

TRAGSICHERHEIT VON QUERANSCHLÜSSEN: Entwicklung eines praxisgerechten Bemessungsverfahrens

WHFF Projekt Nr. 2013.15
Wissenschaftlicher Schlussbericht



Dr. Robert Jockwer
Prof. Dr. Andrea Frangi

Institut für Baustatik und Konstruktion
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Zürich
Januar 2016

Zusammenfassung

Ausgangslage

Im Bereich von Anschlüssen im Holzbau mit einer Kräfteinleitung senkrecht zur Faserrichtung des Holzes können zum Teil sehr grosse Querkzugspannungen entstehen, die zu einem Aufreißen und Versagen des Trägers führen können. Diese Querkzugspannungen müssen daher bereits in der Bemessung ausreichend berücksichtigt werden. In der Norm SIA 265 ist die Gefahr des Querkzugversagens ausdrücklich hingewiesen und es ist generell eine sehr geringe Querkzugfestigkeit angesetzt. Es werden jedoch keine genaueren Angaben darüber gemacht, wie bei der Bemessung von Queranschlüssen die relevanten Querkzugspannungen bestimmt werden können. Es war daher das Ziel dieses Projektes einen Vorschlag für einen praxisgerechten Bemessungsansatz für Queranschlüsse zu erarbeiten.

Grundlagen

In der Literatur sind bereits umfangreiche Untersuchungen zum Tragverhalten von Queranschlüssen zu finden. Diese unterscheiden sich jedoch teilweise stark in Bezug auf die oben definierte Zielsetzung eines einfachen Bemessungsansatzes. Je nach Komplexität der Ansätze können verschiedenste Material- und geometrischen Parameter berücksichtigt werden. Für die Beurteilung der relevanten Parameter und der Bestimmung des geeigneten Bemessungsansatzes wurde eine Versuchsserie an Brettschichtholzträgern mit Queranschlüssen durchgeführt.

Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen des Projektes wurden an der ETH Zürich eine Versuchsserie an Queranschlüssen durchgeführt, um das Trag- und Versagensverhalten der Queranschlüsse genauer zu untersuchen und den Einfluss verschiedener Parameter abzuschätzen. In den Versuchen wurden verschiedene relative Anschlusshöhen zwischen 60% und 80% Prozent der Trägerhöhe und zwei verschiedene Anschlussgeometrien untersucht.

Mithilfe verschiedener Wegmessungen konnte das Verformungsverhalten der Verbindung und die Rissöffnung im Bereich der Verbindungsmittel bestimmt werden. Die Verformungen an der Oberfläche des Trägers im Bereich des Queranschlusses wurden mithilfe optischer Messungen bestimmt. Die so gemessenen Verteilungen der Verformungen konnten dazu verwendet werden, die Dehnungen im Bereich des Queranschlusses zu bestimmen. So konnten die Rissbildung und der Risswachstum berechnet werden und eine Aussage über das Versagensverhalten getroffen werden.

Die Versuche führten unter anderem zu der wichtigen Erkenntnis, dass für Queranschlüsse mit einer relativen Anschlusshöhe über 70% eine Rissbildung zu erwarten ist. Auch an verstärkten Queranschlüssen ist mit einer Rissbildung zu rechnen, die jedoch bei ausreichender Dimensionierung der Verstärkung nicht zum Versagen des Trägers führt.

Auswertung der Versuche und Vorschlag eines Bemessungsansatzes

Die Ergebnisse der im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Versuche wurden zusammen mit einer grossen Anzahl weiterer Versuchsdaten aus der Literatur dazu verwendet, um die vorhandenen Bemessungsansätze aus der Literatur bewerten zu können. Dazu wurden die verschiedenen Einflüsse auf den Tragwiderstand und das Versagensverhalten untersucht. Für eine Auswahl an geeigneten Bemessungsansätzen wurde eine Zuverlässigkeitsanalyse durchgeführt, um die für die Bemessung relevanten Materialparameter zu bestimmen. Somit konnte ein Vorschlag für einen einfachen und sicheren Bemessungsansatz gemacht werden.

Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Erkenntnisse aus diesem Projekt wurden bereits der Normenkommission SIA 265 vorgestellt und diskutiert. Ausserdem konnten die Ergebnisse während des 2nd INTER Meeting 2015 dem internationalen Fachpublikum präsentiert werden. Der Beitrag mit der Nummer INTER/48-7-4 (Jockwer et al. (2015)) wird in die Proceedings des INTER Meetings einfließen und stellt damit als Grundlage für weitere Anpassungen der Bemessungsangaben für Queranschlüsse in der Europäischen Norm EN 1995-1-1 zur Verfügung. Dies ist von besonderer Bedeutung um auch gerade vor dem Hintergrund der Arbeiten an der Revision der EN 1995-1-1 zur Verbesserung einer praxisgerechten Bemessung beitragen zu können.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage	1
1.2	Zielsetzung	3
2	Bemessungsansätze	5
2.1	Einleitung	5
2.2	Hintergrund der Bemessungsansätze	6
2.2.1	Ehlbeck et al. (1989)	6
2.2.2	Lignum (1990)	8
2.2.3	van der Put (1990)	9
2.2.4	Larsen and Gustafsson (2001)	9
2.2.5	Jensen et al. (2012)	10
2.2.6	Ballerini (2004)	10
2.2.7	Franke and Quenneville (2011)	11
2.2.8	Zarnani and Quenneville (2013)	11
2.2.9	Weitere Bemessungsansätze	12
2.3	Bemessungsansätze in den Normen	12
2.3.1	DIN 1052	12
2.3.2	EN 1995-1-1	13
2.3.3	CSA O.86-09	14
2.3.4	Vorschlag für NZS 3603	15
2.4	Vergleich zwischen den Ansätzen	15
2.4.1	Einfluss geometrischer Parameter	15
2.4.2	Berücksichtigung der Materialeigenschaften	18
3	Experimentelle Untersuchungen	19
3.1	Versuchsserie ETH	19
3.1.1	Prüfkörper	19
3.1.2	Versuchsaufbau und Messungen	22
3.1.3	Materialeigenschaften	23

3.1.4	Prognose	25
3.1.5	Ergebnisse	26
3.1.6	Versagen des Verbindungsmittel	29
3.1.7	Rissöffnung	31
3.1.8	Risslängenmessungen	33
3.2	Versuche aus der Literatur	35
3.2.1	Verwendete Versuche	35
3.2.2	Träger und Anschlussgeometrie	35
3.2.3	Material	36
3.2.4	Verbindungsarten	36
4	Beurteilung der Bemessungsansätze	39
4.1	Vorhersagequalität unterschiedlicher Ansätze	39
4.2	Beurteilung ausgewählter Bemessungsansätze	41
4.2.1	Einfluss der Trägerhöhe	41
4.2.2	Einfluss der relativen Anschlusshöhe	45
4.2.3	Einfluss der Anschlussgeometrie	45
4.2.4	Einfluss des relativen Durchmessers der Verbindungsmittel	45
4.2.5	Einfluss der Anzahl der Verbindungsmittel	45
4.2.6	Streuung der Materialparameter	46
4.3	Zuverlässigkeitsanalyse	47
4.3.1	Hintergrund zur vorliegenden Zuverlässigkeitstheorie	47
4.3.2	Zuverlässigkeitsanalyse an Queranschlüssen	48
4.3.3	Ergebnisse	49
5	Vorschlag eines Bemessungsansatzes	53
5.1	Bemessungsansatz für Queranschlüsse	53
5.2	Materialparameter	53
5.3	Mitwirkende Trägerbreite	54
5.4	Abstand zwischen Queranschlüssen	54
5.5	Maximale und minimale relative Anschlusshöhen	55
5.6	Weitere Einflüsse	55
	Literaturverzeichnis	59

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ausgangslage

Holz verfügt über sehr gute Festigkeitseigenschaften in Faserrichtung, aber nur über sehr geringe Festigkeiten bei Belastung rechtwinklig zur Faser. Gerade bei Zugbeanspruchung rechtwinklig zur Faser besteht daher die Gefahr des Aufreissens und des spröden Versagens des Bauteils. Eine Zugbeanspruchung rechtwinklig zur Faser kann typischerweise bei Queranschlüssen, Ausklinkungen im Auflagerbereich, Durchbrüchen bei Biegeträgern und gekrümmten Trägern und Satteldachträgern vorliegen. Alle diese Bauteile müssen daher sehr sorgfältig bemessen werden, um das Versagensrisiko zu verringern. Für Ausklinkungen, Durchbrüche und gekrümmte Träger und Satteldachträger sind in der Norm SIA 265 (SIA 2012) spezielle Bemessungsansätze mit und ohne Verstärkung angegeben. Für Queranschlüsse wird ein Bemessungsansatz nur für die Verstärkung in der Norm angegeben (Fig. 1.1).

Bauteil	Rissbild	Bemessungsansatz	
		Ohne Verstärkung	Mit Verstärkung
Queranschlüsse		Keine Angaben	Norm SIA 265 Anhang D2 Gl. (140)
Ausklinkungen im Auflagerbereich		Norm SIA 265 Ziffer 5.2.2 Gl. (57)-(60)	Norm SIA 265 Anhang D3 Gl. (141)
Durchbrüche bei Biegeträgern		Norm SIA 265 Ziffer 5.2.3	Norm SIA 265 Anhang D4 Gl. (142)
Gekrümmte Träger und Satteldachträger		Norm SIA 265 Ziffer 5.1 Gl. (52)-(56)	Norm SIA 265 Anhang D5 Gl. (143)

Fig. 1.1: Übersicht über Bauteile mit Querzugspannungen und deren Bemessung nach Norm SIA 265.

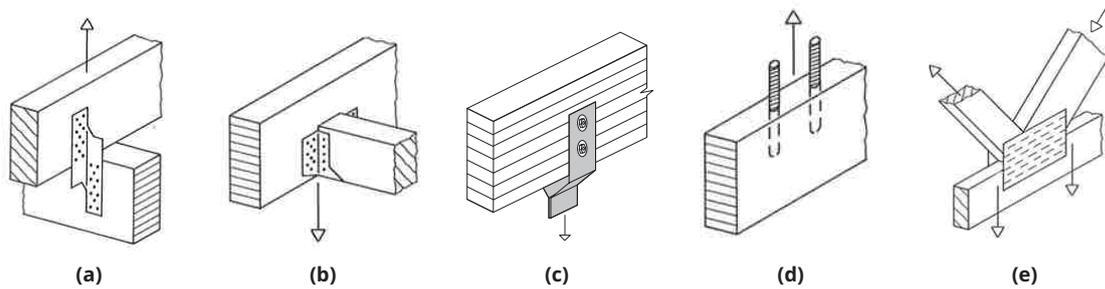


Fig. 1.2: Beispiele von Queranschlüssen: Sparren-Pfetten Verbindung (a), Balkenschuh (b), Bauschraubenanschluss (c), eingeklebte Gewindestangen (d) und Nagelplattenanschluss (e).

Als Queranschlüsse werden Verbindungen bezeichnet, bei denen die Last an einen Hauptträger rechtwinklig zur Trägerlängsachse, und damit rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes, angehängt wird. In Fig. 1.2 sind verschiedene Arten von Queranschlüssen dargestellt. Sie treten beim Anschluss von Nebenträgern an Hauptträgern auf, wie etwa bei Pfettenanschlüssen unter Verwendung von Balkenschuhen (Fig. 1.2 (b)), oder beim Anhängen von Lasten oder Bauteilen (Fig. 1.2, (c) und (d)).

Als Verbindungsmittel werden Stabdübel oder Bauschrauben (Fig. 1.3) in Holz-Holz-Verbindungen oder in Stahl-Holz-Verbindungen mit eingeschlitzten innenliegenden Blechen verwendet. Fachwerkträger kleinerer Dimensionen können mit eingepressten Nagelplattenverbindungen kostengünstig hergestellt werden. Stahlformteile wie etwa Balkenschuhe werden genagelt und lassen sich schnell und einfach einsetzen (Fig. 1.2, (a) und (b)).

In Queranschlüssen wirkt eine Kraftkomponente rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes. Liegt der Queranschluss im oberen Bereich des Hauptträgers, wird die Kraft hauptsächlich über Querdruck und Schub übertragen. Je weiter unten der Anschluss liegt, desto grösser ist die Komponente der Kraft, die durch Schub und Querkraft in den oberen Trägerbereich übertragen werden muss. Gerade im Bereich von lokaler konzentrierter Krafteinleitung kann diese Querkraftbeanspruchung Risse hervorrufen. Wie in Fig. 1.1 dargestellt, tritt das Aufreis-



Fig. 1.3: Beispiele von Queranschlüssen mit Bauschrauben.

sen meist im Bereich des vom beanspruchten Rand am entferntesten liegenden Verbindungsmittels auf. Da die Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faser beim Holz sehr gering und das Versagen spröde ist, sollten Quersugbeanspruchungen grundsätzlich vermieden werden. Darüber hinaus streuen die Festigkeiten beim Holz sehr stark. Um die Gefahr des Aufreissens und des Versagens des Bauteils zu verringern, sollte der Queranschluss auf der unbeanspruchten Trägerseite angeschlossen werden. Wenn dies nicht möglich ist, müssen besondere Vorkehrungen (z.B. Verstärkungen) getroffen werden, um das Risiko des Aufreissens an diesen Stellen zu verringern.

In der Schweizer Norm für die Bemessung von Holztragwerken SIA 265 (SIA 2012) liegen keine Bemessungsansätze für Queranschlüsse vor. Ein empirischer Ansatz für die Bemessung von Queranschlüssen war in der deutschen Norm DIN 1052 (DIN 2008) angegeben. Dieser wurde vor allem auf Grundlage von Versuchen an Nagelplattenverbindern aufgestellt. Ein theoretischer Bemessungsansatz basierend auf bruchmechanischen Modellen ist in der europäischen Norm EN 1995-1-1 (Eurocode 5, EC5) (CEN 2004) enthalten. Er wurde vor allem auf Grundlage von Modellen für Stabdübelverbindungen hergeleitet.

In den nächsten Jahren ist eine totale Revision aller Eurocodes, darunter auch des Eurocode 5, geplant. Der Abschnitt zu Queranschlüssen muss überarbeitet werden. Dafür ist eine genaue Kenntnis über die Zuverlässigkeit des Bemessungsansatzes notwendig und es muss untersucht werden, in welchen Bereichen der Ansatz günstigere oder ungünstigere Ergebnisse im Vergleich mit anderen Ansätzen liefert. Als erste direkte Massnahme zum Erreichen eines anwenderfreundlichen Europäischen Normenwerks im Sinne des Schweizer Konzeptes steht die Überprüfung, Bewertung und Anpassung bestehender Bemessungsansätze.

Diese Überlegungen haben das Institut für Baustatik und Konstruktion IBK der ETH Zürich in Absprache mit der Normkommission SIA 265 dazu bewogen, diese Forschungsarbeit zur Tragbarkeit und Bemessung von Queranschlüssen zu initiieren.

1.2 Zielsetzung

Zielsetzung des Projektes war die Analyse und Bewertung vorhandener Bemessungsansätze für das Tragverhalten von Queranschlüssen und die Entwicklung eines verbesserten Modells für eine sichere und wirtschaftliche Bemessung von Queranschlüssen sowie eine praxisgerechte Implementierung in der nationalen Normierung (Norm SIA 265) und später in der Europäischen Normierung (EN 1995-1-1). Für die Beurteilung von ausgewählten Bemessungsverfahren wurden experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen durchgeführt. Die Versuche wurden im Versuchsstand an der ETH Zürich durchgeführt. Im Gegensatz zu bestehenden Bemessungsmodellen berücksichtigt der in diesem Projekt entwickelte Bemessungsansatz nicht nur das theoretische Tragverhalten des Queranschlusses, sondern auch gerade in Bezug auf die Praxis die Anwendungsgrenzen für Queranschlüsse. Zudem ermöglicht der neu entwickelte Bemessungsansatz eine zukünftige Anwendung auf Bauteile aus Laubholz oder hybride Bauteile (d.h. Elemente zusammengesetzt aus unterschiedlichen Holzarten).

Kapitel 2

Bemessungsansätze

2.1 Einleitung

Die einheitlichen Bezeichnungen der geometrischen Parameter des Queranschlusses sind in Fig. 2.1 dargestellt. Die Grösse der Querkzugbeanspruchung am Queranschluss ist vor allem vom Abstand αh der obersten Verbindungsmittelreihe von der auf Zug beanspruchten Seite Trägerseite abhängig. Die absolute Trägerhöhe h hat ebenfalls einen deutlichen Einfluss auf die Reduktion des Tragwiderstands. Dieser Grösseneffekt ist aus anderen Fällen der Rissbildung infolge Spannungskonzentrationen bekannt und kann mit Hilfe der Grundlagen der Bruchmechanik erklärt werden (Leicester 1973). Ausserdem kann die Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit von der Bauteilgrösse infolge der Theorie des schwächsten Kettenglieds nach Weibull (1939) erklärt werden, wie dies z.B. durch (Mistler 1979) für ausgeklinkte Träger beschrieben wurde. Der Einfluss der Trägerbreite ist im allgemeinen linear auf den Tragwiderstand des Queranschlusses. Weitere Einflüsse sind die Höhe h_m und Breite a_r der Verbindung oder dem Abstand l_l zwischen benachbarten Verbindungen.

Neben der Anschlussgeometrie ist der Tragwiderstand des Queranschlusses von der Art und Steifigkeit der Verbindungsmittel sowie der Holzart abhängig. Durch eine gleichmässigeren Lasteinleitung, wie sie z.B. Nagelplatten bieten, ist die Spannungskonzentration weniger ausgeprägt und der Tragwiderstand kann erhöht werden.

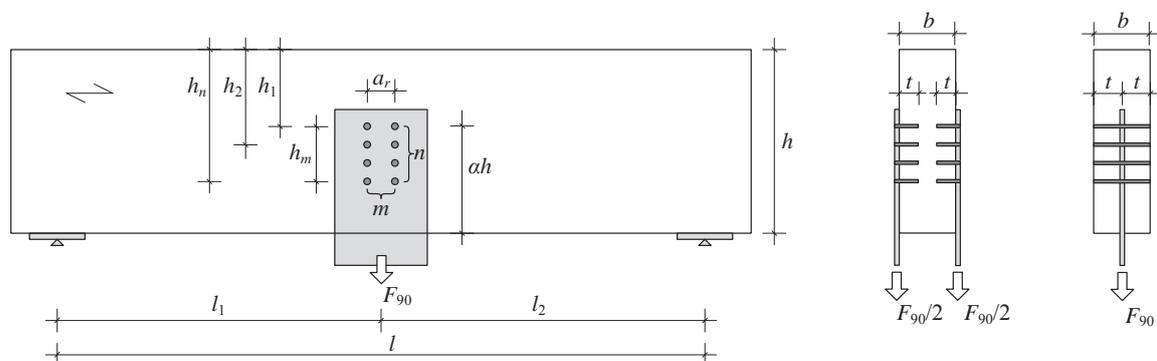


Fig. 2.1: Geometrische Bezeichnungen am Queranschluss.

2.2 Hintergrund der Bemessungsansätze

Das Problem des Querkzugversagens von Queranschlüssen wurde in der Fachliteratur bereits umfassend beschrieben. Gute Übersichten über verschiedene Bemessungsansätze und Versuchsdaten ist in (Schoenmakers 2010, Thiede 2014) beschrieben. Die bestehenden Ansätze lassen sich vor allem in zwei Gruppen einteilen: Ansätze die auf der Festigkeitstheorie beruhen und solche Ansätze, die auf bruchmechanischen Grundlagen basieren. Ein Bemessungsansatz auf Grundlage der Festigkeitstheorie wurde von Ehlbeck et al. (1989) vorgestellt. Dieser Ansatz ist auch in der früheren DIN 1052 (DIN 2008) enthalten gewesen und findet sich im deutschen Nationalen Anhang der EN 1995-1-1 (DIN 2013). Ein weiterer Ansatz, der auf einem Festigkeitsparameter beruht, war in den Schweizer Lignum-Holzbautabellen 2 (Lignum 1990) enthalten. Er wurde anhand empirischer Untersuchungen aufgestellt. Rein empirisch basierte Bemessungsansätze wurden von Quenneville and Mohammad (2001) und Lehoux and Quenneville (2004) für Rivet-Verbindungen entwickelt.

Ein bruchmechanischer Bemessungsansatz wurde von van der Put (1990) vorgestellt. Dieser wurde in der späteren EN 1995-1-1 (CEN 2004) aufgenommen. Erweiterungen und Anpassungen zu diesem Ansatz wurden auf Grundlage verschiedener nicht-linearer und semi-empirischer Theorien von Jensen et al. (2003) und Ballerini (2004) vorgestellt. Eine Unterscheidung des Bruchverhaltens in reinen Querkzug und Schub wurde von Franke and Quenneville (2011) auf Grundlage von Finite-Elemente Berechnungen vorgenommen. Im Folgenden werden die verschiedenen Ansätze im Detail beschrieben.

2.2.1 Ehlbeck et al. (1989)

Der empirische Bemessungsansatz wurde von Ehlbeck et al. entwickelt (Ehlbeck et al. 1989, Ehlbeck and Görlacher 1991). Basierend auf den zugrundeliegenden Versuchen ist dieser Bemessungsansatz auf Queranschlüsse mit einer relativen Anschlusshöhe kleiner als 70% der Balkenhöhe beschränkt. Für grössere relative Anschlusshöhen wird im Allgemeinen von keiner Verringerung des Tragwiderstands infolge des Queranschlusses ausgegangen. In den Versuchen wurde unter anderem die individuelle Form der Anschlussfläche variiert und somit konnten zwei Beiwerte gefunden werden, die den Einfluss der Breite und der Höhe des Anschlusses beschreiben. Je nach Steifigkeit der Verbindungsmittel wird daher die effektive Einwirkungstiefe des Anschlusses berücksichtigt. Mit steiferen Verbindungsmitteln können höhere Tragwiderstände erreicht werden.

