sc.

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Holzbau und Baukonstruktionen
R.-Baumeister-Platz 1
76131 Karlsruhe

Kontakt:
Lukas.Windeck@kit.edu