

**Tragfähigkeit und Bemessung von
Brettschichtholzträgern mit runden
Durchbrüchen – Sicherheitsrelevante
Modifikationen der Bemessungs-
verfahren nach Eurocode 5 und
DIN 1052**

T 3171

T 3171

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2008

ISBN 978-3-8167-7766-3

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Forschungsbericht

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)
Kolonnenstraße 30 L
10829 Berlin

Auftrags-Nr. (Kunde): ZP 52-5-13.161-1092/04

Auftrags-Nr. (MPA): 760 4050 3000 BANR 40503

Forschungsvorhaben: Tragfähigkeit und Bemessung von Brettschichtholzträgern mit runden Durchbrüchen – Sicherheitsrelevante Modifikationen der Bemessungsverfahren nach Eurocode 5 und DIN 1052

Beginn des Forschungsvorhabens: 15.03.2004

Datum des Berichts: 04.05.2006

Seitenanzahl: 64 Textseiten

Beilagen: 63

Anhang: 14

Gesamtseitenzahl: 141

1	<u>EINLEITUNG</u>	<u>1</u>
2	<u>BEMESSUNGSMODELLE IN DER LITERATUR.....</u>	<u>3</u>
2.1	ALLGEMEINES	3
2.2	BEMESSUNGSANSATZ NACH DIN 1052:2004 FÜR RUNDE DURCHBRÜCHE	3
2.3	BEMESSUNGSANSATZ NACH PREN 1995-1-1:2003	5
2.4	DURCHBRÜCHE IN GEKRÜMMTEN TRÄGERN NACH DIN 1052:2004 UND NACH PREN 1995-1-1:2003.....	7
2.5	GEGENÜBERSTELLUNG DER BEMESSUNGSANSÄTZE NACH DIN 1052:2004 UND NACH PREN 1995-1-1:2003	7
3	<u>BAUTEILVERSUCHE ZUR KALIBRIERUNG VON BEMESSUNGSANSÄTZEN.....</u>	<u>10</u>
3.1	VERSUCHE IN DER LITERATUR.....	10
3.2	BAUTEILVERSUCHE IM RAHMEN DES FORSCHUNGSVORHABENS.....	11
3.2.1	UNTERSUCHTE TRAGLASTRELEVANTE EINFLUßPARAMETER.....	11
3.2.2	VERSUCHSAUFBAU UND DURCHFÜHRUNG.....	13
4	<u>VERSUCHSERGEBNISSE DES FORSCHUNGSVORHABENS.....</u>	<u>14</u>
4.1	SCHÄDIGUNGSENTWICKLUNG AM DURCHBRUCH.....	14
4.1.1	PRINZIPIELLE SCHÄDIGUNGSENTWICKLUNG AM DURCHBRUCH	14
4.1.2	ERLÄUTERUNG DER SCHÄDIGUNGSENTWICKLUNG ANHAND EINES BEISPIELS	16
4.2	SCHÄDIGUNG DER UNTERSUCHTEN TRÄGER	17
4.2.1	VERSAGENSARTEN	17
4.2.2	LAST-DURCHBIEGUNGSKURVEN	19
4.2.3	RIBLÄNGEN	20
4.3	VERSAGENSLASTEN.....	21
4.3.1	ALLGEMEINES	21
4.3.2	DEFINITION DER LASTEN.....	21
4.3.2.1	Anrißlasten.....	23
4.3.2.2	Durchrißlasten.....	23
4.3.2.3	Höchstlasten.....	24
4.3.3	DURCHRIßLASTEN UND HÖCHSTLASTEN.....	24
4.3.3.1	Einfluß der relativen Durchbruchgröße (d/h-Verhältnis).....	26