Der Bemessungsansatz basiert auf einem Nachweis der Zugfestigkeit des Holzes rechtwinklig zur Faser. Im Nachweis wird daher der Volumeneinfluss auf die Festigkeit (Barrett 1974, Colling 1986) wie folgt berücksichtigt.

$$\sigma_{t,90,d} = \eta k_r \frac{F_{90,d}}{A_{ef}} \leq 15 A_{ef}^{-0.2} f_{t,90,d} \quad (2.1)$$

Der Faktor η lässt sich aus der Verteilung der Schubspannungen nach Balkentheorie herleiten.

$$\eta = 1 - 3(\alpha)^2 + 2(\alpha)^3 \quad (2.2)$$

Der Faktor k_r berücksichtigt den Einfluss der Verbindungshöhe h_m . Die effektive Grösse der Querspannungen nimmt dabei mit zunehmender Verbindungshöhe ab. Der Faktor wurde auf Grundlage der in Fig. 2.2 dargestellten Verteilung der Querspannungen ermittelt. Dazu wird der jeweilige Abstand h_i der i -ten Verbindungsmittelreihe zum druckbeanspruchten Trägerrand.

$$k_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{h_1}{h_i} \right)^2 \quad (2.3)$$

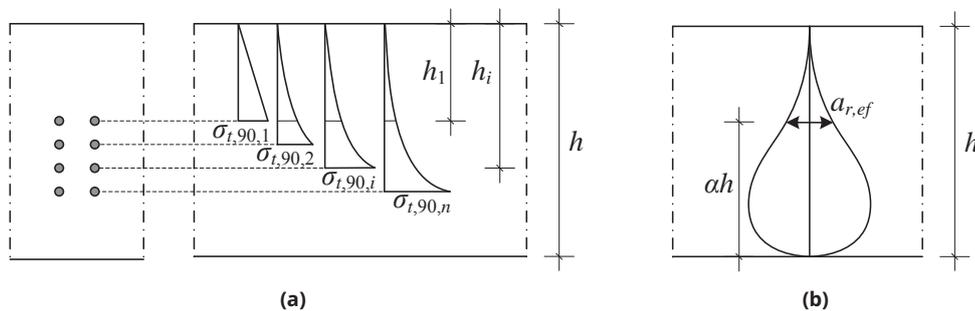


Fig. 2.2: Verteilung der Querspannungen an verschiedenen Verbindungsmittelreihen (a) und Einfluss der Breite der Verbindung (b). Abbildungen nach Ehlbeck et al. (1989)

Die querszugbeanspruchte Fläche A_{ef} kann aus der Breite der Verbindung a_r und der Trägerbreite b berechnet werden. Für einen Anschluss mit nur einem Verbindungsmittel ist die Breite Verbindung $a_r = 0$. Es wird daher in diesem Fall die folgende effektive Breite $a_{ef,r}$ verwendet, die als beste Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen gefunden wurde.

$$a_{ef,r} = ch \quad (2.4)$$

mit

$$c = \frac{4}{3} \sqrt{\alpha(1-\alpha)^3} \quad (2.5)$$

Der Faktor c ist aus der angenommenen Spannungsverteilung gemäss Fig. 2.2 (b) abgeleitet.

Für Verbindungen mit mehreren Verbindungsmitteln mit einer Breite $a_r > 0$ gilt die effektive Breite wie folgt:

$$a_{ef,r} = \sqrt{a_r^2 + (ch)^2} \quad (2.6)$$

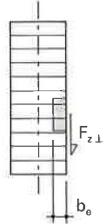
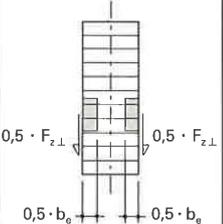
Für zwei einzelne Verbindungen mit einem Abstand l_l kann die effektive Breite wie folgt bestimmt werden:

$$tota_{ef,r} = a_{ef,r} \left(1 + \frac{l_l}{l_l + a_r} \right) \quad (2.7)$$

Für Anschlüsse an einem Kragarm, bei denen der Lastabtrag nur in eine Richtung erfolgen kann wird empfohlen, nur die halbe effektive Breite anzusetzen, sofern die Verbindung weniger als die halbe Trägerhöhe vom Trägerende entfernt ist.

2.2.2 Lignum (1990)

In der früheren Version der Lignum Holzbautabellen 2 (Lignum 1990) ist ein Bemessungsansatz für Queranschlüsse enthalten, der anhand einer Vielzahl der Literatur entnommenen Versuchsdaten (Möhler and Siebert 1981, 1983, Ehlbeck and Görlacher 1985) kalibriert wurde. Hintergründe zur Aufstellung und Kalibrierung des Ansatzes sind in privaten Aufzeichnungen von Gehri (1988) zu finden. Ziel des Ansatzes war es weniger einen aufwendigen und genauen Bemessungsansatz für Queranschlüsse zu liefern sondern den Tragwiderstand von verschiedenen Anschlussdetails wie z.B. Balkenschuhen oder Sparren-Pfettenankern abzusichern. Im Ansatz wird explizit auf das unterschiedliche Tragverhalten von verschiedenen Verbindungsmitteln eingegangen (Figur 2.3).

	Einseitiger Anschluss	Beidseitiger Anschluss
		
Verbindungsmittel	Wirkungstiefe b_e	Wirkungstiefe b_e
Nagel	$b_e = l_N \leq 12 d_N \leq 0,5 b$	$b_e = 2 l_N \leq 24 d_N \leq b$
Ringdübel	$b_e = 0,3 d_a \leq 0,5 b$	$b_e = 0,6 d_a \leq b$
Bulldog	$b_e = 0,5 d_a \leq 0,5 b$	$b_e = d_a \leq b$
Passbolzen	—	$b_e = 6 d \leq b$

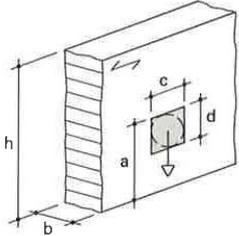


Fig. 2.3: Effektive Wirkungstiefe b_e und Bezeichnungen am Queranschluss aus (Lignum 1990).

Der Faktor 0.025 ist für eine 4-fache Sicherheit des Ansatzes kalibriert.

$$F_{90} = 0.025 a^{0.3} b_e^{0.7} d^{0.4} \left(\frac{a}{h} \right)^{0.2} \quad (2.8)$$

mit

a, b_e, d, h in [mm]

F_{90} in [kN]

Des Weiteren ist angegeben, dass für Anschlüsse mit $\alpha \geq 0.7$ keine Querkzugversagen zu erwarten sei. Ein Einfluss der Breite des Queranschlusses könnte mit dem Faktor $(1 + c/a)^{0.1}$ abgeschätzt werden, wobei c die Anschlussbreite ist. Für Anschlüsse am Trägerende wird nur der halbe Tragwiderstand erreicht.

2.2.3 van der Put (1990)

Ein Bemessungsansatz wurde von van der Put (1990), van der Put and Leijten (2000)) auf Basis der Bruchmechanik aufgestellt. Der Tragwiderstand des Trägers gegen Aufreißen kann aus der Schubsteifigkeit und der kritischen Bruchenergie als Materialparameter sowie der Trägerhöhe, der Trägerbreite und der Anschlusshöhe als Geometrieparameter berechnet werden. Die Anschlussbreite ist in diesem Ansatz nicht enthalten. Es wurde stattdessen ein Riss an einem Queranschluss mit einem einzelnen Verbindungsmittel betrachtet.

$$F_{90} = 2b \sqrt{\frac{GG_c \alpha h}{\frac{3}{5}(1-\alpha)}} \quad (2.9)$$

Gleichung 2.9 ist der Spezialfall für einen Riss mit vernachlässigbarer Risslänge. Für grössere Risslängen mit βh wurde der folgende Ansatz von Jensen et al. (2003) entwickelt:

$$F_{90} = 2b \sqrt{\frac{GG_c \alpha h}{\frac{3}{5}(1-\alpha) + \frac{3}{2} \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 \frac{G}{E} (1-\alpha^3)}} \quad (2.10)$$

Der Bruchparameter $\sqrt{GG_c}$ enthält die relevanten Materialparameter und kann anhand von Versuchsdaten kalibriert werden. In (van der Put and Leijten 2000) wird ein charakteristischer Wert des Materialparameter $C_{1,c} \approx 2/3 C_{1,mean} = 2/3 \sqrt{GG_c/0.6} = 2/3 \cdot 15.5 \approx 10$ vorgeschlagen.

Von Leijten and Jorissen (2001) wurde der Materialfaktor genauer untersucht und ein Vergleich mit verschiedenen anderen Modellen durchgeführt. Es wurde ebenfalls ein charakteristischer Wert des Materialfaktors $C_{1,c} = 10 \text{ N/mm}^{3/2}$ für die Normierung vorgeschlagen. Damit konnte der Bemessungsansatz in der EN 1995-1-1 (CEN 2004) für den charakteristischen Wert des Schubtragwiderstands von Queranschlüssen aufgestellt werden.

2.2.4 Larsen and Gustafsson (2001)

Von Larsen and Gustafsson (2001) wurde ein vereinfachter Ansatz für Queranschlüsse auf Basis der Nichtlinearen Bruchmechanik (NLFM) vorgeschlagen:

$$F_{ult} = 2b C_{Larsen} \sqrt{\alpha h} \quad (2.11)$$

mit:

$$C_{Larsen} = \sqrt{\frac{2}{\beta_s} GG_f} \quad (2.12)$$

In Gleichung 2.12 bezeichnet β_s einen sogenannten Schub-Korrekturfaktor. Dieser wird in Larsen and Gustafsson (2001) mit $\beta_s = 1$ für eine einzelne Reihe von Verbindungsmitteln ($m = 1$) angesetzt. Für einen Wert von $\beta_s = 6/5$ kann der herkömmliche Bruchparameter $C_{Larsen} = C_1$ berechnet werden. Der Ansatz wurde verwendet, um in Dauerstandsversuche an senkrecht zur Faserrichtung belastete Proben mit verschiedener Anzahl von Stabdübeln auszuwerten.

2.2.5 Jensen et al. (2012)

Eine weitere Anpassung des Ansatzes von van der Put (1990) ist in Jensen et al. (2012) beschrieben. Die Überlegungen basieren auf der Quasi-Nichtlinearen Bruchmechanik (QNLFM) und wurden am Modell eines elastisch gebetteten Trägers hergeleitet.

$$P_{90} = \lambda P_{90,LEFM} \quad (2.13)$$

$$\lambda = \frac{2\sqrt{2\zeta + 1}}{\zeta + 1} \quad (2.14)$$

$$P_{90,LEFM} = 2bC_1 \sqrt{\frac{\alpha h}{1 - \alpha}} \quad (2.15)$$

und

$$C_1 = \sqrt{\frac{5}{3} GG_c} \quad (2.16)$$

und

$$\zeta = \frac{C_1}{f_{t,90}} \sqrt{\frac{10G}{\alpha h E}} \quad (2.17)$$

Für einen Queranschluss nahe am Trägerende ist eine Anpassung des Ansatzes in Jensen (2005) vorgeschlagen. Dies wurde in Versuchen an einem Momentenanschluss in Trägermitte verifiziert.

$$P_{90,w} = P_{90,LEFM} \min \left\{ \frac{1}{2\sqrt{2\zeta+1}} + \frac{bf_{t,e}}{P_{90,LEFM}}, \frac{2\sqrt{2\zeta+1}}{\zeta+1} \right\} \quad (2.18)$$

2.2.6 Ballerini (2004)

Von Ballerini (2004) wurde der Ansatz nach van der Put (1990) und Jensen et al. (2003) weiterentwickelt. Es wurde eine abweichende Kraft- und Momentenverteilung in den Restquerschnitten angenommen, was zu einer höheren Potenz der relativen Anschlusshöhe im Ansatz führt. Basierend auf Versuchen wurde ein Bemessungswert $C_1 = 8.6 \text{ N/mm}^{3/2}$ für den Ansatz gefunden.

$$F_{ult} = 2bC_1 \sqrt{\frac{\alpha h}{(1 - \alpha^3)}} f_w f_r \quad (2.19)$$

Die beiden Parameter f_w und f_r berücksichtigen den Einfluss der Breite (a_r) bzw. der Höhe (h_m) des Anschlusses und einen möglichen Abstand zwischen mehreren Anschlüssen (l_l).

$$f_w(a_r, l_l, h) = \min \left\{ 1 + 0.75 \left(\frac{a_r + l_l}{h} \right), 2.2 \right\} \quad (2.20)$$

$$f_r(n, h_m) = 1 + 1.75 \frac{\kappa}{1 + \kappa} \quad (2.21)$$

$$\kappa = \frac{nh_m}{1000} \quad (2.22)$$

2.2.7 Franke and Quenneville (2011)

Ein Bemessungsansatz, in dem der gemischte Querkzug- und Schubbruch am Queranschluss berücksichtigt wird, wurde von Franke and Quenneville (2011) vorgestellt. Basierend auf numerischen Modellen wurde der folgende Ansatz vorgeschlagen:

$$F_{90} = \frac{b}{\frac{G_{norm}^I}{G_c^I} + \frac{G_{norm}^{II}}{G_c^{II}}} k_r \quad (2.23)$$

Darin bezeichnet G_c^I und G_c^{II} die kritische Energiefreisetzungsrate im Bruchmodus 1 (Querkzug) bzw. 2 (Schub). Die normierten Bruchenergien G_{norm}^i wurden anhand numerischer Untersuchungen bestimmt und an Versuchen kalibriert.

$$G_{norm}^I = e^{(h^{-1}(200 - 10(\alpha h)h^{-0.25} - a_r))} \quad \text{für Vollholz und BSH} \quad (2.24)$$

$$G_{norm}^I = e^{(0.8 - 1.6(\alpha h)h^{-1} - 1 \cdot 10^{-3} a_r)} \quad \text{für LVL} \quad (2.25)$$

$$G_{norm}^{II} = (0.05 + 0.12\alpha + 1 \cdot 10^{-3} a_r) \quad \text{für Vollholz, BSH und LVL} \quad (2.26)$$

Der Einfluss der Anzahl Reihen n der Verbindungsmittel wird durch den Faktor k_r berücksichtigt.

$$k_r = \begin{cases} 1 & \text{für } n = 1 \\ 0.1 + (\arctan(n))^{0.6} & \text{für } n > 1 \end{cases} \quad (2.27)$$

2.2.8 Zarnani and Quenneville (2013)

Ein Ansatz, der eine Rissausbreitung in Faserrichtung berücksichtigt, wurde von Zarnani and Quenneville (2013) präsentiert. Es wird darin zwischen vollem und teilweisem Aufreißen des Trägerquerschnitts unterschieden. Die Unterscheidung ergibt sich aufgrund unterschiedlicher Steifigkeiten der Verbindungsmittel. Für gedrungene Verbindungsmittel kann mit einem Aufreißen über den gesamten Querschnitt gerechnet werden. Für schlankere Verbindungsmittel ist nur ein teilweises Aufreißen zu erwarten, da die Kraft vor allem lokal an der Stelle mit der grössten Eindrückung beim Verbindungsmittel eingeleitet wird.

$$P_w = n_p \min \{P_{s,tef}; P_{s,b}\} \quad (2.28)$$

Neben den in Fig. 2.1 dargestellten geometrischen Grössen wird die wirksame Breite der Verbindung $w_{net} = a_r - m \cdot d$ sowie der Abstand zum unbelasteten Hirnholzende links oder

rechts des Anschlusses $a_{3,c,L}$ bzw. $a_{3,c,R}$ verwendet. Mit diesen Grössen kann die effektive Risslänge berechnet werden, bei der ein Versagen des Bauteils eintritt.

Teilweises Aufreissen

$$P_{s,tef} = C_t f_{tp} t_{ef} [w_{net} + \min(\beta \alpha h, a_{3c,L}) + \min(\beta \alpha h, a_{3c,R})] \quad (2.29)$$

mit

$$C_t = \begin{cases} 1.264 \zeta^{-0.37} & , \text{für } \zeta < 1.9 \\ 1 & , \text{für } \zeta \geq 1.9 \end{cases} , \text{ mit } \zeta = \frac{a_{4c}}{a_2(n_c - 1)} \quad (2.30)$$

Vollständiges Aufreissen

$$P_{s,b} = \eta b C_{fp} \sqrt{\frac{\alpha h}{1 - \alpha}} \quad (2.31)$$

mit

$$\eta = \frac{\min(w_{net} + \gamma \alpha h, a_{3c,L}) + \min(\gamma \alpha h, a_{3c,R})}{2\gamma \alpha h} \quad (2.32)$$

Der Parameter η ist für einen einzelnen Stabdübel in Trägermitte $\eta = 1$. Bei Annäherung an das Trägerende kann ein Abfallen des Tragwiderstands ab einer Entfernung $a_{3c}/(\alpha h) = 4$ für LVL beobachtet werden. Dieser Wert wird für BSH auf 2.7 reduziert. Damit beträgt der effektive Risslängenkoeffizient γ für das vollständige Aufreissen $\gamma = 4$ für LVL und $\gamma = 2.7$ für BSH.

2.2.9 Weitere Bemessungsansätze

Weitere hauptsächlich empirische Bemessungsansätze sind in verschiedener Literatur wie z.B. (Quenneville and Mohammad 2001, Lehoux and Quenneville 2004) zu finden. Da diese Ansätze speziell für Rivet-Verbindungen aufgestellt wurden, sind sie an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt.

2.3 Bemessungsansätze in den Normen

Die beschriebenen theoretischen Ansätze wurden zum Teil in Bemessungsnormen übernommen. Im Folgenden sind die verbreitetsten Ansätze aufgeführt.

2.3.1 DIN 1052

Der Ansatz in DIN 1052 (DIN 2008) basiert auf dem Ansatz von Ehlbeck et al. (1989).

$$\frac{F_{90,d}}{R_{90,d}} \leq 1 \quad (2.33)$$

Der Tragwiderstand für den Queranschluss berechnet sich aus der Zugkraft senkrecht zur Faser $f_{t,90,d}$.

$$R_{90,d} = k_s k_r (6.5 + 18\alpha^2) (t_{ef} h)^{0.8} f_{t,90,d} \quad (2.34)$$

Mehrere nebeneinander angeordnete Verbindungsmittel werden durch den Beiwert k_s berücksichtigt.

$$k_s = \max \begin{cases} 1 \\ 0.7 + \frac{1.6a_r}{h} \end{cases} \quad (2.35)$$

Mehrere übereinander angeordnete Verbindungsmittel werden durch den Beiwert k_r berücksichtigt.

$$k_r = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_1}{h_i}\right)^2} \quad (2.36)$$

Queranschlüsse mit sehr grossen relativen Anschlussbreite $a_r/h > 1$ und mit $F_{90,d} > 0.5R_{90,d}$ sind zu verstärken.

Die effektive Einbindetiefe t_{ef} der Verbindungsmittel beträgt für beidseitige Anschlüsse:

$t_{ef} = \min \{b; 2t; 24d\}$	Holz-Holz- oder Holzwerkstoff-Holz-Verbindungen mit Nägeln oder Holzschrauben
$t_{ef} = \min \{b; 2t; 30d\}$	Stahlblech-Holz-Nagelverbindungen
$t_{ef} = \min \{b; 2t; 12d\}$	Stabdübel- und Bolzenverbindungen
$t_{ef} = \min \{b; 100 \text{ mm}\}$	Verbindungen mit Dübeln besonderer Bauart
$t_{ef} = \min \{b; 6d\}$	Verbindungen mit eingeklebten Stahlstäben

Für einseitige Anschlüsse:

$t_{ef} = \min \{b; t; 12d\}$	Holz-Holz- oder Holzwerkstoff-Holz-Verbindungen mit Nägeln oder Holzschrauben
$t_{ef} = \min \{b; t; 15d\}$	Stahlblech-Holz-Nagelverbindungen
$t_{ef} = \min \{b; t; 6d\}$	Stabdübel- und Bolzenverbindungen
$t_{ef} = \min \{b; 50 \text{ mm}\}$	Verbindungen mit Dübeln besonderer Bauart

2.3.2 EN 1995-1-1

Der Bemessungsansatz für Queranschlüsse in EN 1995-1-1 (CEN 2004) basiert auf dem Ansatz von van der Put (1990). Bei diesem Bemessungsansatz ist zu beachten, dass der höhere Wert der Querkraft links ($F_{v,Ed,1}$) oder rechts ($F_{v,Ed,2}$) vom Queranschluss als massgebend für den Nachweis des Tragwiderstands verwendet wird. Für den Tragwiderstand ($F_{90,Rd}$) ist daher nur der halbe Wert des von van der Put (1990) vorgeschlagenen Wertes angesetzt. Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass auch Queranschlüsse am Trägerende (einseitiger Lastabtrag) mit dem

gleichen Ansatz bemessen werden können. Dagegen werden Queranschlüsse mit ungleichem Querkraftabtrag, wie zum Beispiel ausserhalb der Trägermitte, eher ungünstig bewertet.

$$F_{v,Ed} \leq F_{90,Rd} \quad (2.37)$$

mit

$$F_{v,Ed} = \max \begin{cases} F_{v,Ed,1} \\ F_{v,Ed,2} \end{cases} \quad (2.38)$$

und

$$F_{90,Rk} = 14bw \sqrt{\frac{\alpha h}{1 - \alpha}} \quad (2.39)$$

Für breite Nagelplatten kann ein erhöhter Tragwiderstand angesetzt werden:

$$w = \max \begin{cases} \left(\frac{w_{pl}}{100}\right)^{0.35} & \text{für Nagelplatten, mit } w_{pl} \text{ Breite der Nagelplatte} \\ 1 & \end{cases} \quad (2.40)$$

$$w = 1 \quad \text{für alle anderen Verbindungen} \quad (2.41)$$

2.3.3 CSA O.86-09

In der Kanadischen Norm CSA O.86-09 (CSA 2009) ist der Bemessungsansatz in Gleichung 2.37 aus EN 1995-1-1 für den allgemeinen Queranschluss angegeben. Für Queranschlüsse mit Rivets als Verbindungsmittel ist ein gesonderter Ansatz angegeben:

$$Q_u = \min \{Q_y; Q_w\} \quad (2.42)$$

Der Tragwiderstand des Holzes Q_w ist definiert durch:

$$Q_w = (q_w L_p^{0.8} C_t) K_D K_{SF} K_T \quad (2.43)$$

Darin ist der Parameter q_w der Tragwiderstand eines einzelnen Rivets, L_p die Eindringtiefe der Rivets und C_t ein Faktor in Abhängigkeit der Geometrie des Anschlusses. Die Sicherheitsfaktoren K_i berücksichtigen die Lasteinwirkungsdauer (K_D), die Umgebungsbedingungen (K_{SF}) und die Behandlung gegen Brandeinwirkungen (K_T). Die Werte von q_w und C_t sind von einer Vielzahl Faktoren und geometrischen Grössen abhängig. Sie wurden anhand von Versuchen und numerischen Untersuchungen bestimmt und sind in der Norm tabelliert. Eine Übertragung der Werte auf andere Verbindungsarten oder Materialien ist daher nicht möglich.

2.3.4 Vorschlag für NZS 3603

Ein Vorschlag für einen möglichen Bemessungsansatz für die Aufnahme in die Neuseeländische Bemessungsnorm für Holzbautragwerke basiert auf den Ansätzen von Zarnani and Quenneville (2013) und Franke and Quenneville (2011) und unterscheidet zwischen einem teilweisen und einem vollständigen Aufreißen des Querschnitts sowie zwischen Anschlüssen mit Verbindungen kleinen und grossen Durchmessers. Beim teilweisen Aufreißen ist die effektive Querzugfestigkeit im Bereich der Verbindungsmittel unter Berücksichtigung einer bestimmten Risslänge massgebend. Für das vollständige Aufreißen wird ein Ansatz auf Grundlage der Bruchmechanik verwendet. Der charakteristische Wert des Tragwiderstands gegen Aufreißen $N_{90,w2,e,k}$ für einen Anschluss mit Verbindungsmitteln kleinen Durchmessers lautet:

$$N_{90,w2,e,k} = \frac{2X_{tp}\eta b C_{fp}}{n_s} \sqrt{\frac{\alpha h}{1-\alpha}} \quad (2.44)$$

Der Parameter X_{tp} wird zur Kalibrierung des Sicherheitsniveaus verwendet und hat Werte von 1.23, 1.28 und 1.31 für LVL, BSH und Vollholz. Die charakteristische Festigkeit des Holzes gegen Aufreißen wird durch den Parameter $C_{fp} = 14 \text{ N/mm}^{1.5}$ für LVL und $C_{fp} = 10 \text{ N/mm}^{1.5}$ für BSH und Vollholz berücksichtigt. Der Risslängenparameter η wurde bereits in Gleichung 2.32 vorgestellt. Der Risslängenkoeffizient hat Werte von $\gamma = 4$ für LVL und $\gamma = 2.7$ für BSH und Vollholz.

Für Anschlüsse mit Verbindungsmitteln grossen Durchmessers wurde der Ansatz aus Gleichung 2.23 verwendet. Die Werte der Bruchenergien als charakteristische Festigkeitsparameter sind wie folgt definiert: $G_c^I = 0.225 \text{ N/mm}$ und $G_c^{II} = 0.650 \text{ N/mm}$ für BSH und Vollholz sowie $G_c^I = 1.0 \text{ N/mm}$ und $G_c^{II} = 6.0 \text{ N/mm}$ für LVL.

2.4 Vergleich zwischen den Ansätzen

Die verschiedenen Bemessungsansätze beschreiben doch jeweils ähnliche Einflüsse auf das Tragverhalten von Queranschlüssen wie in Abschnitt 2.1 beschrieben. Grundsätzlich unterscheiden sich die Ansätze nur in der zugrundeliegenden Theorie, dem Detaillierungsgrad der berücksichtigten geometrischen Parameter und der verwendeten Materialeigenschaften.

2.4.1 Einfluss geometrischer Parameter

Der nichtlineare Einfluss der Trägerhöhe auf den Tragwiderstand von Queranschlüssen wird von allen Ansätzen berücksichtigt. In Fig. 2.4 (a) ist dieser Einfluss anhand des relativen Tragwiderstands eines Queranschlusses normiert auf die Referenzhöhe $h = 600 \text{ mm}$ dargestellt. Aus den Grundlagen der Bruchmechanik kann für die Ansätze auf dieser Basis (van der Put 1990, Ballerini 2004) näherungsweise von einer Grösseneffekt von $h^{1/2}$ ausgegangen werden. Durch genauere nichtlineare Betrachtungen gibt es davon leichte Abweichungen. Die empirisch basierten Ansätze und der Ansatz von Ehlbeck et al. (1989) geht von einem abweichenden

Grösseneffekt aus, der im Fall von Ehlbeck et al. (1989) auf dem Grösseffekt nach Weibull basiert.

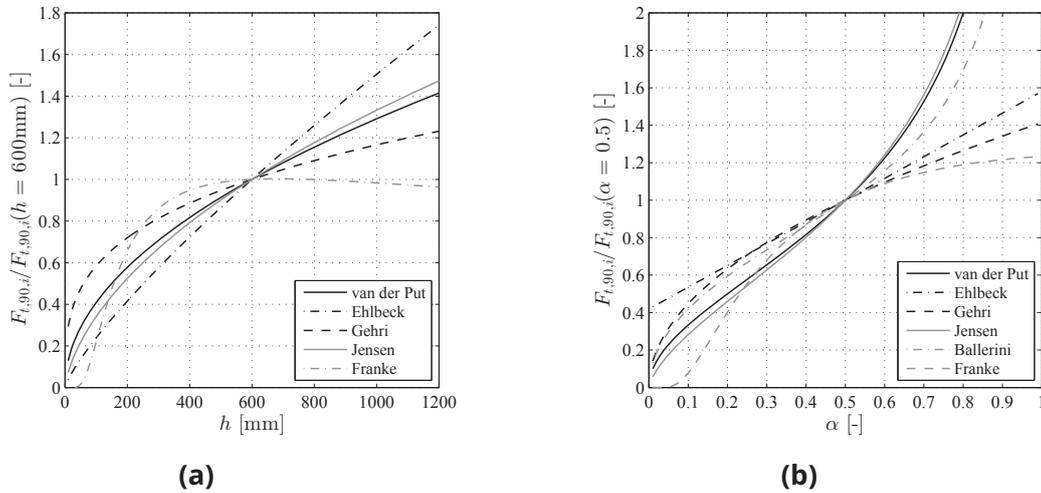


Fig. 2.4: Vergleich der Berücksichtigung der Parameter Trägerhöhe h (a) und relative Anschlusshöhe α (b) durch die Ansätze.

Der Einfluss der relativen Anschlusshöhe α ist in Fig. 2.4 (b) dargestellt. Der Einfluss ist vor allem davon abhängig, auf welche Weise die Spannungsverteilung im Querschnitt angesetzt wurde. Für grosse relative Anschlusshöhen $\alpha > 0.7$ kommt es zu teilweise sehr starken Differenzen zwischen den Ansätzen. In diesen Bereichen verlieren die theoretisch hergeleiteten Ansätze zunehmend an Relevanz, da andere Versagensmechanismen massgebend werden.

Der Einfluss der Anschlussgeometrie ist in Fig. 2.5 und Tab. 2.1 dargestellt. Da der Einfluss der Anschlusshöhe basierend auf der Anzahl an Verbindungsmittelreihen n und der Anschlussbreite basierend auf der Anzahl an Verbindungsmittelspalten m nur durch empirische Studien berücksichtigt wurde, kommt es zu grossen Unterschieden zwischen den Ansätzen. Der Ansatz von van der Put (1990), der von einem einzelnen Verbindungsmittel ausgeht, liegt dabei aber grundsätzlich auf der sicheren Seite.

Tab. 2.1: Berücksichtigung des Einflusses der Geometrie Verbindung des Queranschluss in verschiedenen Ansätzen.

Parameter	Ehlbeck et al. (1989)	Lignum (1990) Gehri (1988)	Ballerini (2004)	Franke & Quennev. 2011
m (width)	$\max \left\{ 1; 0.7 + 1.6 \frac{a_r}{h} \right\}$	$(1 + a_r / (\alpha h))^{0.1}$	$\min \left\{ 2.2; 1 + 0.75 \left(\frac{a_r + t_l}{h} \right) \right\}$	✓
n (height)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{h} \right)^2$	$h_m^{0.4}$	$1 + 1.75 \frac{\kappa}{1 + \kappa}$ with $\kappa = \frac{nh_m}{1000}$	$0.1 + \arctan(n)^{0.6}$ for $n > 1$

Der Einfluss einer effektiven Einbindetiefe, der sich aus der Art und Grösse der Verbindungsmittel ergibt, wurde nur in den Ansätzen von Ehlbeck et al. (1989) in der früheren DIN 1052 (DIN 2008) und im Ansatz in Lignum (1990) berücksichtigt. Die mitwirkende Trägerbreite wird dabei

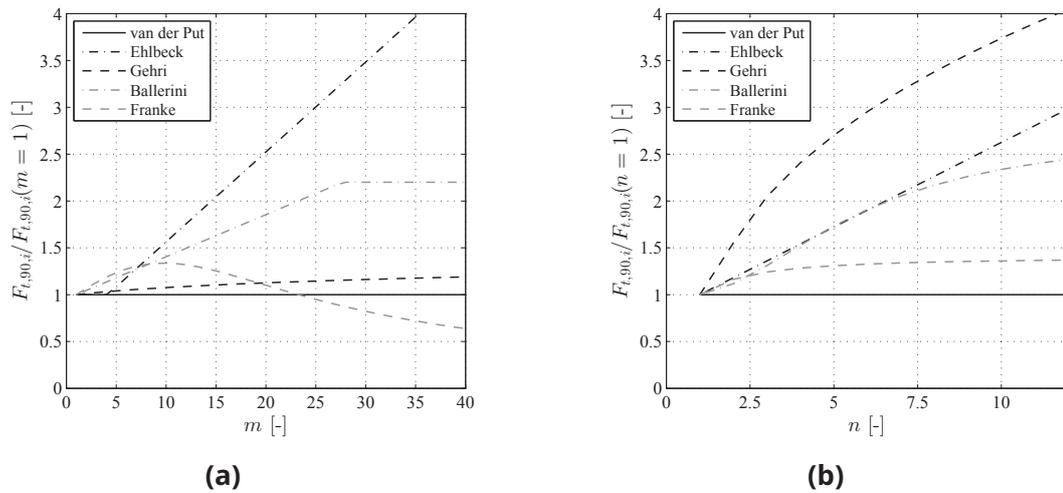


Fig. 2.5: Vergleich der Berücksichtigung der Anzahl der Verbindungsmittelspalten m (a) und Verbindungsmittelreihen n (b) durch die Ansätze.

auf die in Tab. 2.2 angegebenen Werte beschränkt. Dabei wird das Verformungsverhalten der Verbindungsmittel berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass bei Ausbildung plastischer Gelenke im Verbindungsmittel nur der Bereich der vorhandenen Lochleibungspressung für den Tragwiderstand massgebend ist.

Im Ansatz von Zarnani and Quenneville (2013) wird ebenfalls von einer effektiven Trägerbreite ausgegangen, die sich aus dem Tragwiderstand des Verbindungsmittels ergibt und entscheidet, ob es zu einem teilweisen oder vollständigen Aufreißen des Querschnitts kommt.

Tab. 2.2: Einfluss der Art und Durchmessers des Verbindungsmittels auf die eff. Trägerbreite b_{ef} .

beidseitige Anschlüsse				
		DIN 1052 (2008)		Lignum (1990)
Nägel	$b_{ef} = \min\{$	$b ; 2t ;$	$24d$ (Holz / Holz)	$b_{ef} = \min\{$
			$30d$ (Stahl / Holz)	$b ; 2t ; 24d \}$
Schrauben	$b_{ef} = \min\{$	$b ; 2t ;$	$24d$ (Holz / Holz)	
Stabdübel	$b_{ef} = \min\{$	$b ; 2t ;$	$12d \}$	$b_{ef} = \min\{$
Dübel bes.	$b_{ef} = \min\{$	$b ;$	$100 \text{ mm} \}$	$b_{ef} = 0.6d$ (Ringdübel)
Bauart				d (Bulldog)
Eingleimte	$b_{ef} = \min\{$	$b ;$	$6d \}$	
Gewindestangen				
einseitige Anschlüsse				
		DIN 1052 (2008)		Lignum (1990)
Nägel	$b_{ef} = \min\{$	$b ; t ;$	$12d$ (Holz / Holz)	$b_{ef} = \min\{$
			$15d$ (Stahl / Holz)	$b ; t ; 12d \}$
Schraube	$b_{ef} = \min\{$	$b ; t ;$	$12d$ (Holz / Holz)	
Stabdübel	$b_{ef} = \min\{$	$b ; t ;$	$6d \}$	
Dübel bes.	$b_{ef} = \min\{$	$b ;$	$50 \text{ mm} \}$	$b_{ef} = 0.3d$ (Ringdübel)
Bauart				$0.5d$ (Bulldog)

2.4.2 Berücksichtigung der Materialeigenschaften

Da die Ansätze auf verschiedenen Grundlagen basieren werden jeweils auch unterschiedliche Materialeigenschaften verwendet. Der Ansatz auf Grundlage der Festigkeitstheorie von Ehlbeck et al. (1989) verwendet die Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faser. Diese ist stark abhängig vom getesteten Volumen und ist Gegenstand ständiger Diskussion in der Fachwelt, z.B. (Aicher et al. 1998, 2002). Die Verwendung des allgemeinen Wertes, der in den Produktnormen angegeben ist, ist daher mit Vorsicht zu betrachten.

Die Ansätze basierend auf den bruchmechanischen Grundlagen (van der Put 1990, Ballerini 2004) verwenden die Bruchenergie des Holzes. Dabei wird vor allem von einem Querzugversagen ausgegangen und die Bruchenergie des Modus 1 verwendet. Diese Bruchenergie wurde in verschiedensten Studien untersucht und obwohl es keine normierten Werte gibt haben sich dennoch in der Fachwelt bestimmte Werte etabliert Larsen and Gustafsson (1990). Die Berücksichtigung der gemischten Bruchmoden erfordert Werte für die Bruchenergie des Modus 2 (Schub). Die Datengrundlage dazu ist jedoch deutlich geringer. Auf der sicheren Seite können aber Abschätzungen gemacht werden, wie in Aicher et al. (1997) beschrieben.

Die Ansätze auf Grundlage nichtlinearer Bruchmechanik (z.B. Jensen et al. (2003)) berücksichtigen sowohl die Bruchenergie als auch die Querzugfestigkeit. Dabei sind jedoch die Probleme mit den in der Norm angegebenen Werten der Querzugfestigkeit zu berücksichtigen.

Empirisch basierte Ansätze (z.B. Lignum (1990)) verwenden individuelle Festigkeitsparameter. Die Ausweitung der Ansätze auf andere Anwendungen und Holzarten und die Berücksichtigung von weiteren Einflüssen wie Lastdauer und Klimaeinflüsse ist kaum möglich.

Kapitel 3

Experimentelle Untersuchungen

3.1 Versuchsserie ETH

Im Rahmen des Projektes wurden an der ETH Zürich Versuche an Trägern mit Queranschlüssen durchgeführt. Die folgenden Fragestellungen sollten in den Versuchen beantwortet werden:

- Welches ist das genaue Versagensverhalten von Queranschlüssen mit eingeschlitzten Stahlblechen?
- Ergeben sich Unterschiede im Tragwiderstand infolge der Anschlussgeometrie?
- Ist das Querzugversagen auch für Anschlüsse mit $\alpha > 0.7$ massgebend?
- Wie können Querzuganschlüsse in geeigneter Weise verstärkt werden?
- Welches Versagen tritt bei verstärkten Queranschlüssen auf?

In den Versuchen sollte insbesondere das Versagen infolge Querzug in Abhängigkeit vom Versagen der Verbindung untersucht werden und dabei das Rissverhalten im Detail aufgezeichnet werden. Eine genaue Beschreibung der Versuche ist auch in (Gisler 2014) zu finden.

3.1.1 Prüfkörper

Die Prüfkörpergeometrien sind in Fig. 3.1 und Tabelle 3.6 aufgeführt. Bei der Wahl der Prüfkörpergeometrien wurden verschiedene Kriterien berücksichtigt: Zum einen war es das Ziel, einen praxisgerechten Anschluss zu definieren, der für die Übertragung von hohen Kräften geeignet ist. Zum anderen sollte dabei der Tragwiderstand der Verbindungsmittel und des Holzes für eine ausgewogene Bemessung in einer ähnlichen Grössenordnung liegen. Schlussendlich sollte eine Variation der Anschlussgeometrie möglich sein.

Eine Vorstudie zeigte, dass vor allem grosse relative Anschlusshöhen für eine experimentelle Studie von Interesse sind, bei denen neben dem Querzugversagen auch das Versagen der Verbindungsmittel untersucht werden soll. Es wurde daher der Bereich von $\alpha = 0.6 - 0.8$

gewählt. Die sehr grosse relative Anschlusshöhe $\alpha = 0.8$ soll Aufschluss darüber geben, ob auch für $\alpha > 0.7$ ein Querkzugversagen relevant ist.

Es war das Ziel eine praxisnahe Trägerhöhe im Versuch zu testen. Die Trägerhöhe von $h = 440$ mm wurde unter anderem aufgrund der Beschränkungen zur Herstellung des Schlitzes für die Blechdicken von 10 mm gewählt. Die Geometrie des Anschluss mit $m \times n = 4 \times 2$ als horizontale Anordnung und $m \times n = 2 \times 4$ als vertikale Anordnung wurde gewählt um bei gleichem Tragwiderstand der Verbindung den Einfluss der Anschlusshöhe und Anschlussbreite zu untersuchen.

In Fig. 3.1, 3.2 und 3.3 sind die Prüfkörpergeometrien und Verbindungskonfigurationen dargestellt. Die Prüfkörper wurden aufgrund der relativen Anschlusshöhe, der Anschlussgeometrie (horizontal oder vertikal) und mit einer fortlaufenden Nummer der Prüfkörperserie bezeichnet. Der Prüfkörper mit der Bezeichnung 06-V-2 bezeichnet den zweiten Träger einer Serie mit einer Anschlusshöhe von $0.6h$ und einer vertikale Anordnung der Stabdübel. Ein zusätzliches X bezeichnet einen verstärkten Prüfkörper.

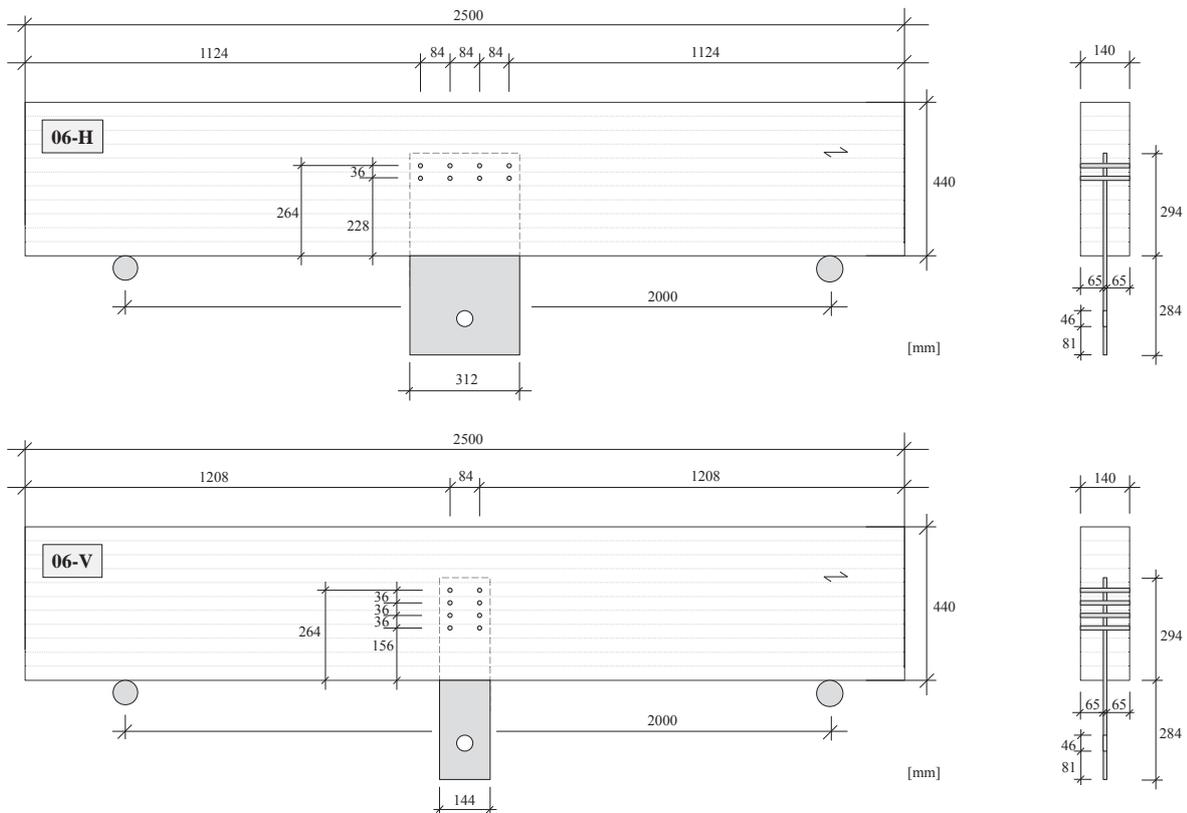


Fig. 3.1: Prüfkörpergeometrien der Träger mit $\alpha = 0.6$ (nach Gisler (2014)).

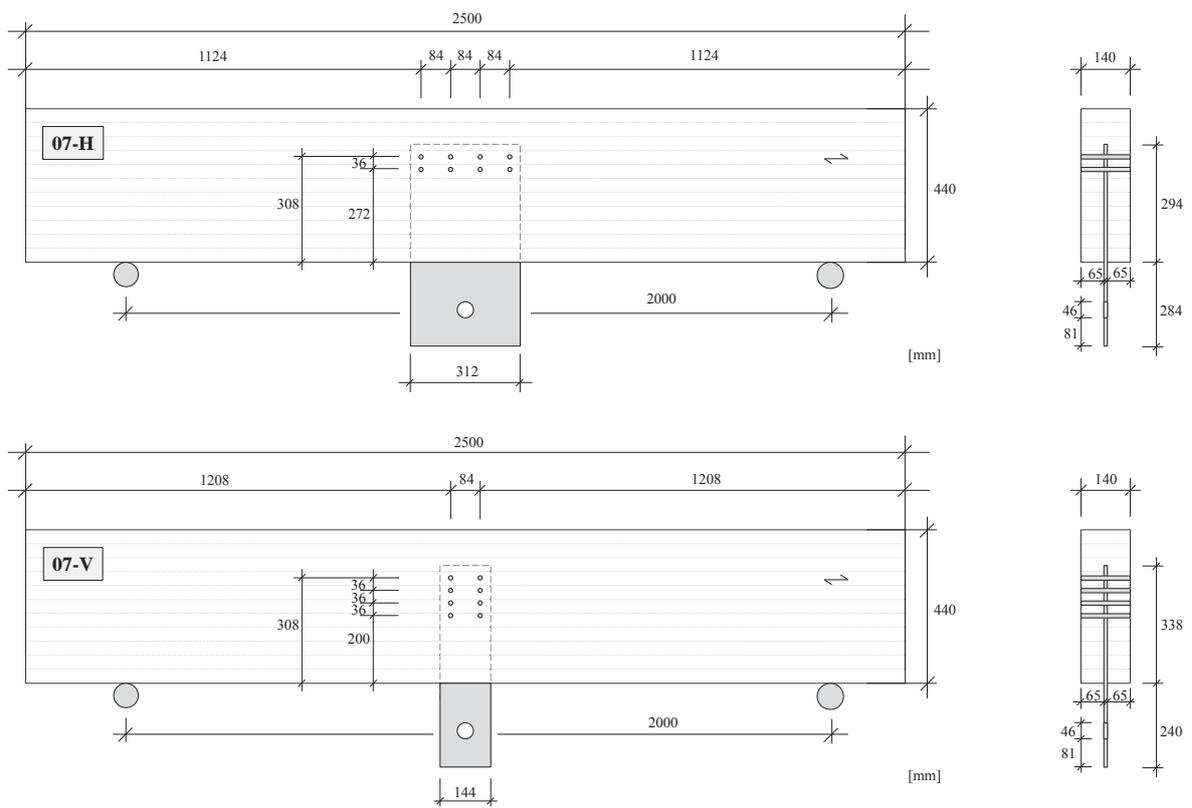


Fig. 3.2: Prüfkörpergeometrien der Träger mit $\alpha = 0.7$ (nach Gisler (2014)).