4.3.3.2	Einfluß der Trägerhöhe (Größeneinfluß)	26
4.3.3.3	Momenteneinfluß (M/V-Verhältnis).....	27
4.3.3.4	Einfluß der die Trägerform	27
4.4	ZUSAMMENFASSUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE	27
<u>5 GEGENÜBERSTELLUNG: EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE – BEKANNTE</u>		
<u>BEMESSUNGSANSÄTZE.....</u>		
5.1.1	GEGENÜBERSTELLUNG MIT DURCHRIßLASTEN	28
5.1.2	GEGENÜBERSTELLUNG MIT HÖCHSTLASTEN	29
5.1.3	ZUSAMMENFASSUNG	30
<u>6 BEMESSUNGSRELEVANTE SPANNUNGEN AM DURCHBRUCH</u>		
6.1	ALLGEMEINES	32
6.2	MODELLIERUNG UND MATERIALPARAMETER	32
6.3	GERADE TRÄGER	33
6.3.1	SPANNUNGEN RECHTWINKLIG ZUR FASERRICHTUNG ZUFOLGE REINER MOMENTENBEANSPRUCHUNG.....	33
6.3.2	SPANNUNGEN RECHTWINKLIG ZUR FASERRICHTUNG ZUFOLGE REINER QUERKRAFTBEANSPRUCHUNG	33
6.3.3	SPANNUNGEN RECHTWINKLIG ZUR FASERRICHTUNG ZUFOLGE KOMBINIRTER MOMENTEN- QUERKRAFTBEANSPRUCHUNG	34
6.4	GEKRÜMMTER TRÄGER	34
6.4.1	SPANNUNGEN RECHTWINKLIG ZUR FASERRICHTUNG ZUFOLGE REINER MOMENTENBEANSPRUCHUNG.....	35
6.4.2	SPANNUNGEN RECHTWINKLIG ZUR FASERRICHTUNG ZUFOLGE REINER QUERKRAFTBEANSPRUCHUNG	36
6.4.3	SPANNUNGEN RECHTWINKLIG ZUR FASERRICHTUNG ZUFOLGE KOMBINIRTER M/V- BEANSPRUCHUNG.....	36
<u>7 WEIBULL-THEORIE BASIERTES BEMESSUNGSMODELL</u>		
7.1	ALLGEMEINES	37
7.2	ABRIß DER WEIBULL-THEORIE.....	37
7.3	GEGENÜBERSTELLUNG REFERENZPRÜFKÖRPER – DURCHBRUCH	38
7.4	SCHÄDIGUNGSRELEVANTER INTEGRATIONSBEREICH AM DURCHBRUCH.....	39
7.4.1	ALLGEMEINES	39
7.4.2	BESTIMMUNG DES INTEGRATIONSBEREICHES AM DURCHBRUCH.....	41

7.4.3	BESTIMMUNG DER FORMBEIWERTE K_{DIS}	43
7.5	BEMESSUNGSMODELL.....	44
7.5.1	EINWIRKUNGSSEITE.....	44
7.5.2	WIDERSTANDSSEITE.....	44
7.5.3	NACHWEIS.....	46
7.6	KALIBRIERUNG DES WEIBULL-BASIERTEN BEMESSUNGSMODELLS ANHAND DER VERSUCHSERGEBNISSE.....	46
7.6.1	DISKUSSION: UNKALIBRIERTE BEMESSUNGSERGEBNISSE – EXPERIMENTELLE DURCHRIßLASTEN 47	
7.6.2	DISKUSSION: KALIBRIERTE BEMESSUNGSERGEBNISSE – EXPERIMENTELLE DURCHRIßLASTEN .48	
7.6.3	DISKUSSION: UNKALIBRIERTE BEMESSUNGSERGEBNISSE – EXPERIMENTELLE HÖCHSTLASTEN49	
7.6.4	DISKUSSION: KALIBRIERTE BEMESSUNGSERGEBNISSE – EXPERIMENTELLE HÖCHSTLASTEN.....49	
7.7	GEGENÜBERSTELLUNG VON BEMESSUNGSANSÄTZEN.....	51
7.8	ANMERKUNGEN ZUM BEMESSUNGSMODELL.....	54
8	<u>ZUSAMMENFASSUNG.....</u>	<u>54</u>
8.1	AUSGANGSLAGE.....	54
8.2	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN.....	55
8.3	BEMESSUNGSANSATZ.....	57
9	<u>LITERATUR.....</u>	<u>60</u>