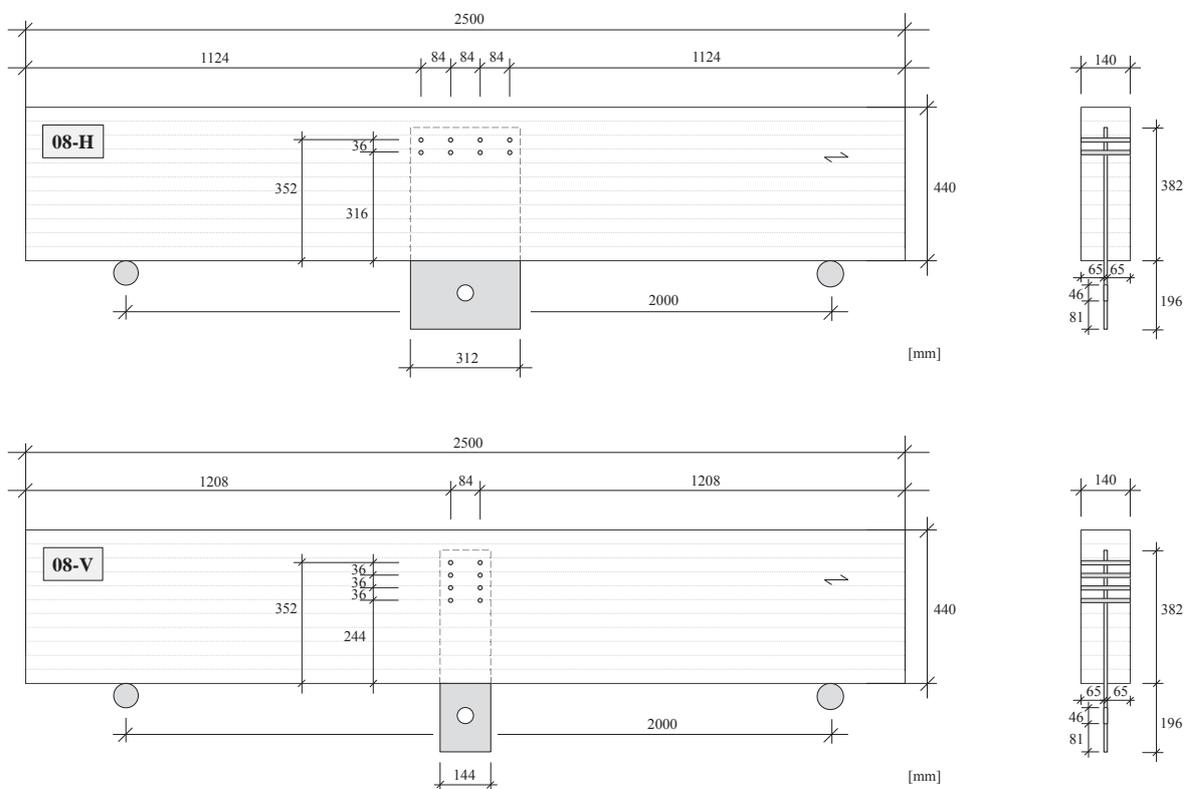


Fig. 3.3: Prüfkörpergeometrien der Träger mit $\alpha = 0.8$ (nach Gisler (2014)).

3.1.2 Versuchsaufbau und Messungen

Versuchsaufbau

Die Versuche wurden als 3-Punkt Biegung mit einer Zugbelastung des Stahlblechs durchgeführt. Die beidseitig verschieblichen Auflager wurden in einem Abstand von 2 m angebracht. Die Belastung des Stahlblechs erfolgte mittels durch Hohlkolbenzylinder belasteten Zugstangen, die durch eine Stahlformteil mit einem grossen Bolzen an das Stahlblech angeschlossen wurde.

Kraft und Durchbiegungsmessungen

Die Last wurde mit einem hydraulischen Zylinder aufgebracht, der durch eine Handpumpe betätigt wurde. Zur Kraftmessung wurde der Öldruck aufgezeichnet. Die Verformungen wurden an verschiedenen Stellen im Holz und am Stahlblech gemessen. An der Trägerober- und unterseite wurden je zwei Weggeber montiert, um die absolute Trägerdurchbiegung, die relative Verschiebung zwischen Ober- und Unterseite sowie eine mögliche Kippung über die Trägerbreite bestimmen zu können. Am Stahlblech wurden beidseitig in Trägerlängsrichtung Weggeber montiert, mit der die Verschiebung und ein mögliches Verdrehen der Stahlplatte gemessen werden konnte. Entlang des zu erwartenden Risses wurden auf einer Trägerseite Messtaster (Linear variable differential transformer, LVDT) angebracht, um eine Rissöffnung aufzuzeichnen. Dafür wurde ein Messtaster in der Mitte der Verbindung angebracht und einer je auf der rechten und linken Seite mit einem Abstand von 20 mm vom äussersten Verbindungsmittel (Fig. 3.4 (a)).

Optische Messungen

Für die Messungen im Rahmen der Digital Image Correlation (DIC) wurde die Trägeroberfläche zunächst weiss grundiert und anschliessend mit einem Sprühpistole ein schwarzes Punktmuster aufgebracht (Fig. 3.4 (b)). Mit einer einzelnen Fotokamera wurden während des Versuchs Bilder der Trägeroberfläche aufgenommen und im Anschluss mit einem in Matlab implementierten Code ausgewertet. Die Bilder wurden in einem Intervall von $5s$ aufgenommen.

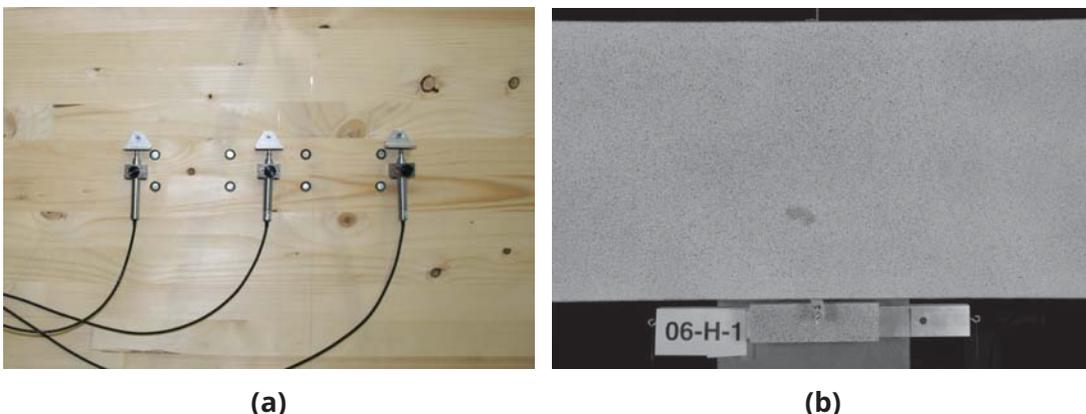


Fig. 3.4: Anordnung der LVDT entlang des erwarteten Risses (a) und Trägeroberfläche mit Muster für optische Messungen (b).

3.1.3 Materialeigenschaften

Brettschichtholz

Das Brettschichtholz wurde entsprechend der Festigkeitsklasse Gl24h bei dem Brettschichtholzhersteller "neue Holzbau AG", Lungern bestellt. Vor den Versuchen wurden die Dichten und Holzfeuchten der Prüfkörper bestimmt (Tab. 3.1). Die Holzfeuchte betrug im Mittel etwa $MC = 11\%$. Auf weitere Messungen von Materialeigenschaften wurde verzichtet, da aufgrund der geringen bzw. nicht existenten Korrelation mit der für den Querkzug relevanten Bruchenergie keine genaueren Erkenntnisse zu erwarten waren.

Tab. 3.1: Dichten der Prüfkörper bei einer Holzfeuchte von $MC \approx 11\%$.

Name	ρ [kg/m ³]	Name	ρ [kg/m ³]	Name	ρ [kg/m ³]
06-H-1	409.3	07-H-1	428.7	08-H-1	432.1
06-H-2-X	421.9	07-H-2	437.2	08-H-2	450.8
06-H-3-X	406.3	07-H-3	468.3	08-H-3	431.8
06-H-4	413.6	07-H-4	476.5	08-H-4	430.4
06-V-1-X	458.5	07-V-1	438.0	08-V-1	438.2
06-V-2	414.9	07-V-2	434.7	08-V-2	446.6
06-V-3	412.3	07-V-3	466.0	08-V-3	471.8
06-V-4-X	457.8	07-V-4	468.0	08-V-4	454.1

Stabdübel

Zur Bestimmung der Stahlqualitäten der Stabdübel wurden 3-Punkt Biegeversuche an Stabdübeln durchgeführt. Die Abmessungen der Stabdübel, die Feldlänge sowie die Geometrie der Auflagerpunkte ist in Fig. 3.5 (b) dargestellt und in Tab. 3.2 aufgeführt. Es wurden je zwei Versuche mit einer kurzen sowie einer längeren Spannweite durchgeführt.

Die Berechnung des Biegemoments und der Fließgrenze erfolgte entsprechend den Formeln (3.1)-(3.4). Der Biegewinkel γ kann aus der Durchbiegung des Lasteinleitungspunktes w berechnet werden:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{w}{l/2}\right) \quad (3.1)$$

Infolge der Verformung der Stabdübel kommt es zu einer Verkürzung der Spannweite um Δl

$$\Delta l = 4 \cdot \left(\frac{d}{2} + \frac{R}{2}\right) \cdot \sin(\gamma) \quad (3.2)$$

Das Biegemoment M kann für den 3-Punkt Biegeversuche aus der aufgebrachten Last F sowie der effektiven Spannweite $l - \Delta l$ ermittelt werden.

$$M = F/2 \cdot (l/2 - \Delta l/2) \quad (3.3)$$

In Figur 3.6 (a-b) ist der Verlauf des Belastung F in Abhängigkeit der Durchbiegung im Lasteinleitungspunktes w sowie das Biegemoment M in Abhängigkeit des Biegewinkels γ dargestellt.

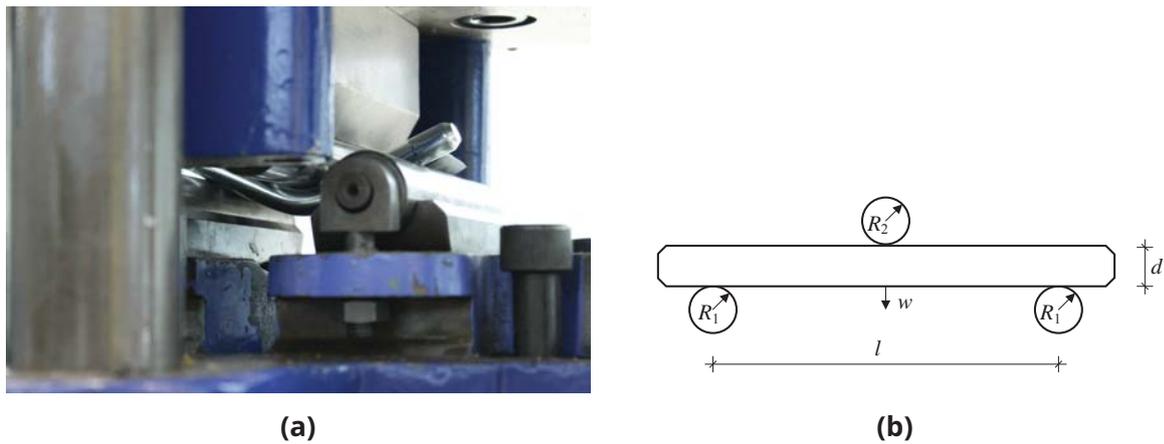


Fig. 3.5: Versuchsaufbau und Abmessungen für 3-Punkt Biegeversuche an Stabdübeln.

Tab. 3.2: Geometrische Parameter in den Stabdübelversuchen

	Setup 1	Setup 2
d	12	12
l	76	100
R_1	30	30
R_2	30	30

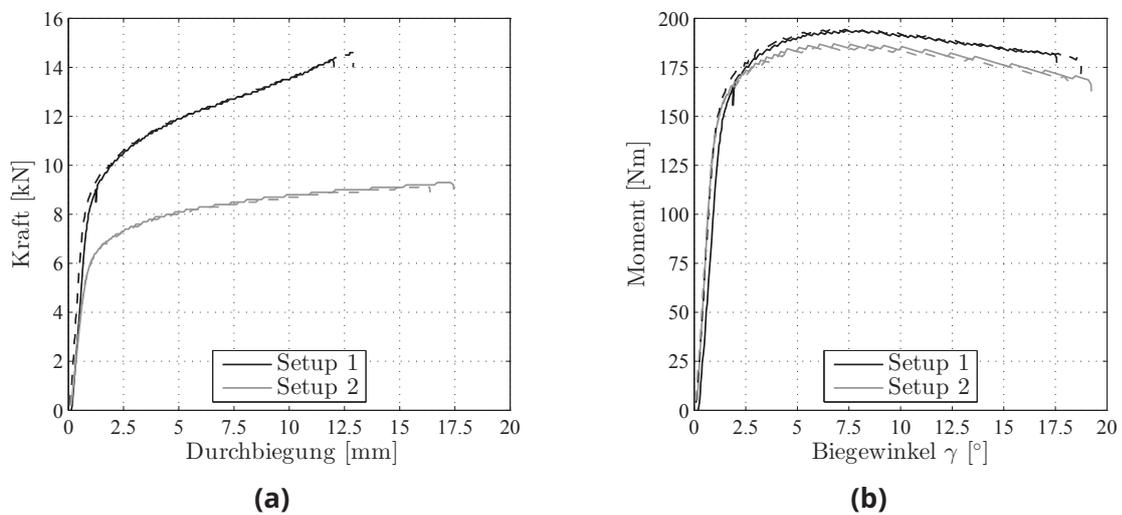


Fig. 3.6: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm (a) und Momenten-Kürmungs-Diagramm (b) aus den Stabdübelversuchen.

Tab. 3.3: Biegemoment und Fließspannung der Stabdübel

	M_{\max} [Nm]	f_y [N/mm ²]
1	194	898
2	194.3	899.7
3	187	865.6
4	185.6	859.4

Deutlich ist das Erreichen des plastischen Biegemoments zu erkennen. Die Fließgrenze des Stahls f_y kann wie folgt aus dem plastischen Widerstand $W_{pl} = d^3/8$ abgeschätzt werden:

$$f_y = \frac{M_y \cdot 8}{d^3} \quad (3.4)$$

3.1.4 Prognose

Widerstand des Holzes

Basierend auf den Materialangaben in EN 14080 wird für die Versuchskörper der folgende charakteristische Schubtragwiderstand erwartet:

$$F_{V,k} = 2 \cdot 2/3 f_{v,k} b h = 2 \cdot 2/3 \cdot 3.5 \text{ N/mm}^2 \cdot 140 \text{ mm} \cdot 440 \text{ mm} = 371 \text{ kN} \quad (3.5)$$

Der erwartete charakteristische Biegetragwiderstand beträgt:

$$F_{M,k} = f_{m,k} \frac{bh^2}{6} \cdot \frac{4}{l} = 24 \text{ N/mm}^2 \frac{140 \text{ mm} \cdot (440 \text{ mm})^2}{6} \cdot \frac{4}{2000 \text{ mm}} = 335 \text{ kN} \quad (3.6)$$

Im Falle eines Aufreissens ergibt sich für den unteren Restquerschnitt ein in Tab. 3.4 angegebener charakteristischer Biegetragwiderstand.

Tab. 3.4: Charakteristischer Tragwiderstand der Träger nach einem vollständigen Aufreissen des Trägers

α	$F_{M,k}$
[-]	[kN]
0.6	120
0.7	164
0.8	214

Basierend auf den in Kapitel 2 aufgeführten Ansätzen wird der in Tabelle 3.5 angegebene mittlere Querkzugwiderstand für die Versuchskörper erwartet.

Tab. 3.5: Erwarteter mittlerer Tragwiderstand der Queranschlüsse

α	Anschlussart	EC 5	DIN 1052	Jensen	Gehri	Ballerini
[-]		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
0.6	horizontal (4 x 2)	129.7	131.0	141.6	41.6	101.3
0.6	vertikal (2 x 4)	129.7	161.3	141.6	64.2	134.8
0.7	horizontal (4 x 2)	161.7	151.1	178.7	44.7	119.5
0.7	vertikal (2 x 4)	161.7	196.2	178.7	69.1	159.1
0.8	horizontal (4 x 2)	211.8	177.8	236.3	47.7	148.2
0.8	vertikal (2 x 4)	211.8	250.0	236.3	73.7	197.3

Widerstand der Verbindung

Der Tragwiderstand der Verbindung kann basierend auf den Ergebnissen an den Stabdübeln nach dem in EN 1995-1-1 (CEN 2004) angegebenen European Yield Model (EYM) für die Versagensmodi (f), (g) bzw. (h) ermittelt werden. Es ergibt sich für die vorhandenen Abmessungen

ein Versagen mit Ausbildung eines Flie遨moments im Bereich des Stahlblechs mit einem Tragwiderstand $F_{v,Rmean} = 113.6 \text{ kN}$ gemäss Gleichungen 3.7. Die mittlere Lochleibungsfestigkeit kann gemäss Gleichung 3.8 nach Bejtka (2005) zu $f_{h,1,mean} = 31.75 \text{ N/mm}^2$ berechnet werden.

$$\begin{aligned}
 F_{v,Rmean} &= 8 \times \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,mean} t_1 d \\ f_{h,1,mean} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rmean}}{f_{h,1,mean} d t_1^2}} \right] \\ 2.3 \sqrt{M_{y,Rmean} f_{h,1,mean} d} \end{array} \right. \\
 &= 8 \times \min \left\{ \begin{array}{l} 24.77 \text{ kN} \\ 14.2 \text{ kN} \\ 19.6 \text{ kN} \end{array} \right. = 113.6 \text{ kN} \quad (3.7)
 \end{aligned}$$

$$f_{h,1,mean} = 0.082 (1 - 0.01 \cdot 12 \text{ mm}) 440 \text{ kg/m}^3 = 31.75 \text{ N/mm}^2 \quad (3.8)$$

3.1.5 Ergebnisse

Bei der Auswertung der Traglasten können drei verschiedene Grenzwerte definiert werden:

- **Anriss-Last:** Während der Belastung ist ein erster Anriss im Bereich der obersten Verbindungsmittelreihe zu beobachten. Dieser Anriss hat zunächst nur eine kurze Länge und erstreckt sich oftmals nur auf den Bereich der Breite des Anschlusses. In den Messungen der Rissöffnung zeigt sich eine Rissöffnung von weniger als 1 mm. Es ist dabei kein Kraftabfall zu erkennen.
- **Durchriss-Last:** Im weiteren Verlauf der Belastung tritt ein instabiler Risswachstum auf, der zu einem Durchrei遨en des Querschnitts und einer Trennung der oberen und unteren Trägerquerschnitte führt. Dieses Durchrei遨en führt zu einem deutlichen Kraftabfall und stimmt für die kleinen relativen Anschlusshöhen mit der maximalen Traglast überein. Bei den grösseren relativen Anschlusshöhen ist nach dem Durchriss noch eine Laststeigerung möglich, bei der jedoch nur noch der untere Trägerquerschnitt zum Tragwiderstand beiträgt.
- **Maximal-Last:** Die maximale im Versuch erreichte Belastung ist teilweise beim Durchriss erreicht oder aber zu einem späteren Zeitpunkt, wenn bereits nur noch der untere Restquerschnitt zum Tragwiderstand beiträgt. Es tritt daher zum Teil ein Biege- oder Schubversagen des unteren Restquerschnitts auf.

Für die Beurteilung des Tragverhaltens und zur Bestimmung eines Tragwiderstands der Querschlüsse sind vor allem die Anriss- und Durchriss-Last entscheidend. In Tabelle 3.6 sind die Versuchsergebnisse aufgelistet und in Figur 3.7 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Anrisslasten für alle Versuche mit den unterschiedlichen relativen Anschlusshöhen in einem vergleichbaren Bereich liegen. Die Durchrisslasten zeigen jedoch, dass bei den kleinen relativen Anschlusshöhen von $\alpha = 0.6$ der Anriss bereits sehr schnell zu einem Durchriss des Trägers

führt und der Tragwiderstands damit erreicht ist. Insbesondere für die grossen relativen Anschlusshöhen ist nach dem ersten Anriss noch eine deutliche Traglaststeigerung möglich.

Tab. 3.6: Zusammenstellung der im Versuch erreichten Lasten

Bezeichnung	rel. Anschlusshöhe α [–]	Geometrie	Verstärkung		Last		
			SFS® 13 mm	WR-T	Anriss [kN]	Durchriss [kN]	Maximum [kN]
06-V-1-X	60%	vertikal	4×	-	124.9	-	216.6
06-V-2	60%	vertikal	-	-	115.9	132.4	132.4
06-V-3	60%	vertikal	-	-	122.4	128.3	128.3
06-V-4-X	60%	vertikal	4×	-	119.5	175.4	235.1
06-H-1	60%	horizontal	-	-	100.3	116.1	116.1
06-H-2-X	60%	horizontal	4×	-	107.0	174.8	202.7
06-H-3-X	60%	horizontal	4×	-	118.6	131.6	205.7
06-H-4	60%	horizontal	-	-	107.4	113.5	113.5
07-V-1	70%	vertikal	-	-	123.7	134.8	146.4
07-V-2	70%	vertikal	-	-	133.2	143.5	156.1
07-V-3	70%	vertikal	-	-	111.1	148.9	138.1
07-V-4	70%	vertikal	-	-	108.3	127.5	155.2
07-H-1	70%	horizontal	-	-	99.6	133.7	160.3
07-H-2	70%	horizontal	-	-	124.7	145.7	156.1
07-H-3	70%	horizontal	-	-	123.5	150.7	150.7
07-H-4	70%	horizontal	-	-	111.1	152.1	152.1
08-V-1	80%	vertikal	-	-	134.1	187.8	187.8
08-V-2	80%	vertikal	-	-	106.0	129.6	186.5
08-V-3	80%	vertikal	-	-	101.6	147.1	177.1
08-V-4	80%	vertikal	-	-	103.4	136.9	159.0
08-H-1	80%	horizontal	-	-	139.6	185.4	185.4
08-H-2	80%	horizontal	-	-	110.8	150.2	210.5
08-H-3	80%	horizontal	-	-	124.8	158.4	173.0
08-H-4	80%	horizontal	-	-	110.8	166.3	181.2

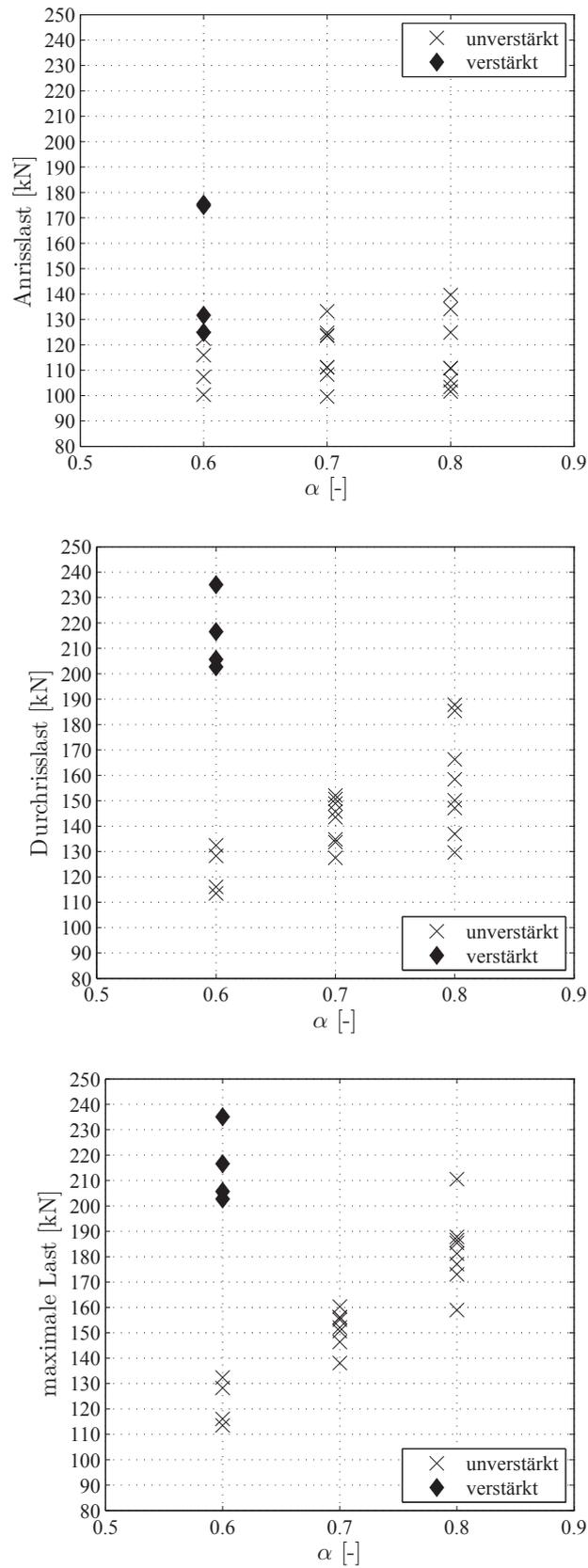


Fig. 3.7: Versagenslasten im Versuch.

3.1.6 Versagen des Verbindungsmittel

Der Tragwiderstand des Queranschlusses kann durch ein Versagen der Verbindungsmittel (Fig. 3.8) oder im Holz hervorgerufen werden. Bei einem ausgewogenen Entwurf des Queranschlusses werden die Tragwiderstände der Verbindungsmittel sowie des Holzes in einer ähnlichen Größenordnung liegen. In Figur 3.9 ist das relative Herausziehen der Stahlbleche aus dem Holz dargestellt. Es zeigt sich, dass für die kleinen relativen Anschlusshöhen $\alpha = 0.6$ beim Erreichen des Tragwiderstands nur eine sehr geringes Herausziehen aus dem Holz vorliegt. Für die grossen relativen Anschlusshöhen von $\alpha = 0.8$ sind dagegen sehr grosse Ausziehverformungen zu erkennen und damit ein Erreichen des Tragwiderstands der Verbindung mit einem deutlich plastischem Versagen zu erwarten.

Der Vergleich zwischen dem beobachteten Herausziehen des Stahlbleches mit den erwarteten Tragwiderständen der Verbindungsmittel, die in Abschnitt 3.1.4 prognostiziert sind, zeigt eine gute Übereinstimmung für den Beginn der plastischen Verformung.



Fig. 3.8: Modus 2 Versagen der Verbindungsmittel mit einem plastischen Gelenk im Bereich des Stahlblechs am geöffneten Prüfkörper 06-H-4.

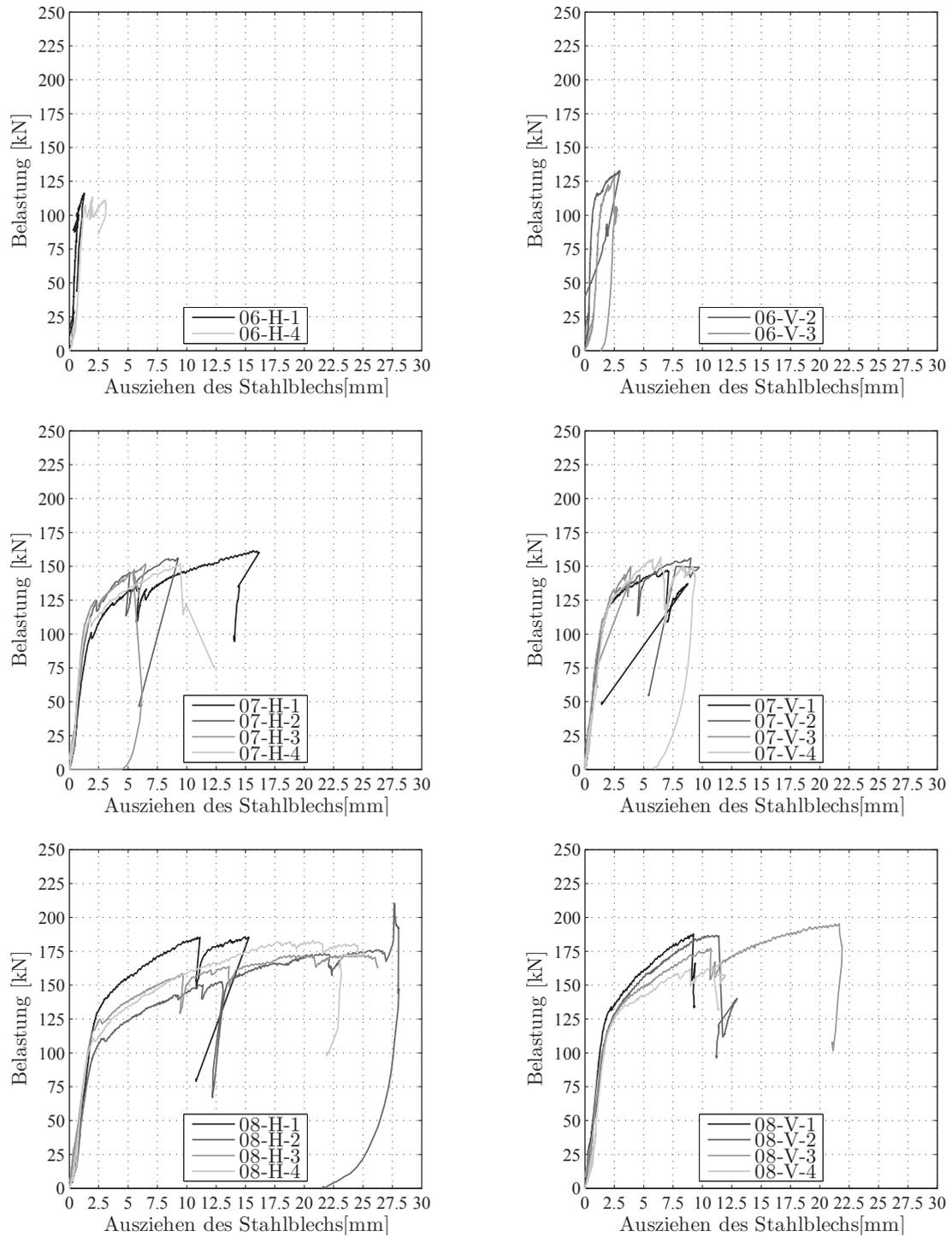


Fig. 3.9: Ausziehenverformung der eingeschlitzten Stahlbleche im Versuch.

3.1.7 Rissöffnung

In allen Versuchen ausgenommen Versuch *06-H-1* und *06-V-4* wurde die Rissöffnung an drei Stellen im Bereich der obersten Verbindungsmittelreihe gemessen. Ein LVDT war in der Mitte der Verbindung angebracht, zwei weitere auf der rechten und links Seite ca. 50 mm seitlich der äussersten Verbindungsmittel angebracht (Figur 3.10). In Figur 3.11 ist die Rissöffnung der mittleren LVDT für die verschiedenen Versuche dargestellt. Für die relativen Anschlusshöhen von $\alpha = 0.6$ zeigt sich ein sehr sprödes Aufreissen mit sofortigem Lastabfall. Für die grösseren relativen Anschlusshöhen von $\alpha = 0.8$ ist insbesondere für die horizontale Anschlussgeometrie eine relativ stabile Rissöffnung mit ansteigender Last zu erkennen.



Fig. 3.10: Messung der Rissöffnung.

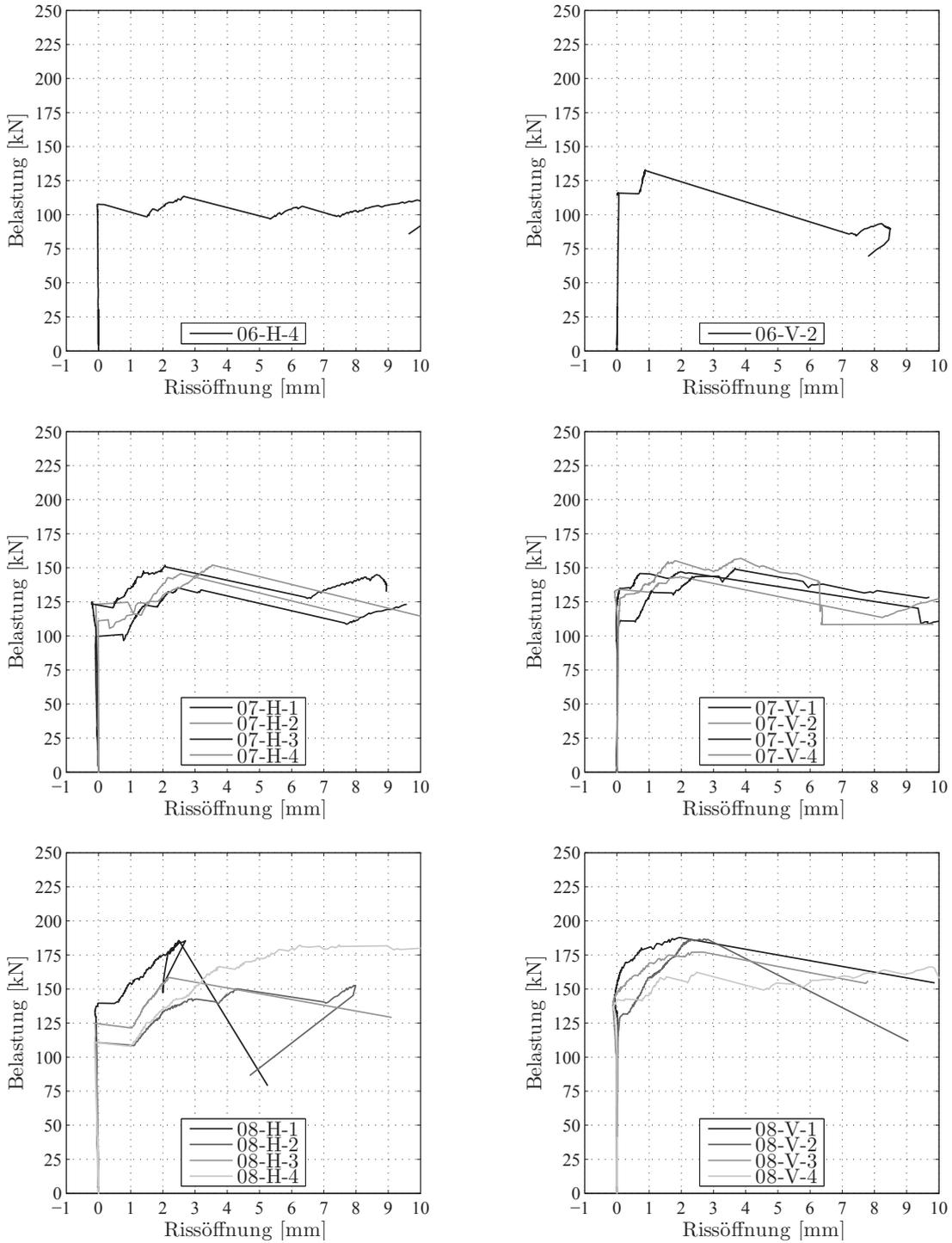


Fig. 3.11: Rissöffnung in der Mitte des Anschlusses im Versuch.

3.1.8 Risslängenmessungen

Für die optischen Messungen wurde ein zufälliges Punktmuster auf der Trägeroberfläche während des Versuchs photographisch aufgenommen. Nach Beendigung des Versuchs konnten die Bilder mithilfe der Digital Image Correlation ausgewertet werden. Dabei wurde aus der relativen Verschiebung der Punkte des Musters die Oberflächenverformung des Trägers berechnet werden. Dies ermöglicht in einem weiteren Schritt die Berechnung der Dehnungen an der Trägeroberfläche und die Bestimmung des Ortes und der Ausdehnung von Rissen. In Figur 3.13 sind die Entwicklungen der Gesamtlänge der Risse im Bereich des Queranschlusses in Abhängigkeit von der aufgebracht Belastung dargestellt.

Bei einer relativen Anschlusshöhe $\alpha = 0.6$ zeigt sich ohne Verstärkung ein sehr instabiles Risswachstum bei relativ geringen Lasten. Mit ansteigender relativer Anschlusshöhe kommt es vermehrt zu einem stabilen Risswachstum mit ansteigender Belastung. Der Beginn des Aufreisens tritt dagegen auf einem ähnlichen Lastniveau wie der spröde, instabile Risswachstum bei den Prüfkörpern mit $\alpha = 0.6$ auf.

Bei den verstärkten Queranschlüssen beginnt das Aufreissen ebenfalls bereits auf einem niedrigem Lastniveau (Figur 3.12). Ab einer Risslänge von ca. 300 mm, was bei der horizontalen Anordnung der Verbindungsmittel dem Abstand der Verstärkung entspricht, stabilisiert sich das Risswachstum und eine Laststeigerung bis zum endgültigen Versagen des Trägers ist möglich.

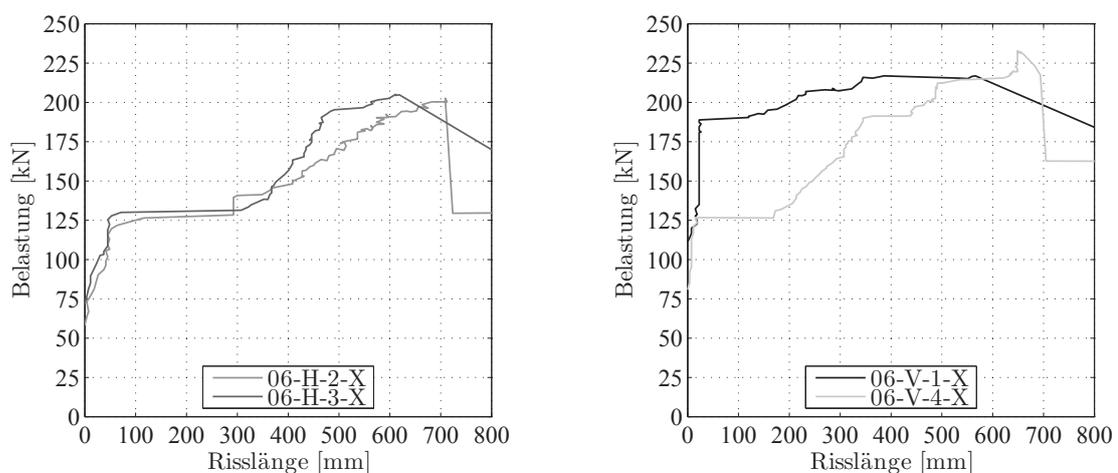


Fig. 3.12: Entwicklung der Risslängen im Versuch an den verstärkten Queranschlüssen.

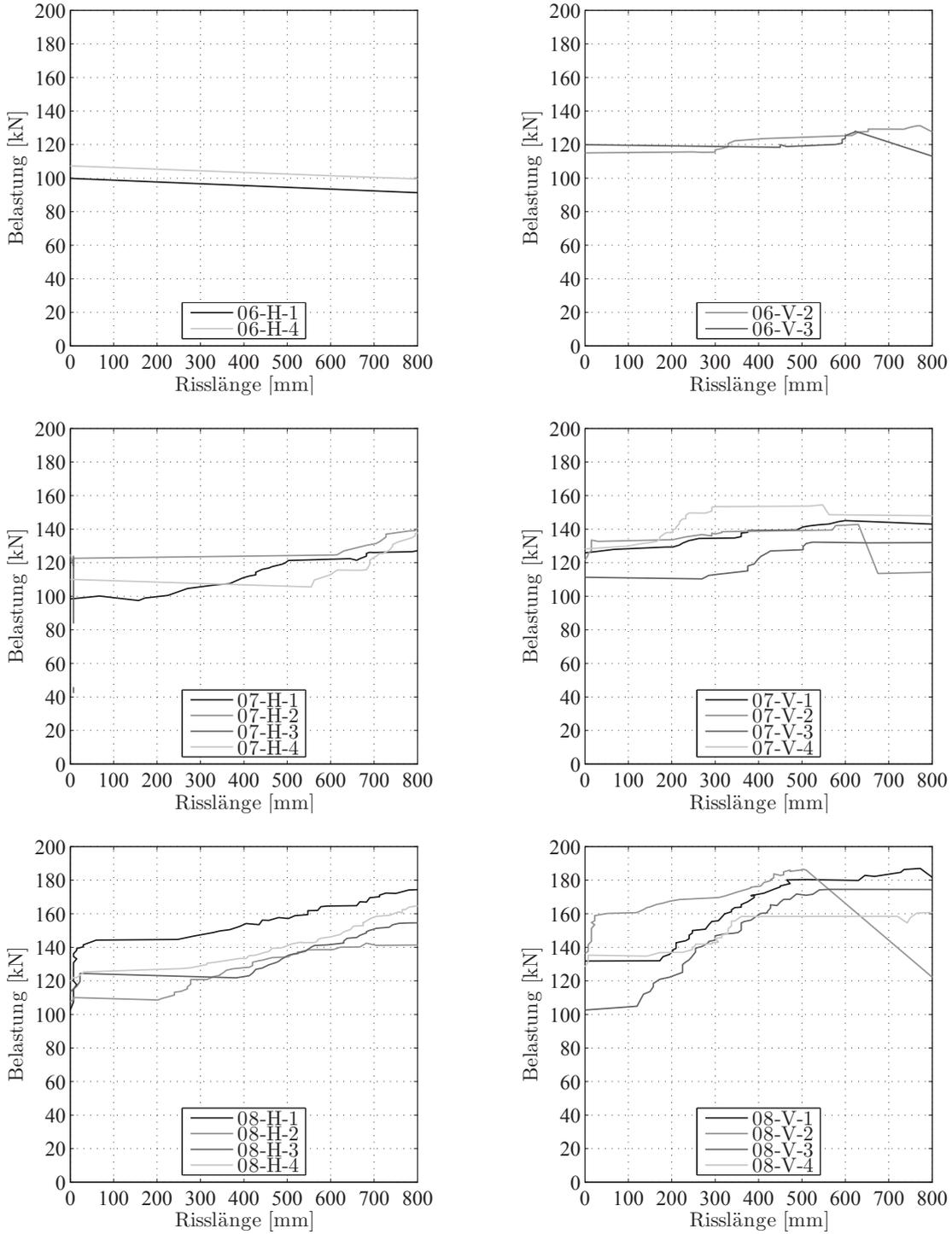


Fig. 3.13: Entwicklung der Risslängen im Versuch.

3.2 Versuche aus der Literatur

3.2.1 Verwendete Versuche

Die grosse Anzahl an Versuchswerten aus der Literatur bietet die Möglichkeit Untersuchungen zu den Fraktilwerten durchzuführen. Für die Untersuchungen wurde die in Tabelle 3.7 aufgeführte Literatur mit Versuchen an BSH-Trägern herangezogen, die jeweils gut dokumentierte Einzelwerte von Versuchen beinhaltet.

Tab. 3.7: Versuche an BSH aus der Literatur, die für die genauere Auswertung herangezogen wurden

Literatur	Anzahl	Holzart	Verbindungsmitel
Möhler and Siebert (1981)	28	Softwood	Nägel, Stabdübel, Dübel bw. Bauart
Ehlbeck and Görlacher (1983)	41	Softwood	Nägel
Ballerini (1999)	49	Norway Spruce	Stabdübel
Ballerini and Giovanella (2003)	72	Norway Spruce	Stabdübel
Reske (1999)	138	Spruce/Pine, GL 20f-E	Bauschrauben
Kasim (2002)	90	Spruce/Pine & Douglas Fir	Bauschrauben
Habkirk (2006)	50	Spruce/Pine & Douglas Fir	Bauschrauben
Jensen and Quenneville (2011)	18	Douglas Fir, GL8 + GL15	Stabdübel
Schoenmakers (2010)	59	Spruce	Nägel, Stabdübel

Neben den detailliert beschriebenen Versuchen sind weitere Versuche in der in Tabelle 3.8 aufgeführten Literatur vorhanden, die allerdings zum Teil schlecht dokumentiert, nicht als Einzelwerte, mit deutlich abweichender Holzart oder mit anderen Variationen durchgeführt wurden. Die Versuchswerte können Aufschluss über den qualitativen Einfluss bestimmter Parameter liefern.

Tab. 3.8: Weitere Versuche aus der Literatur

Literatur	Anzahl	Holzart	Baustoff	Besonderheiten
Möhler and Lautenschläger (1978)	53	Norway Spruce	Vollholz	verschiedenste Nagelbilder
Reske et al. (2000)	100	Spruce/Pine & Douglas Fir	BSH	Feldmitte & Kragarm
Yasamura (2001)	30	Spruce	BSH	
Jensen et al. (2003)	20		LVL	
Jensen et al. (2012)	120	Radiata Pine	LVL	Feldmitte & Viertelspunkt
Franke et al. (2012)	75	Radiata Pine	LVL	

3.2.2 Träger und Anschlussgeometrie

Der Grossteil der Versuche wurde als 3-Punkt Biegeversuch mit einer mittigen Lasteinleitung durchgeführt. Eine geringe Anzahl an Versuchen mit Queranschlüssen am Trägerende sind z.B. in (Reske et al. 2000) aufgeführt. Versuche an 3-Punkt Biegeträgern mit exzentrischer Krafteinleitung (Queranschluss nahe am Auflager) sind z.B. in (Jensen et al. 2012) und (Schoenmakers 2010) aufgeführt.