BEILAGEN

ANHANG

1 Einleitung

Vollwandige Brettschichtholzträger finden insbesondere bei weitspannenden Konstruktionen wie Hallenbauten eine immer breitere Anwendung. Aus nutzungsbedingten oder architektonischen Gründen ist es hierbei häufig erforderlich, daß die oft sehr hohen Träger, mit Bauhöhen von bis zu rd. 2,5 Metern, mit Durchbrüchen versehen werden. Durchbrüche stellen jedoch, abhängig von ihrer Größe und Anordnung, eine nicht unerhebliche Schwachstelle in der Konstruktion dar. Der Durchbruch stört den Biege- und Schubspannungsverlauf im Biegeträger. Infolge der Spannungsumlagerungen entstehen am Durchbruchrand die für den anisotropen Werkstoff Holz besonders kritischen Zugspannungen rechtwinklig zur Faserrichtung.

Die Motivation der vorliegenden Arbeit beruht auf der Tatsache, daß die Bemessung von Durchbrüchen in Biegeträgern aus Brettschichtholz in den deutschen und europäischen Normen und in Normentwürfen der letzten Jahre sehr unterschiedlich gehandhabt wird. Die deutsche Holzbau-Bemessungsnorm DIN 1052:1988 bemißt durchbrochene Träger sehr restriktiv und begrenzt im Grunde nur die geometrischen Abmessungen. Zuzufolge dieser Norm ist die Mehrzahl der Durchbrüche mit baupraktischen Abmessungen zu verstärken. Die europäische-deutsche Norm DIN V ENV 1995-1-1:1994 dagegen enthält überhaupt keine Bemessung für Durchbrüche. Im Prozeß der Überarbeitung der beiden genannten Normen wurden jeweils Bestrebungen unternommen, für Durchbrüche einen zutreffenden Bemessungsansatz mit vertretbarem Berechnungsaufwand zu integrieren. So enthalten die europäischen Normentwürfe prEN 1995-1-1:2002 und prEN 1995-1-1:2003 sowie die neue deutsche Holzbaunorm DIN 1052:2004 Bemessungsansätze für Durchbrüche, welche jedoch auf völlig unterschiedlichen mechanischen Ersatzmodellen beruhen. Der deutschen Norm DIN 1052:2004 liegt ein klassischer Festigkeitsansatz zugrunde, wohingegen der europäische Normentwurf prEN 1995-1-1:2003 auf einem bruchmechanischen Versagensmodell basiert. Weiterhin unterscheiden sich die beiden Bemessungsansätze hinsichtlich der unterschiedlichen Berücksichtigung wesentlicher Einflußparameter wie beispielsweise des Größeneinflusses und der Beanspruchungsart. Demzufolge zeigen Vergleichsrechnungen mit beiden Bemessungsansätzen für unterschiedliche Träger-, Durchbruchs- und Belastungskonfigurationen zum Teil erhebliche Unterschiede in den vorhergesagten Traglasten [Aic2002b, Höf2005]. Die seitens der MPA Stuttgart vorgebrachten Kritikpunkte führten letztlich dazu, daß die im europäischen Normentwurf prEN 1995-1-1:2003 enthaltene Durchbruchsbemessung in EN 1995-1-1:2004 nicht mehr enthalten ist und der Eurocode 5 nunmehr kein Bemessungskonzept für Durchbrüche vorsieht.