Der Grossteil der Versuche wurde an Trägern mit eher kleinen Querschnittsabmessungen durchgeführt (Fig. 3.14). Dies sollte bei der Beurteilung der Versuche berücksichtigt werden um eventuelle Grösseneffekte auszuschliessen.

Die Trägerbreite war oftmals sehr gering. Zusammen mit sehr steifen Verbindungsmitteln kann dies einen Einfluss auf die Tragwirkung der Verbindung haben. Bei einer geringen Trägerbreite mit einem steifen Verbindungsmittel ist von einer sehr gleichmässigen Belastung über den gesamten Trägerquerschnitt auszugehen. Dies kann zu einer späteren Rissinitiierung führen als dies mit sehr schlanken Verbindungsmitteln zu erwarten wäre.

Die Verteilung der untersuchten relativen Anschlusshöhen ist einigermaßen gleichmässig, so dass eine gute Aussage über den zu erwartenden Einfluss gemacht werden kann.

3.2.3 Material

Das Material in den Versuchen an Queranschlüssen unterscheidet sich zum Teil deutlich von den in der Schweiz gebräuchlichen Baustoffen im Holzbau. Besondere Vorsicht sollte bei der Verwendung von Versuchsergebnissen an Pinus Radiata gegeben werden, das diese Holzart zum Teil eine deutlich höhere Querkzugfestigkeit im Gegensatz zu anderen gebräuchlichen Nadelhölzern hat. Unterschiede können sich auch aus der Verwendung von Funierschichtholz (LVL) ergeben. In (Jensen and Quenneville 2011) ist der Einfluss der Holzart auf den Tragwiderstand diskutiert.

3.2.4 Verbindungsarten

Die häufigsten Verbindungsarten waren Passbolzen mit aussenliegenden Stahlblechen. Es ist anzunehmen, dass diese Verbindungsart vor allem aufgrund der einfachen versuchstechnischen Umsetzung gewählt wurde. In der Praxis werden neben dieser Arten von Verbindungen wie z.B. bei der Verwendung von genagelten Stahlformteilen vor allem auch Anschlüsse mit innenliegende Stahlbleche Verwendung finden. Unterschiede im Tragverhalten sind daher genauer zu untersuchen.

In vielen Versuchen war der Verbindungsmitteldurchmesser relativ gross im Vergleich zur Trägerbreite. Dieses sehr steifen Verbindungen erlauben eine gleichmässigerer Lastenleitung über den gesamten Trägerquerschnitt. Diese deutliche Überbemessung der Verbindungsmittel entspricht eher nicht einer praxisnahen Wahl und kann zu Unterschieden im Versagensverhalten der Verbindung führen. Für eine realitätsnahe Versuchsdurchführung sollte ein ausgewogener Tragwiderstand zwischen Verbindungsmitteln und Queranschlusses gewählt werden.

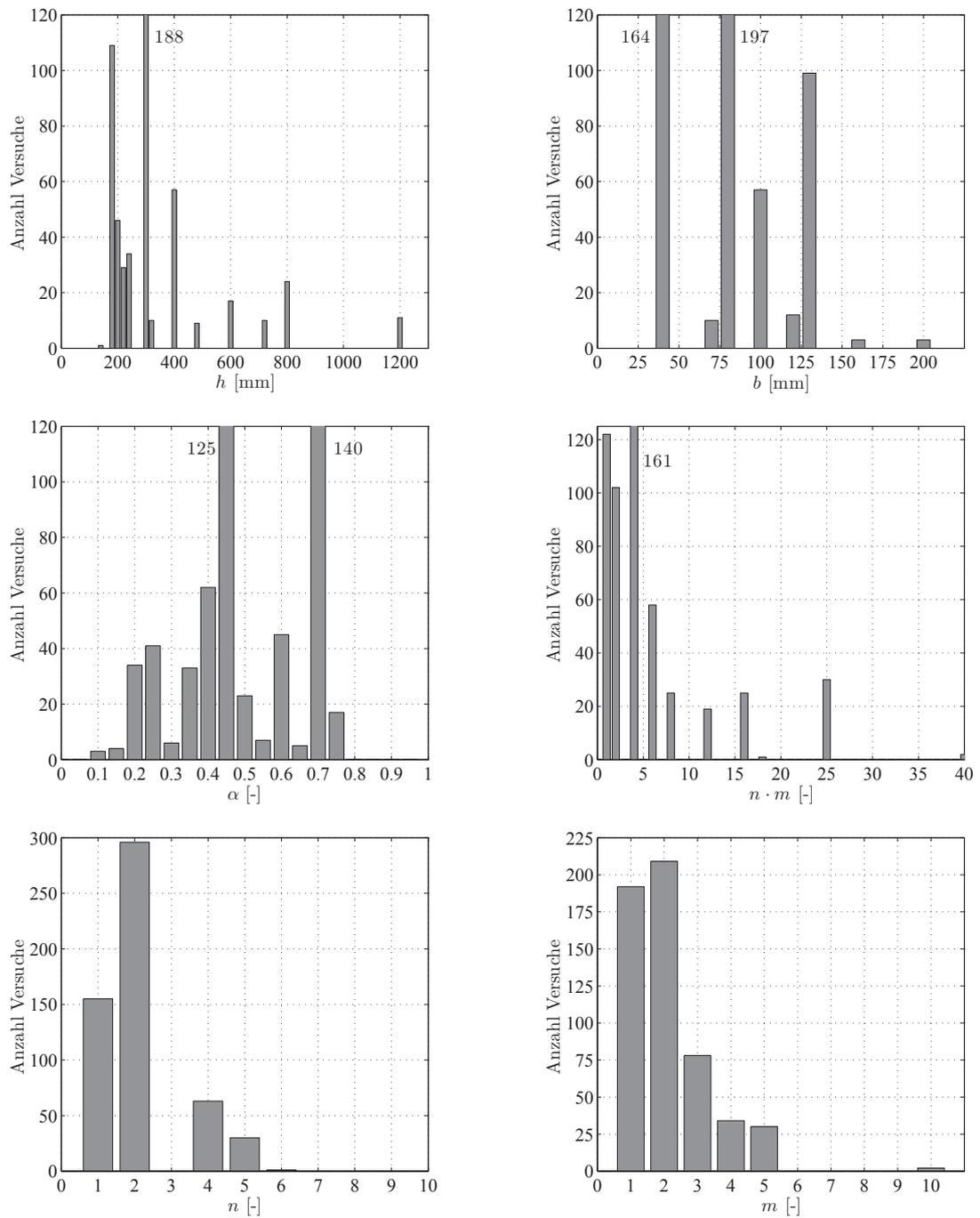


Fig. 3.14: Anzahl der Versuchskörper aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von Trägerhöhe h , Trägerbreite b , relative Anschlusshöhe α , Anzahl Verbindungsmittel $n \cdot m$, Verbindungsmittelreihen n und Verbindungsmittelspalten m .

Kapitel 4

Beurteilung der Bemessungsansätze

4.1 Vorhersagequalität unterschiedlicher Ansätze

In Fig. 4.1 sind die nach den Bemessungsansätzen in Kapitel 2 ermittelten Tragwiderstände mit den Versuchsergebnissen verglichen, um die Vorhersagequalität der Bemessungsansätze zu bewerten. Die folgenden Materialparameter wurden in den Bemessungsansätzen verwendet: $G_{f,1,mean} = 0.3 \text{ N/mm}$, $E_{0,mean} = 11500 \text{ N/mm}^2$, $G_{v,mean} = 650 \text{ N/mm}^2$ und $f_{t,90,mean} = 0.50 \text{ N/mm}^2$. Für den Ansatz aus Lignum (1990) wurde ein Materialparameter von 0.1 verwendet.

Bei der Beurteilung insbesondere der älteren Bemessungsansätze ist zu beachten, dass bei deren Validierung teilweise nur ein sehr eingeschränkter Umfang an Versuchsergebnissen vorlag. Da ein Grossteil der Ansätze auf relative Anschlusshöhen $\alpha < 0.7$ beschränkt ist, wurden die Ergebnisse von Versuchen an grösseren relativen Anschlusshöhen von der Auswertung ausgeschlossen.

Es zeigen sich teilweise deutliche Unterschiede in der Streuung der jeweiligen Ergebnisse und der mittlere Vorhersage. Der Bias, das heisst die mittlere Verzerrung oder Abweichung von $F_{Versuch}/F_{Ansatz}$ ist in Tab. 4.1 angegeben. Es zeigt sich dabei, dass mit dem Ansatz von Ballerini (2004) das höchste Bestimmtheitsmass R^2 erreicht wird. Der recht starke Bias einiger Ansätze ergibt sich zum Teil aus ungenügenden Materialparametern oder Korrektur- und Sicherheitsfaktoren in den Ansätzen.

Tab. 4.1: Bias und Bestimmtheitsmasse der Ansätze

Ansatz	Bias	R^2
van der Put	0.96	0.817
Ehlbeck	1.10	0.809
Gehri	1.32	0.594
Franke	0.45	0.693
Jensen	0.65	0.826
Ballerini	0.79	0.861
Larsen	1.05	0.757

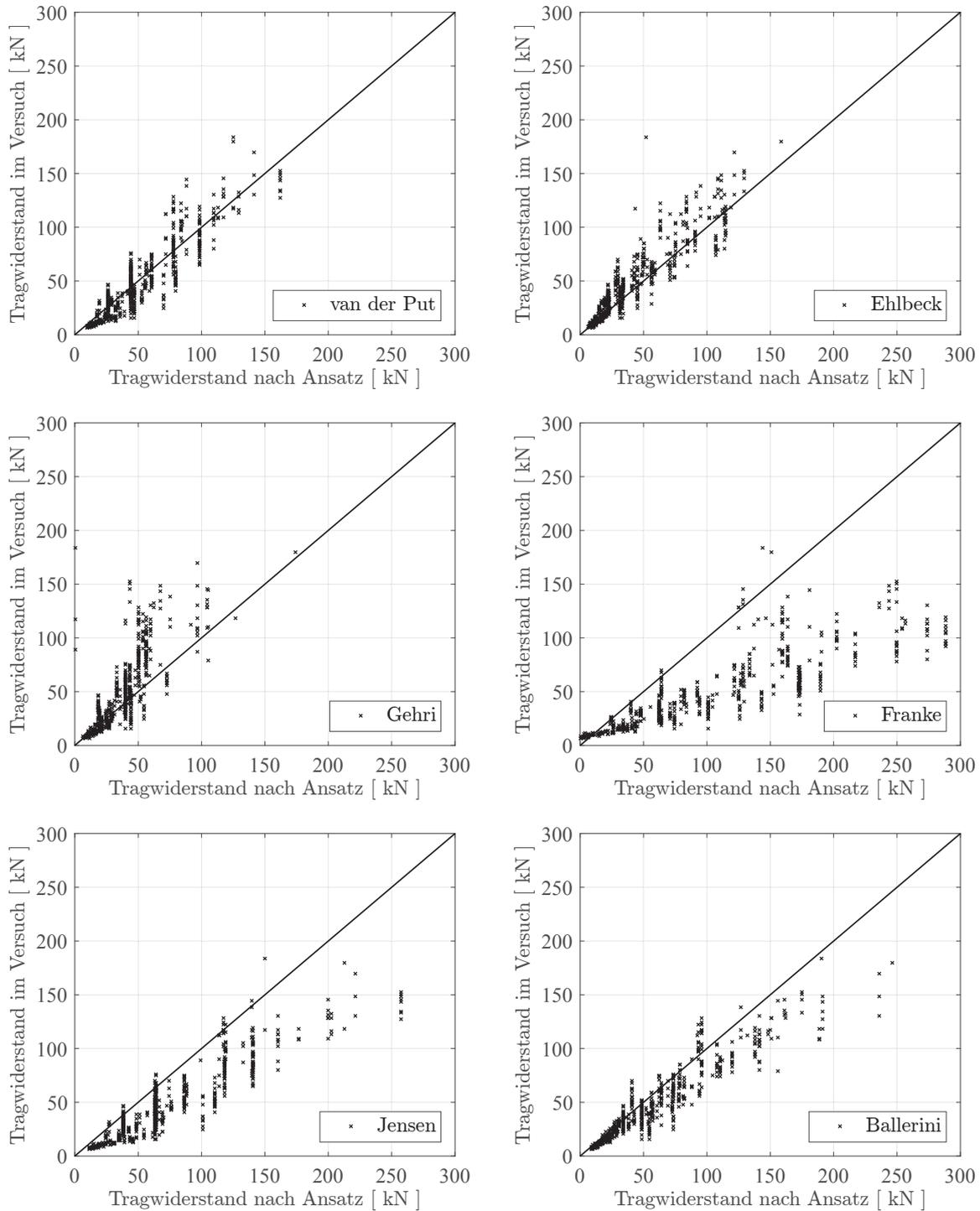


Fig. 4.1: Vergleich zwischen der in Versuchen bestimmten Traglast und dem erwarteten Tragwiderstand nach verschiedenen Ansätzen.

4.2 Beurteilung ausgewählter Bemessungsansätze

Wie in Tab. 4.1 zu sehen bietet der Ansatz nach Ballerini (2004) die beste Vorhersage für den Tragwiderstand von Queranschlüssen. Der Ansatz von Ehlbeck et al. (1989) zeigt ebenfalls eine gute Vorhersagequalität. In Bezug auf die sehr geringe Komplexität des Ansatzes von van der Put (1990) soll dieser ausserdem für eine genauere Beurteilung herangezogen werden.

Für die genauere Beurteilung wird der Materialparameter des jeweiligen Ansatzes aus den Versuchen zurückgerechnet. Im Idealfall sollte dieser einen konstanten Wert ergeben. Liegen Abhängigkeiten des so bestimmten Materialparameters von bestimmten geometrischen Parametern oder sonstigen Einflüssen vor, so könnten diese im Bemessungsansatz als zusätzliche Eingangsgrösse berücksichtigt werden um eine bessere Vorhersagequalität zu erreichen.

In den Ansätzen auf Grundlage der Bruchmechanik ist der Materialparameter C_1 enthalten, der aus der Modus 1 Bruchenergie $G_{f,1}$ und dem Schubmoduls G_v wie folgt bestimmt werden kann.

$$C_{1,Theorie} = \sqrt{\frac{3G_{f,1}G_v}{5}} \quad (4.1)$$

Aus den Versuchswerten kann dieser Materialparameter anhand der Ansätze von van der Put (1990) und Ballerini (2004) wie folgt zurückgerechnet werden:

$$C_{1,vanderPut} = \frac{F_{90}}{2b\sqrt{\frac{\alpha h}{(1-\alpha)}}} \quad (4.2)$$

$$C_{1,Ballerini} = \frac{F_{90}}{2bf_w f_r \sqrt{\frac{\alpha h}{(1-\alpha^3)}}} \quad (4.3)$$

Für den auf der Festigkeitstheorie basierende Ansatz von Ehlbeck et al. (1989) kann die Querkzugfestigkeit $f_{t,90}$ aus den Versuchswerten wie folgt berechnet werden.

$$f_{t,90,Ehlbeck} = \frac{F_{90}}{k_s k_r (6.5 + 18\alpha^2) (b_e f h)^{0.8}} \quad (4.4)$$

4.2.1 Einfluss der Trägerhöhe

Der Einfluss der Trägerhöhe wird von den drei Ansätzen unterschiedlich berücksichtigt. Wie in Fig. 4.2 zu sehen unterschätzt der Ansatz von van der Put vor allem den Tragwiderstand hoher Träger. Die Trägerhöhe wird in diesem Ansatz genau durch die Wurzel berücksichtigt. Der Ansatz von Ballerini und vor allem der Ansatz von Ehlbeck überschätzen hingegen tendenziell den Tragwiderstand von hohen Trägern. Aufgrund der sehr geringen Datenmenge für Träger mit Höhen über $h > 600$ mm besteht hier sicher noch weiterer Forschungsbedarf. Gerade bei hohen Hallenträgern mit angehängten Lasten kann eine Überschätzung des Tragwiderstands des Queranschlusses gravierende Konsequenzen haben.

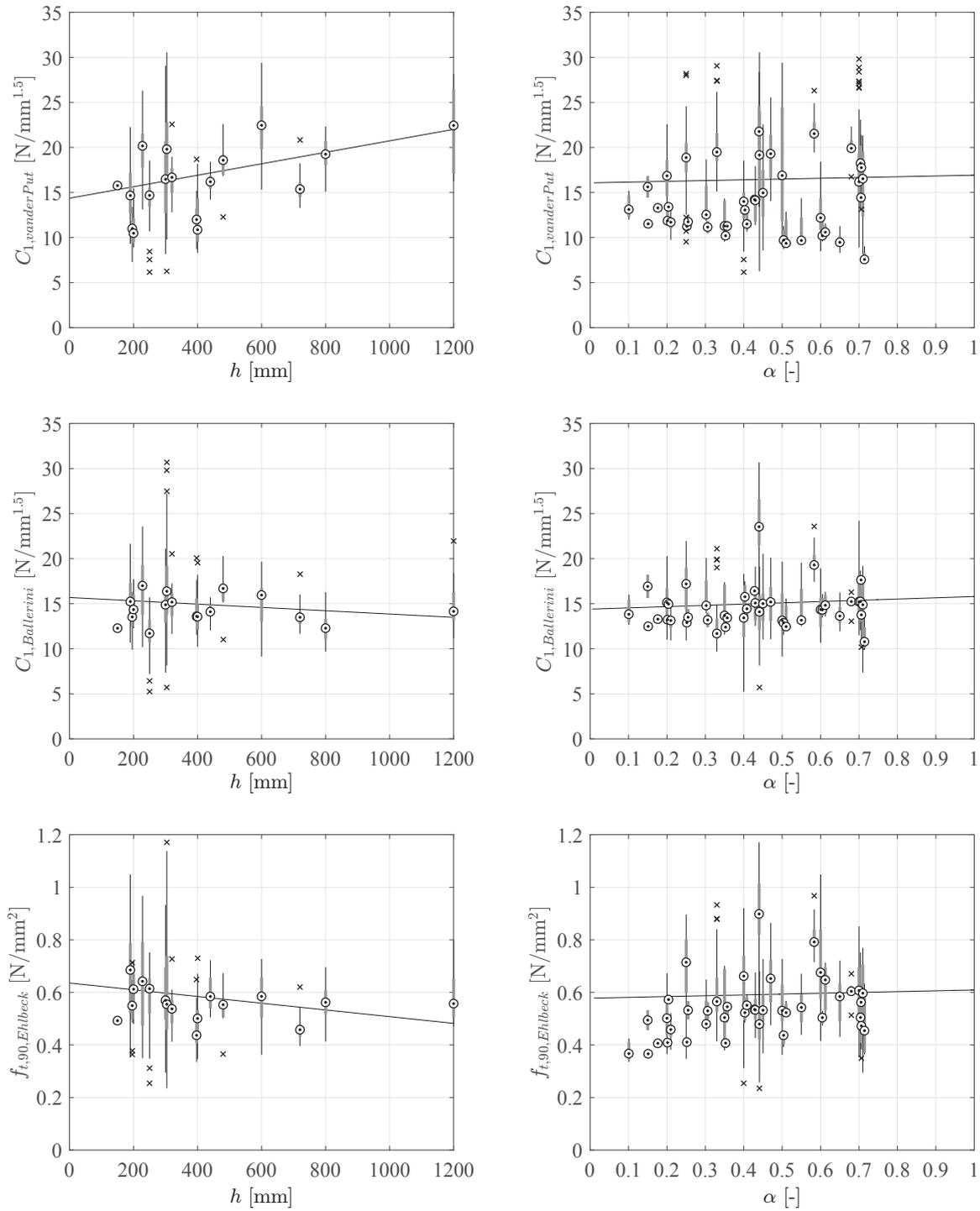


Fig. 4.2: Abhängigkeit von $C_{1,i}$ und $f_{t,90,Ehlbeck}$ von der Trägerhöhe h (links) und der relativen Anschlusshöhe α (rechts).

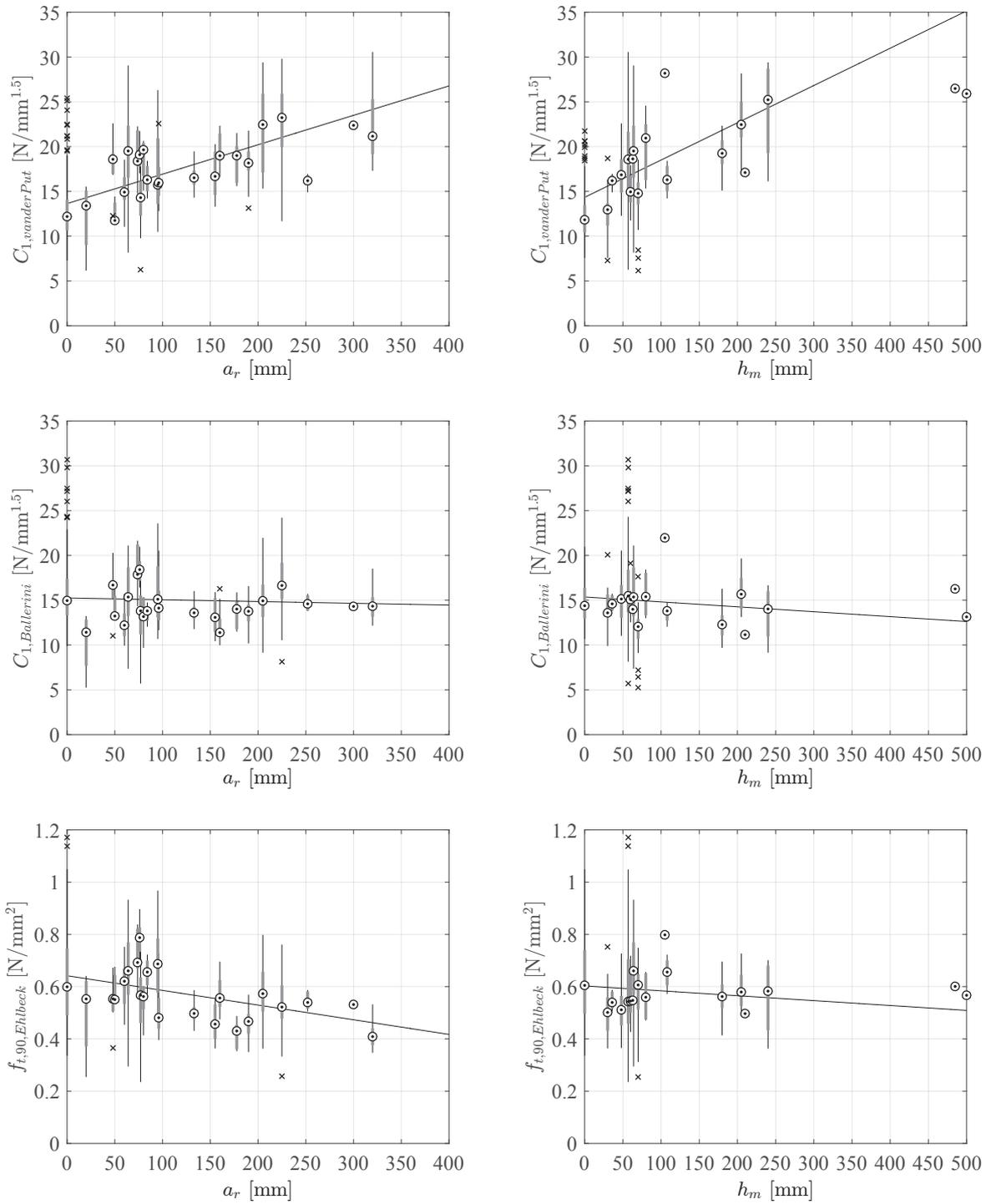


Fig. 4.3: Abhängigkeit von $C_{1,i}$ und $f_{t,90,Ehlbeck}$ von der Anschlussbreite a_r (links) und der Anschlusshöhe h_m (rechts).