Das Problem von Durchbrüchen in Trägern mit planmäßiger Querkzugbeanspruchung, d.h. insbesondere in (schwach) gekrümmten Trägern mit positivem Biegemoment wird in den bekannten Normenwerken ebenfalls deutlich unterschiedlich behandelt. Nach DIN 1052:2004 sind Durchbrüche in Trägern mit planmäßig vorliegender Querkzugbeanspruchung unabhängig vom jeweilig vorherrschenden Querkzugspannungsniveau zu verstärken, während nach prEN 1995-1-1:2003 eine genauere, jedoch in keiner Weise spezifizierte Berechnung vorzunehmen ist.

Aufgrund der skizzierten Unterschiede in den bekannten normativen Regelungen und Vorschlägen, die im weiteren quantitativ dargelegt werden, sowie im Hinblick auf die geringe experimentelle Datenbasis für eine Beurteilung der Rechenmodelle wurde das vorliegende Forschungsvorhaben beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) beantragt. Das Ziel des Forschungsvorhabens, das sich ausschließlich mit runden Durchbrüchen befaßt, umfaßt die beiden folgenden Hauptaufgaben:

1. Durchführung von Bauteilversuchen zur Erstellung einer konsistenten experimentellen Datenbasis für die Kalibrierung eines Bemessungsmodells.
2. Formulierung eines versuchsmäßig abgesicherten Bemessungsansatzes für gerade und gekrümmte durchbrochene Brettschichtholzträger.

Der vorliegende Forschungsbericht untergliedert sich wie folgt:

Einführend werden die Bemessungsansätze nach DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 ausführlich erläutert und einander gegenübergestellt. Im Anschluß wird über die experimentellen Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens berichtet. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen innerhalb des Forschungsvorhabens werden zusammen mit Ergebnissen von experimentellen Untersuchungen im Vorfeld des Forschungsvorhabens dargestellt und ausgewertet. Der grundlegende Versagensmechanismus am runden Durchbruch wird ausführlich erläutert.

Mit Blick auf ein neues Bemessungsmodell werden zunächst die Tragfähigkeiten der Bemessungsansätze nach DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 den erhaltenen Versuchsergebnissen gegenübergestellt und diskutiert. Abschließend wird ein neuer Bemessungsansatz abgeleitet, der sich auf die probabilistische Festigkeitsbetrachtung nach Weibull stützt und alle wesentlichen geometrischen und lastabhängigen Einflußparameter berücksichtigt.

2 Bemessungsmodelle in der Literatur

2.1 Allgemeines

Am Rande von Durchbrüchen treten große Spannungsüberhöhungen auf, welche in Verbindung mit dem anisotropen und bei Zug- und Schubbeanspruchung rechtwinklig bzw. parallel zur Faserrichtung sehr spröden Festigkeitsverhalten von Holz zu beträchtlichen Bemessungsproblemen führen. Zur Thematik „Bemessung von Durchbrüchen in Biegeträgern aus Brettschichtholz“ sind mehrere Ansätze in der Literatur zu finden, welche sich prinzipiell in zwei Gruppen einteilen lassen:

- Ansätze basierend auf einem klassischen Festigkeits- oder Höchstspannungskriterium und
- bruchmechanische Ansätze.

Arbeiten auf der Grundlage klassischer Festigkeitskriterien sind in [Joh1979], [Pen1980] und [Kol1985] veröffentlicht. Bruchmechanische Untersuchungen zu durchbrochenen und ausgeklinkten Trägern finden sich in [Gus1988], [Lar 1989], [Log1991], [Log1992], [Rii1993], [Aic1995], [Ske2000], [Aic2002a], [Gus2002] und [Pet2002]. Diskussionen der verschiedenen Beiträge finden sich unter anderem in [Höf2005]. Im folgenden werden ausschließlich die genormten bzw. für Normnachweise vorgeschlagenen Bemessungskonzepte diskutiert.