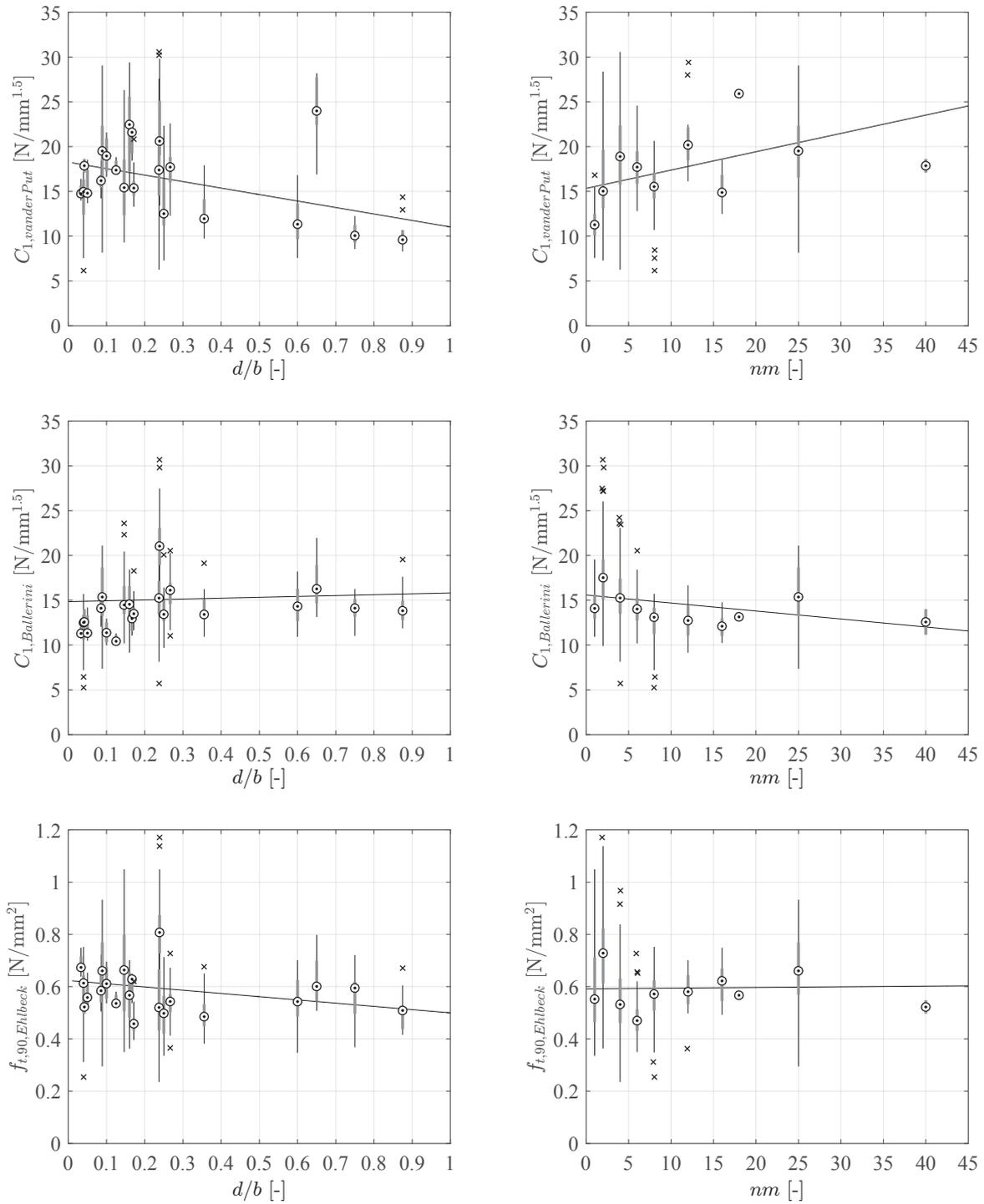


Fig. 4.4: Abhängigkeit von $C_{1,i}$ und $f_{t,90, \text{Ehlbeck}}$ von des Verhältnisses d/b (links) und der Anzahl Verbindungsmittel nm (rechts).

4.2.2 Einfluss der relativen Anschlusshöhe

Die relative Anschlusshöhe α wird in allen Ansätzen ausreichend genau berücksichtigt (Fig. 4.2). Es zeigt sich keine Abhängigkeit der Materialparameter von den relativen Anschlusshöhen. Die gleichmässige Verteilung der Versuchswerte für den Bereich zwischen $\alpha = 0.1$ bis 0.7 sorgt für eine gute Aussagekraft dieser Beurteilung.

4.2.3 Einfluss der Anschlussgeometrie

Die Anschlussgeometrie wird nur von den Ansätzen von Ballerini und Ehlbeck berücksichtigt, nicht aber vom Ansatz nach van der Put. Es zeigt sich daher in Fig. 4.3 ein deutliche Unterschätzung des Tragwiderstands von Anschlüssen mit grossen Anschlussbreiten und Anschlusshöhen. Da der Ansatz für einen Anschluss mit einem einzelnen Verbindungsmittel erstellt wurde, zeigt er für diesen Fall den geringsten Tragwiderstand. Dies könnte jedoch auch als versteckte Tragsicherheitsreserve gerade für grosse Anschlüsse genutzt werden.

Der Ansatz nach Ballerini wurde durch empirische Parameter anhand einer Vielzahl der aufgeführten Versuche kalibriert und zeigt daher kaum eine Abhängigkeit von der Anschlussgeometrie. Im Gegensatz dazu überschätzt der Ansatz von Ehlbeck eher den Tragwiderstand von breiten Anschlüssen. Dies könnte aufgrund einer ungenügenden Berücksichtigung des Volumeneinflusses der Querszugfestigkeit interpretiert werden. Der Volumeneinfluss ist in dem Ansatz durch die Potenz von -0.2 enthalten, könnte jedoch unter Umständen durchaus ausgeprägter sein. Die Anschlusshöhe hat nur einen geringen Einfluss auf diesen Ansatz.

4.2.4 Einfluss des relativen Durchmessers der Verbindungsmittel

Der relative Durchmesser der Verbindungsmittel in Bezug auf die Trägerbreite d/b wird durch den Ansatz von van der Put nicht ausreichend berücksichtigt (Fig. 4.4). Gerade für sehr dünne Verbindungsmittel in Bezug auf die Trägerbreite unterschätzt der Ansatz eher den Tragwiderstand. Solche Verbindungen mit beispielsweise dünnen Nägeln haben im Allgemeinen eine grosse Anzahl an Verbindungsmittel. Da der Ansatz für Anschlüsse mit einem einzelnen Verbindungsmittel hergeleitet wurde, unterschätzt er daher deren Tragwiderstand. Der Ansatz von Ehlbeck zeigt tendenziell ein ähnliches Verhalten, jedoch deutlich weniger ausgeprägt.

4.2.5 Einfluss der Anzahl der Verbindungsmittel

Der Materialparameter $C_{1,vanderPut}$ zeigt eine Abhängigkeit vom relativen Durchmesser der Verbindungsmittel d/b (Fig. 4.4). Da der Ansatz auf der Annahme eines Risswachstums über die gesamte Trägerbreite ausgeht, unterschätzt er den Tragwiderstand von Anschlüssen mit kleinen Verbindungsmitteldurchmessern, bei denen zunächst nur ein Teil des Querschnitts aufreisst. Dies ist vor allem für Anschlüsse mit einer grösseren Anzahl Nägeln kleinen Durchmessers massgebend. Die anderen beiden Ansätze zeigen keine solche Abhängigkeit, da sie die genaue Geometrie des Anschlusses und die Verbindungsmittelanzahl berücksichtigen.

4.2.6 Streuung der Materialparameter

Die kumulativen Verteilungen der Materialparameter sind in Fig. 4.5 angegeben. Die Materialparameter $C_{1,i}$ und die Zugfestigkeit senkrecht zur Faser $f_{t,90,Ehlbeck}$ haben eine mittlere Streuung von ca. $CoV \approx 30\%$ (van der Put), $CoV \approx 24\%$ (Ballerini) und $CoV \approx 27\%$ (Ehlbeck et al.).

Der theoretische Materialparameter $C_{1,Theorie}$ hat einen höheren Mittelwert und eine kleinere Streuung als die aus den Versuchen berechneten Werte $C_{1,i}$. Diese Abweichung und die erhöhte Streuung kann durch die Einführung eines Parameters X zur Berücksichtigung der Modellunsicherheit in den Gleichungen 4.2 und 4.3 berücksichtigt werden. Die Mittelwerte und die Streuung der Modellunsicherheiten sind für die beiden Ansätze von Ballerini (2004) und van der Put (1990) in Tab. 4.2 angegeben. Die Modellunsicherheit ist für den Ansatz von Ballerini (2004) im Mittel grösser, hat aber einen kleineren Variationskoeffizienten als für den Ansatz von van der Put (1990).

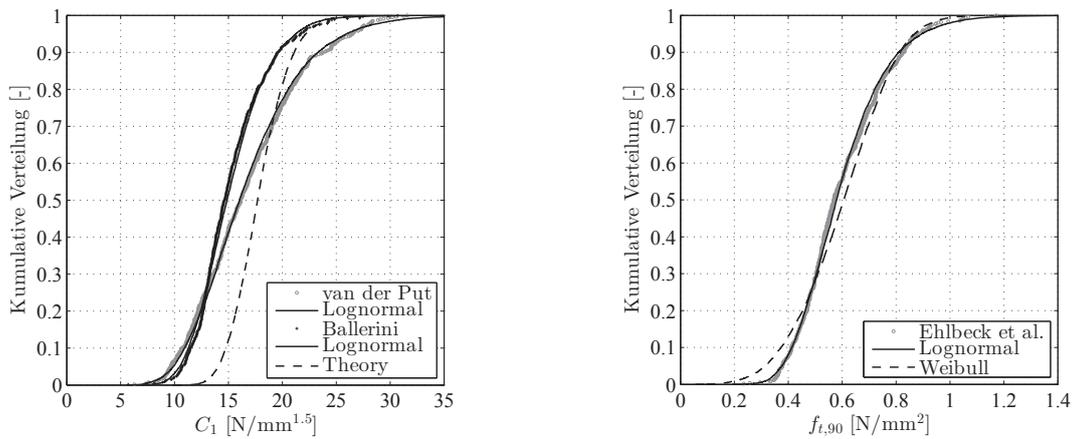


Fig. 4.5: Kumulative Verteilung der Materialparameter $C_{1,i}$ und $f_{t,90,Ehlbeck}$.

Tab. 4.2: Verteilungsparameter der Modellunsicherheit X zur Anpassung des theoretischen Materialparameters $C_{1,Theorie}$ an die Ergebnisse der Ansätze nach van der Put und Ballerini.

Modellunsicherheit	Verteilungsfunktion	Mittelwert	CoV
$X_{van\ der\ Put}$	Lognormal	0.94	29%
$X_{Ballerini}$	Lognormal	0.85	18%

4.3 Zuverlässigkeitsanalyse

4.3.1 Hintergrund zur vorliegenden Zuverlässigkeitstheorie

Aufgrund der Streuung der Materialeigenschaften und der Modellunsicherheit der Bemessungsansätze ist eine genaue Vorhersage des Tragverhaltens und des Tragwiderstands nicht möglich. Darüber hinaus sind auch die Einwirkungen auf die Bauteile mit Unsicherheiten behaftet. Um dennoch eine ausreichende Zuverlässigkeit der Tragwerke zu erhalten werden in EN 1995-1-1 (CEN 2004) und anderen Bemessungsnormen die Einwirkungen und Widerstände mit sogenannten Teilsicherheitsbeiwerten angepasst. Die Teilsicherheitsbeiwerte können in Zuverlässigkeitsanalyse bestimmt werden, wie z.B. für Ausklinkungen in (Jockwer et al. 2011, Jockwer 2014). Eine vereinfachte Bemessungsgleichung kann, wie in Köhler et al. (2007) beschrieben, wie folgt aufgestellt werden:

$$z \frac{k_{\text{mod}} \cdot R_k}{\gamma_m} - \gamma_G G_k - \gamma_Q Q_k = 0 \quad (4.5)$$

In Gleichung 4.5 sind die charakteristischen Werte generell als 5%-Fraktile Werte der Festigkeitseigenschaften definiert. Für die Einwirkungen sind ebenfalls charakteristische Werte definiert, wobei für die veränderlichen Einwirkungen 95%-Fraktile Werte festgelegt werden. Mithilfe der Teilsicherheitsbeiwerte γ_i können die Einwirkungen und Widerstände so angepasst werden, dass die gewünschte Sicherheit erreicht wird. Der Modifikationsbeiwert für die Belastungsdauer und Feuchteklasse wird im Rahmen dieser Zuverlässigkeitsstudie zu $k_{\text{mod}} = 1$ angenommen, was einer kurzen Belastungsdauer und einer Feuchteklasse 1 entspricht. Die Variable z berücksichtigt in einer Bemessungsgleichung die jeweiligen geometrischen Eigenschaften und die genaue Konfiguration des Bauteils. Dies ist der Faktor, der in Abhängigkeit der gegebenen Einwirkungen und Widerstände sowie der dazugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte während der Bemessung festgelegt wird. $z = f(\gamma_m, \gamma_G, \gamma_Q)$.

Für die Zuverlässigkeitsanalyse kann die folgende Grenzzustandsgleichung g aufgestellt werden:

$$g = z \cdot \mathbf{R} - \mathbf{G} - \mathbf{Q} \quad (4.6)$$

In dieser Grenzzustandsgleichung gehen der Widerstand \mathbf{R} und die ständigen (\mathbf{G}) und veränderlichen (\mathbf{Q}) Einwirkungen als Zufallsvariablen ein. Die Teilsicherheitsbeiwerte γ_i können so gewählt werden, dass g die erforderliche Versagenswahrscheinlichkeit nicht überschreitet (Gleichung 4.7). Diese ist gemäss JCSS (2001) als Hintergrund für den EN 1995-1-1 (CEN 2004) mit

Tab. 4.3: Zuverlässigkeitsindex β_r (und angestrebte Versagenswahrscheinlichkeiten) aus (JCSS 2001) basierend auf einer 1-jährigen Bezugsdauer für den Grenzzustand des Tragwiderstands

Relative Kosten der Sicherheitsmassnahme	Konsequenzen eines Versagens		
	gerin	mittel	gross
hoch	3.1 ($P_f \approx 10^{-3}$)	3.3 ($P_f \approx 5 \cdot 10^{-4}$)	3.7 ($P_f \approx 10^{-4}$)
normal	3.7 ($P_f \approx 10^{-4}$)	4.2 ($P_f \approx 10^{-5}$)	4.4 ($P_f \approx 5 \cdot 10^{-6}$)
gering	4.2 ($P_f \approx 10^{-5}$)	4.4 ($P_f \approx 5 \cdot 10^{-6}$)	4.7 ($P_f \approx 10^{-6}$)

$P_f = 10^{-5}$ angegeben (Tabelle 4.3).

$$P_f(g \leq 0) = P_f(z \cdot R - G - Q \leq 0) \leq 10^{-5} \quad (4.7)$$

Die Teilsicherheitsbeiwerte für die ständigen und veränderlichen Einwirkungen sind in EN 1990 (CEN 2005) bereits mit $\gamma_G = 1.35$ und $\gamma_Q = 1.5$ festgelegt. Auf Seite der Widerstände ist für Verbindungen ein Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_m = 1.3$ in EN 1995-1-1 (CEN 2004) empfohlen. Dieser Wert entspricht dem allgemeinen Wert wie auch für andere Bemessungssituationen im Holzbau. Für Bemessungssituationen mit Brettschichtholz (ausser Verbindungen) kann zum Teil noch ein etwas geringerer Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_m = 1.25$ verwendet werden. Die Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte für die allgemeinen Bemessungssituationen im Holzbau basiert auf dem Nachweis der Biegefestigkeit eines einfachen Trägers und ist in (Sørensen 2002) beschrieben. Die genaue Festlegung dieses Teilsicherheitsbeiwerts auch für andere Bemessungssituationen wird unter anderem in (Kohler et al. 2012) diskutiert. So sollte insbesondere für die Bemessung von Zug senkrecht zur Faserrichtung durchaus ein höherer Wert gewählt werden.

Für die Bemessung von Queranschlüssen sollte die Bemessungswert bzw. der entsprechende charakteristische Wert und Teilsicherheitsbeiwert also so gewählt werden, dass die gewünschte Sicherheit eingehalten wird.

4.3.2 Zuverlässigkeitsanalyse an Queranschlüssen

Für die Abschätzung der Teilsicherheitsbeiwerte müssen die Einwirkungen und Widerstände als Zufallsvariablen dargestellt werden. In (JCSS 2001) sind für die ständigen und veränderlichen Einwirkungen Normal bzw. Gamma-Verteilungen vorgeschlagen und ausserdem der CoV und der massgebende charakteristische Fraktilwert für die Bemessung angegeben (Tabelle 4.4). Weitere Einwirkungen wie Wind oder Schneelasten werden vernachlässigt.

Für die Widerstände muss die Verteilungsfunktion individuell bestimmt werden. Die Verteilung der massgebenden Materialeigenschaften, die den Tragwiderstand des Queranschlusses beeinflussen, kann für eine Simulation der Verteilungsfunktion herangezogen werden. Darüber hinaus können jedoch noch weitere Parameter einen Einfluss auf die Verteilung des Tragwiderstands haben. Das Ersetzen der Versuchsergebnisse durch eine geeignete Verteilungsfunktion bietet daher die Möglichkeit alle in den Versuchen auftretenden Effekte abzubilden. Es wird daher der Materialparameter $\mathbf{C}_{1,i}$ als Zufallsvariable für die Ansätze von van der Put und Ballerini verwendet.

$$g = z \cdot \mathbf{C}_1 - \mathbf{G} - \mathbf{Q} \quad (4.8)$$

Für den Ansatz nach Ehlbeck wird entsprechend die ermittelte Querkzugfestigkeit $f_{t,90,Ehlbeck}$ verwendet.

Anhand der Versuchsergebnisse kann für die Materialparameter $\mathbf{C}_{1,i}$ eine gute Übereinstimmung mit einer Lognormal-Verteilung mit den in Tab. 4.5 angegebenen Mittelwerten und Variationskoeffizienten gefunden werden. Die Wahl der Verteilungsfunktion der Querkzugfestig-

keit $f_{t,90,Ehlbeck}$ erfordert weiterer Überlegungen. Sie zeigt sich eine gute Übereinstimmung der aus den Versuchen berechneten Werte mit einer Lognormalverteilung. In (JCSS 2001) ist für die Querkzugfestigkeit jedoch eine Weibull-Verteilung vorgeschlagen. Diese zeigt zwar eine weniger gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen und erfordert die Annahme einer grösseren Streuung, führt jedoch zu eher konservativen Resultaten in der Zuverlässigkeitsanalyse. In Fig. 4.5 sind die ermittelten Materialparameter sowie die Verteilungsfunktionen dargestellt.

Die Zuverlässigkeitsanalyse kann nun für verschiedene Verhältnisse aus ständiger und veränderlicher Last durchgeführt werden. Als Basis kann dabei ein Verhältnis $Q/(G + Q) = 0.8$ gewählt werden, wie dies auch in (Kohler et al. 2012) vorgeschlagen wird.

4.3.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse sind in Fig. 4.6 und Tab. 4.6 dargestellt und zusammengefasst.

Um mit bestehenden 5%-Fraktilwerten als charakteristische Werte die geforderte Versagenswahrscheinlichkeit von $P_f = 10^{-5}$ einzuhalten ist für ein Verhältnis $Q/(G + Q) = 0.8$ für den Ansatz von van der Put ein etwas höherer Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_m = 1.36$ anzusetzen. Für den Ansatz von Ballerini würde sich ein etwas tieferer Teilsicherheitsbeiwert ergeben. Der Ansatz kann also als auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt werden. Es zeigt sich dabei der Vorteil der besseren Vorhersage und der geringeren Streuung des Materialparameters.

Der Ansatz von Ehlbeck et al. kann bei Annahme einer Lognormalverteilung mit dem bestehenden Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_m = 1.3$ verwendet werden. Wird jedoch von einer Weibullverteilten Querkzugfestigkeit angenommen, so wird die angestrebte Versagenswahrscheinlichkeit von $P_f = 10^{-5}$ deutlich überschritten. Ein höherer Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_m = 3.27$ wäre für diesen Ansatz notwendig.

Anstatt für verschiedene Bemessungssituationen unterschiedliche Teilsicherheitsbeiwerte vorzuschlagen, ist es jedoch sinnvoll, wie in SIA 265 (SIA 2012), die Bemessungswerte der Ma-

Tab. 4.4: Verteilungsparameter für Einwirkungen gemäss JCSS (2001) sowie die zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte.

Einwirkung	Verteilung	CoV	char. Niveau	γ
Ständig (Eigengewicht)	Normal	10%	50%	1.35
Veränderlich	Gamma	53%	98%	1.5

Tab. 4.5: Verteilungsparameter und Funktionen der Materialparameter C_1 und $f_{t,90}$, welche für die Ansätze von van der Put, Ballerini und Ehlbeck aus den Versuchen bestimmt wurde.

Ansatz	Parameter	Einheit	Verteilungsfunktion	Mittelwert	CoV
van der Put	C_1	[N/mm ^{1.5}]	Lognormal	16.7	30.6%
Ballerini	C_1	[N/mm ^{1.5}]	Lognormal	15.2	21.8%
Ehlbeck et al.	$f_{t,90}$	[N/mm ²]	Lognormal	0.60	26.5%
Ehlbeck et al.	$f_{t,90}$	[N/mm ²]	Weibull	0.60	28.3%

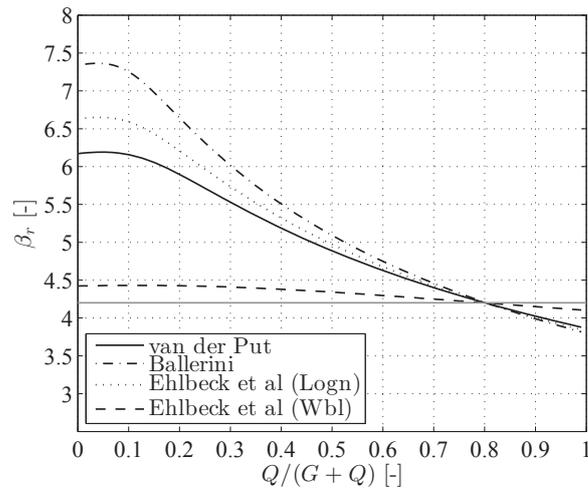


Fig. 4.6: Zuverlässigkeitsindex β_r in Abhängigkeit des Anteils an veränderlicher Last für die Ansätze nach van der Put, Ballerini und Ehlbeck.

Tab. 4.6: Mittel-, 5%-, und Bemessungswerte der Materialparameter C_1 und der Querkzugfestigkeiten $f_{t,90}$ sowie die zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte γ_m für den Bemessungsansatz nach van der Put, Ballerini und Ehlbeck für ein Verhältnis $Q/(G+Q) = 0.8$.

Ansatz	Parameter	Einheit	Mittelwert	5%-Fraktilwert	Bemessungswert	γ_m
van der Put	C_1	$[\text{N}/\text{mm}^{1.5}]$	16.7	9.8	7.19	1.36
Ballerini	C_1	$[\text{N}/\text{mm}^{1.5}]$	15.2	10.4	8.39	1.25
Ehlbeck et al. (Logn)	$f_{t,90}$	$[\text{N}/\text{mm}^2]$	0.60	0.38	0.292	1.30
Ehlbeck et al. (Wbl)	$f_{t,90}$	$[\text{N}/\text{mm}^2]$	0.60	0.31	0.12	3.27

Materialparameter und Festigkeiten direkt anzugeben. Durch die Festlegung von materialspezifischen Koeffizienten in den Bemessungsgleichungen kann dadurch auf die besonderen Bemessungssituationen eingegangen werden. Für Ausklinkungen ist dies bereits Praxis.

Der Materialparameter C_1 kann bei Verwendung des Ansatzes nach van der Put mit einem Bemessungswert von $C_{1,vanderPut,d} = 7.2 \text{ N}/\text{mm}^{1.5}$ angesetzt werden. Bei Verwendung von $\gamma_m = 1.3$ beträgt der zugehörige charakteristische Wert des Materialparameters $C_{1,k} = 9.3 \text{ N}/\text{mm}^{1.5}$. Die Verwendung des aufwendigeren und genaueren Ansatzes von Ballerini kann in Hinblick auf die Effizienz sinnvoll sein.

Der Bemessungswert der Querkzugfestigkeit in Norm SIA 265 (SIA 2012) liegt mit Werten von $f_{t,90,d} = 0.15 \text{ N}/\text{mm}^2$ für BSH und $f_{t,90,d} = 0.1 \text{ N}/\text{mm}^2$ für Vollholz auf dem Niveau der für den Ansatz von Ehlbeck notwendigen niedrigen Festigkeit von $f_{t,90,d} = 0.12 \text{ N}/\text{mm}^2$ bei Annahme einer Weibullverteilung (Tab. 4.6). Bei Verwendung der in EN 14080 (CEN 2013) angegebenen charakteristischen Werte für die Querkzugfestigkeit wird die Festigkeit jedoch selbst bei Annahme einer lognormalverteilten Querkzugfestigkeit deutlich überschätzt. Eine Anpassung der charakteristischen Werte in EN 14080 (CEN 2013) (und EN 338 (CEN 2009)) an Werte abweichend von den 5%-Fraktilwerten erscheint daher sinnvoll.

Wird für die Ansätze nach van der Put und Ballerini ebenfalls eine Weibull-verteilte Festigkeit angesetzt mit den Streuungen $CoV = 30.6\%$ für den Ansatz von van der Put und $CoV = 25.9\%$ für den Ansatz von Ballerini, so ergeben sich die deutlich tieferen Bemessungswerte der Materialparameter mit $C_{1,vanderPut,d} = 2.1 \text{ N/mm}^{1.5}$ und $C_{1,Ballerini,d} = 3.0 \text{ N/mm}^{1.5}$

Kapitel 5

Vorschlag eines Bemessungsansatzes

5.1 Bemessungsansatz für Queranschlüsse

An einen Bemessungsansatz für Queranschlüsse werden verschiedene Anforderungen gestellt. So soll er möglichst einfach sein, dabei aber für eine Vielzahl von verschiedenen Konfigurationen gültig sein und eine effiziente Bemessung ermöglichen. Darüber hinaus muss natürlich die Anforderung an die Tragsicherheit gewährleistet sein.

Die Schweizer Norm SIA 265 (SIA 2012) verfolgt das Konzept, dass Quersugbeanspruchungen im Holz wenn möglich vermieden werden sollten. Oftmals lässt sich bei einer verbesserten Planung ein Grossteil der Situationen mit Quersugbeanspruchungen vermeiden. Ein Bemessungsansatz für Queranschlüsse sollte daher zu einem gewissen Masse eher eine konservative Bemessung bewirken. Aufgrund dieser Überlegungen wird der Ansatz von van der Put als geeignet vorgeschlagen, da er die Anforderungen bezüglich Einfachheit erfüllt und mit den richtigen Materialkennwerten eine sichere Bemessung zulässt. Der Vorschlag für einen Bemessungsansatz für Queranschlüsse lautet daher wie folgt:

$$F_{90,Ed} \leq F_{90,Rd} = 2C_{1,d}b_{eff}\sqrt{\frac{\alpha h}{1-\alpha}} \quad (5.1)$$

mit

$C_{1,d}$ Materialparameter

b_{eff} mitwirkende Trägerbreite

5.2 Materialparameter

Der Materialparameter $C_{1,d}$ kann für Bauteile aus Brettschichtholz oder Vollholz aus Nadelholz (Fichte) wie folgt gewählt werden: Aus den Versuchen ergibt sich für den vorliegenden Ansatz ein Mittelwert von $C_{1,mean} = 16.7 \text{ N/mm}^{1.5}$ und ein 5% Fraktilwert von $C_{1,k} = 9.8 \text{ N/mm}^{1.5}$. Basierend auf einer angestrebten Versagenswahrscheinlichkeit von $P_f < 10^{-5}$ kann der Bemessungswert $C_{1,EC5,d} = 7.2 \text{ N/mm}^{1.5}$ für $k_{mod} = 1.0$ gewählt werden. Bei Annahme der in

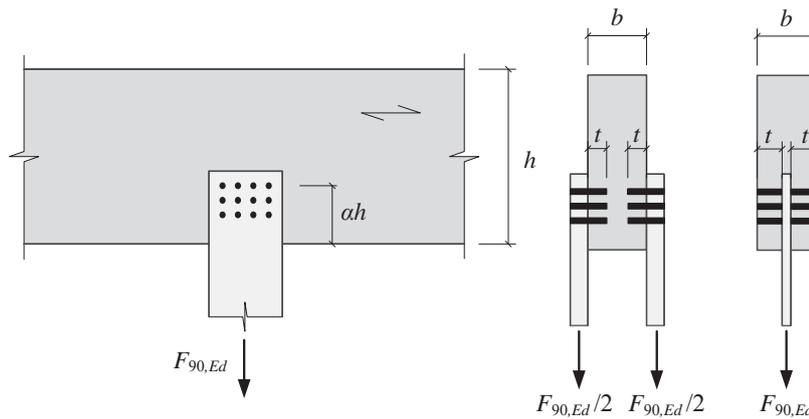


Fig. 5.1: Beispiel eines Queranschlusses mit Bezeichnungen.

Norm SIA 265 (SIA 2012) angesetzten etwa 25%igen Reduktion des Bemessungswertes durch Berücksichtigung des Beiwertes η_m wird ein Wert von $C_{1,d} = 5.5 \text{ N/mm}^{1.5}$ vorgeschlagen.

Für andere Baustoffe wie LVL oder Bauteile aus Laubholz ist der Materialparameter anzupassen. Erste vergleichende Versuche zeigen, dass teilweise deutlich höhere Materialparameter zu erwarten sind. Aufgrund der beschränkten Datenmenge kann vereinfacht und auf der sicheren Seite liegende der gleiche Materialparameter für LVL und Laubholz wie auch für Nadelholz verwendet werden.

5.3 Mitwirkende Trägerbreite

Die mitwirkende Trägerbreite wird als das Minimum der Trägerbreite b und der Summe der Einbindetiefen der Verbindungsmittel auf beiden Seiten des Trägers angesetzt.

Für einen einseitigen Queranschluss ist die mitwirkende Trägerbreite:

$$b_{eff} = \min \{b; t\}$$

Für einen beidseitigen Queranschluss oder einen mittigen Queranschluss (z.B. eingeschlitztes Stahlblech) ist die mitwirkende Trägerbreite:

$$b_{eff} = \min \{b; 2t\}$$

5.4 Abstand zwischen Queranschlüssen

Eine wichtige Fragestellung, die bis jetzt noch nicht ausreichend erforscht wurde, ist wie der Abstand zwischen einzelnen Queranschlüssen den Tragwiderstand beeinflusst. In der DIN 1052 (DIN 2008) ist die Angabe gemacht, dass ab einem Abstand von $l_l \geq 2h$ zwischen Queranschlüssen diese als einzeln betrachtet werden können. Ist der Abstand $l_l \leq 0.5h$ so können die

beiden Anschlüsse als ein Anschluss betrachtet werden. Liegt der Abstand zwischen $0.5h < l_l < 2h$ kann der Tragwiderstand zwischen den beiden Werten interpoliert werden.

5.5 Maximale und minimale relative Anschlusshöhen

In DIN 1052 (DIN 2008) ist die minimalen und maximalen relativen Anschlusshöhen mit $0.2 \leq \alpha \leq 0.7$ angegeben. Für kleinere Anschlusshöhen dürfen nur kurzfristige Belastungen (z.B. infolge Windsog) angenommen werden. Für grössere Anschlusshöhen ist kein Quersugversagen mehr zu erwarten. Eine Begrenzung der minimalen relativen Anschlusshöhe auf $\alpha \geq 0.2$ erscheint sinnvoll, gerade vor dem Hintergrund des spröden Versagens auf Quersug und der starken Reduzierung der Festigkeit infolge der Belastungsdauer. Für Anwendungen mit grossen relativen Anschlusshöhen $\alpha > 0.7$ ist der Tragwiderstand gegen Quersugversagen des Anschlusses im Allgemeinen hoch und eher ein Versagen der Verbindung zu erwarten. Trotzdem kann es für relativen Anschlusshöhen $\alpha \geq 0.7$ zu einer Rissbildung im Anschlussbereich kommen. Sind erhöhte Anforderungen an das Aussehen gestellt, so sollten möglichst steife Verbindungsmittel gewählt werden, um ein lokales Eindringen und Aufreissen zu verhindern. Darüberhinaus sollte eine geeignete Verstärkung in direkter Nähe zu den Verbindungsmitteln angebracht werden.

5.6 Weitere Einflüsse

Untersuchungen zum Bruchverhalten von quersugbeanspruchten Bauteilen unter wechselnden klimatischen Bedingungen wurden von Larsen and Gustafsson (2001) und Gustafsson and Larsen (2001) durchgeführt. Den grössten Einfluss auf das Versagen der quersugbeanspruchten Bauteile hat eine Änderung der Umgebungsfeuchte. Darüberhinaus zeigt sich eine deutliche Reduzierung der Festigkeit mit der Belastungsdauer. Eine Begrenzung der Anwendung von Queranschlüssen auf Anwendungen in Umgebungen, die nur zu geringen Feuchteänderungen führen, erscheint daher sinnvoll. Im Allgemeinen wird daher die Anwendung auf Feuchteklassen 1 und 2 beschränkt, es ist jedoch darauf zu achten, dass gerade in Feuchtekategorie 1 nur sehr geringe Feuchteänderungen (z.B. Austrocknen) auftreten. Gemäss Larsen and Gustafsson (2001) kann ein Sicherheitsniveau bei einer Belastungsdauer von 100 Jahren von 0.25 im Vergleich zu einer Kurzzeitbelastung abgeschätzt werden.

Danksagung

Die Autoren möchten sich für die finanzielle Unterstützung des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung des Bundesamts für Umwelt (BAFU) recht herzlich bedanken. Ebenfalls wird den Mitarbeitern der Bauhalle des Instituts für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich und namentlich Herrn Patrik Morf für die tatkräftige Unterstützung während der Versuche herzlich gedankt.

Literaturverzeichnis

- Aicher S., Boström L., Gierl M., Kretschmann D., Valentin G. (1997): Determination of fracture energy of wood in mode II - RILEM TC 133 Report. Tech. rep., SP Swedish National Testing and Research Institute, Borås, Sweden
- Aicher S., Dill-Langer G., Ranta-Maunus A. (1998): Duration of load effect in tension perpendicular to the grain of glulam in different climates. *European Journal of Wood and Wood Products* 56(5):295–305
- Aicher S., Dill-Langer G., Klöck W. (2002): Evaluation of different size effect models for tension perpendicular to grain strength of glulam. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 35, Kyoto, Japan, Paper No. CIB-W18/35-6-1
- Ballerini M. (1999): A new set of experimental tests on beams loaded perpendicular-to-grain by dowel-type joints. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 32, Graz, Austria, Paper No. CIB-W18/32-7-2
- Ballerini M. (2004): A new prediction formula for the splitting strength of beams loaded by dowel-type connections. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 37, Edingburgh, Scotland, Paper No. CIB-W18/37-7-5
- Ballerini M., Giovanella A. (2003): Beams transversally loaded by dowel-type joints: influence on splitting strength of beam thickness and dowel size. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 36, Colorado, USA, Paper No. CIB-W18/36-7-7
- Barrett J.D. (1974): Effect of size on tension perpendicular-to-grain strength of douglas-fir. *Wood and Fiber Science* 6:126–143
- Bejtka I. (2005): Verstärkung von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben. PhD thesis, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, Germany
- CEN (2004): EN 1995-1-1: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium
- CEN (2005): EN 1990/A1: Eurocode - Basis of structural design. European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium
- CEN (2009): EN 338: Structural timber - Strength classes. European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium
- CEN (2013): EN 14080: Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirement. European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium
- Colling F. (1986): Influence of volume and stress distribution on the shear strength and tensile strength perpendicular to grain. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 19, Florence, Italy, Paper No. CIB-W18/19-12-3

- CSA (2009): O86-09, Engineering design of wood, vol O86-09. Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario, Canada
- DIN (2008): DIN 1052: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. DIN 1052 (2008-12), DIN Deutsche Institut für Normung e.V., Berlin, Germany
- DIN (2013): DIN EN 1995-1-1/NA: National Annex - Nationally determined parameters - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. DIN Deutsche Institut für Normung e.V., Berlin, Germany
- Ehlbeck J., Görlacher R. (1983): Tragverhalten von Queranschlüssen mittels Stahlformteilen, insbesondere Balkenschuhen, im Holzbau. Tech. rep., Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, Universität Fridericiana Karlsruhe, Germany
- Ehlbeck J., Görlacher R. (1985): Zum querzugnachweis bei anschlüssen mittels stahlblechformteilen. Bauen mit Holz 87
- Ehlbeck J., Görlacher R. (1991): Empfehlung zum einheitlichen genaueren querzugnachweis für anschlüsse mit mechanischen verbindungsmiteln. Bauen mit Holz 93:825–828
- Ehlbeck J., Görlacher R., Werner H. (1989): Determination of perpendicular to grain stresses in joints with dowel-type fasteners - a draft proposal for design rules. Paper No. CIB-W18/22-7-2
- Franke B., Quenneville P. (2011): Design approach for the splitting failure of dowel-type connections loaded perpendicular to grain. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 44, Vancouver, Canada, Paper No. CIB-W18/44-7-5
- Franke S., Franke B., Quenneville P. (2012): Analysis of the failure behavior of multiple dowel-type connections loaded perpendicular to grain in lvl. In: Proc. of the 12th World conference on timber engineering, Auckland, New Zealand
- Gehri E. (1988): Tragmodell für queranschlüsse
- Gisler D. (2014): Untersuchungen zur Tragsicherheit unterschiedlicher Bemessungsansätze für Queranschlüsse im Holzbau. Master Thesis, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Switzerland
- Gustafsson P., Larsen H. (2001): Dowel joints loaded perpendicular to grain. In: Proceedings of the Int. RILEM Symposium, Stuttgart, Germany, pp 577–586
- Habkirk R. (2006): Bolted wood connections loaded perpendicular-to-grain - effect of wood species. Tech. rep., Department of Civil Engineering, Royal Military College of Canada, Kingston, Ontario, Canada, master thesis
- JCSS (2001): Probabilistic Model Code. Joint Committee of Structural Safety, available online at: <http://www.jcss.byg.dtu.dk/>
- Jensen J.L. (2005): Quasi-non-linear fracture mechanics analysis of splitting failure in simply supported beams loaded perpendicular to grain by dowel joints. Journal of Wood Science 51(6):577–582
- Jensen J.L., Quenneville P. (2011): Splitting of beams loaded perpendicular to grain by connections—some issues with EC 5. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 44, Alghero, Italy, Paper No. CIB-W18/44 Note

- Jensen J.L., Gustafsson P.J., Larsen H.J. (2003): A tension fracture model for joints with rods or dowels loaded perpendicular to grain. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 36, Colorado, USA, Paper No. CIB-W18/36-7-9
- Jensen J.L., Quenneville P., Girhammar U.A., Källsner B. (2012): Beams loaded perpendicular to grain by connections—combined effect of edge and end distance. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 45, Växjö, Sweden, Paper No. CIB-W18/45-7-2
- Jockwer R. (2014): Structural behaviour of glued laminated timber beams with unreinforced and reinforced notches. PhD thesis, ETH Zurich, Institute for Structural Engineering, Zurich, Switzerland
- Jockwer R., Steiger R., Frangi A., Kohler J. (2011): Impact of material properties on the fracture mechanics design approach for notched beams in Eurocode 5. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 44, Alghero, Italy, Paper No. CIB-W18/44-6-1
- Jockwer R., Frangi A., Steiger R. (2015): Evaluation of the reliability of design approaches for connections perpendicular to the grain. In: Proc. of the 2nd Meeting of INTER, Šibenik, Croatia, Paper No. INTER/48-7-4
- Kasim M.H. (2002): Bolted timber connections loaded perpendicular-to-grain - effect of row spacing on resistance. Tech. rep., Department of Civil Engineering, Royal Military College of Canada, Kingston, Ontario, Canada, master thesis
- Köhler J., Sørensen J.D., Faber M.H. (2007): Probabilistic modeling of timber structures. *Structural Safety* 29(4):255–267
- Kohler J., Steiger R., Fink G., Jockwer R. (2012): Assessment of selected Eurocode based design equations in regard to structural reliability. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 45, Växjö, Sweden, pp CIB-W18/45-102-1, Paper No. CIB-W18/45-102-1
- Larsen H., Gustafsson P. (2001): Dowel joints loaded perpendicular to grain. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 34, Venice, Italy, Paper No. CIB-W18/34-7-4
- Larsen H., Gustafsson P.J. (1990): The fracture energy of wood in tension perpendicular to the grain. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 23, Lisbon, Portugal, Paper No. CIB-W18/23-19-2
- Lehoux M.C.G., Quenneville J.H.P. (2004): Bolted wood connections loaded perpendicular-to-grain, a proposed design approach. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 37, Edinburgh, Schottland, Paper No. CIB-W18/37-7-4
- Leicester R.H. (1973): Effect of size on the strength of structures. Commonwealth scientific and industrial research organization CSIRO, Melbourne, Australia
- Leijten A.J.M., Jorissen A.J.M. (2001): Splitting strength of beams loaded by connections perpendicular to grain, model validation. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 34, Venice, Italy, Paper No. CIB-W18/34-7-1
- Lignum (1990): Holzbau-Tabellen HBT 2. Lignum, Zürich
- Mistler H.L. (1979): Die Tragfähigkeit des am Endauflager unten rechtwinklig ausgeklinkten Brettschichtträgers. PhD thesis, Technischen Hochschule Karlsruhe, Karlsruhe, Germany

- Möhler K., Lautenschläger R. (1978): Großflächige Queranschlüsse bei Brettschichtholz. Forschungsbericht des Lehrstuhls für Ingenieurholzbau und Baukonstruktion, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, Germany
- Möhler K., Siebert W. (1981): Queranschlüsse bei Brettschichträgern oder Vollholzbalken. Bauen mit Holz 83:84–89
- Möhler K., Siebert W. (1983): Erhöhung der Querkzugfestigkeit in gefährdeten Bereichen, vol T 1194. Fraunhofer IRB Verlag
- van der Put T.A.C.M. (1990): Tension perpendicular to the grain at notches and joints. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 23, Lisbon, Portugal, Paper No. CIB-W18/23-10-1
- van der Put T.A.C.M., Leijten A.J.M. (2000): Evaluation of perpendicular to grain failure of beams caused by concentrated loads of joints. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 33, Delft, The Netherlands, Paper No. CIB-W18/33-7-7
- Quenneville J., Mohammad M. (2001): A proposed canadian design approach for bolted connections loaded perpendicular-to-grain. In: Proceedings of the International RILEM symposium on joints in timber structures, pp 61–70
- Reske R. (1999): Bolted timber connections loaded perpendicular to grain: influence of joint configuration parameters on strength. Tech. rep., Department of Civil Engineering, Royal Military College of Canada, Kingston, Ontario, master thesis
- Reske R., Mohammad M., Quenneville J. (2000): Influence of joint configuration parameters on strength of perpendicular-to-grain bolted timber connections. In: Proceedings of 6th World Timber Engineering Conference, WCTE
- Schoenmakers J.C.M. (2010): Fracture and failure mechanisms in timber loaded perpendicular to the grain by mechanical connections. PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven
- SIA (2012): Norm SIA 265:2012 - Holzbau. SIA - Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: Zürich, Schweiz
- SIA (2012): Standard SIA 265 - Timber Structures. SIA Swiss Society of Engineers and Architects, Zurich, Switzerland
- Sørensen J.D. (2002): Calibration of partial safety factors in Danish structural codes. In: Proc. of the JCSS Workshop on Reliability Based Code Calibration, Zurich, Switzerland
- Thiede C. (2014): Vergleich vorhandener Bemessungsansätze für Queranschlüsse im Holzbau. Master Thesis, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München, Germany
- Weibull W. (1939): A statistical theory of the strength of materials. Royal Swedish Institute for Engineering Research, 141, p 45
- Yasamura M. (2001): Criteria for damage and failure of dowel-type joints subjected to force perpendicular to grain. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 34, Venice, Italy, Paper No. CIB-W18/34-7-9
- Zarnani P., Quenneville P. (2013): Wood splitting capacity in timber connections loaded transversely: Riveted joint strength for full and partial width failure modes. In: Proc. of the CIB-W18 Meeting 46, Vancouver, Kanada, Paper No. CIB-W18/46-7-5