2.2 Bemessungsansatz nach DIN 1052:2004 für runde Durchbrüche

Der Bemessungsansatz nach DIN 1052:2004 geht im wesentlichen auf den Bemessungsvorschlag von Kolb und Epple [Kol1985] zurück und entspricht einem klassischen Festigkeitskriterium. Hierbei wird der Bemessungswert der Zugkraft rechtwinklig zur Faserrichtung am Durchbruch $F_{t,90,d}$ einer Widerstandskraft $R_{t,90,d}$ gegenübergestellt, wobei $R_{t,90,d}$ nicht explizit in DIN 1052:2004 angegeben ist:

$$\frac{F_{t,90,d}}{R_{t,90,d}} = \frac{F_{t,90,d}}{0,5 l_{t,90} b f_{t,90,d}} \leq 1 \quad (1)$$

mit

$$l_{t,90} = 0,353 h_d + 0,5 h. \quad (2)$$

Die Größe $l_{t,90}$ repräsentiert die Verteillänge einer dreiecksförmig angenommenen Zugspannungsverteilung rechtwinklig zur Faserrichtung mit dem Höchstwert am Durchbruchrand (vgl. Bild 1,

Beilage 1). Die Größe b bezeichnet die Trägerbreite und $f_{t,90,d}$ ist der Bemessungswert der Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung.

Der Bemessungswert der Zugkraft $F_{t,90,d}$ setzt sich aus zwei additiven Teilen zusammen, wobei zwischen der Zugkraft infolge Querkraft und der Zugkraft infolge Moment unterschieden wird:

$$F_{t,90,d} = F_{t,V,d} + F_{t,M,d} \quad (3)$$

mit

$$F_{t,V,d} = \frac{V_d h_d}{4 h} \left[3 - \frac{h_d^2}{h^2} \right] \quad (4)$$

$$F_{t,M,d} = 0,008 \frac{M_d}{h_r} \quad (5)$$

und

$$\begin{aligned} V_d, M_d &= \text{Betrag des Bemessungswertes der Querkraft bzw. des Momentes} \\ h_r &= \min \{ h_{ru} + 0,15 h_d, h_{ro} + 0,15 h_d \}. \end{aligned}$$

In Gl. (4) darf normgemäß im Falle runder Durchbrüche anstelle von h_d der Wert $0,7 h_d$ eingesetzt werden. Somit ergibt sich Gl. (4) zu

$$F_{t,V,d} = \frac{V_d (0,7 h_d)}{4 h} \left[3 - \frac{(0,7 h_d)^2}{h^2} \right]. \quad (6)$$

Zum skizzierten Bemessungsansatz für runde Durchbrüche nach DIN 1052:2004 sind folgende Bemerkungen angezeigt:

- Die Zugkraft infolge Querkraftbeanspruchung gemäß Gl. (6) entspricht der halben Resultierenden der Schubspannungen, die infolge des Durchbruchs nicht übertragen werden können (siehe Bild 1, Beilage 1). Die gemäß Gl. (6) über eine Kräfte-Gleichgewichtsbetrachtung ermittelte Zugkraft rechtwinklig zur Faserrichtung stimmt mit dem Integral der Zugspannungen längs des höchst beanspruchten Schnittes parallel zur Trägerlängsrichtung ausgehend vom Lochrand zufolge hier durchgeführter FE-Berechnungen überein.
- Gleichung (5) zur Berechnung der Zugkraft infolge Momentenbeanspruchung ist eine von Kolb und Epple [Kol1985] aufgestellte empirisch basierte Beziehung. Die Herleitung der Gleichung ist nicht transparent nachvollziehbar. Es läßt sich auch zeigen, daß das mittels FE-Berechnungen ermittelte Integral der Zugspannungen rechtwinklig zur Faserrichtung im höchst beanspruchten Schnitt nicht mit der Zugkraft nach Gl. (5) übereinstimmt [Ai 2000].

- Ein weiterer Diskussionspunkt betrifft die vereinfachte Annahme einer dreiecksförmigen Zugspannungsverteilung rechtwinklig zur Faserrichtung. Eine Gegenüberstellung der angenommenen dreiecksförmigen Spannungsverteilung mit FE-berechneten Spannungsverteilungen für verschiedene Belastungskonfigurationen und d/h-Verhältnisse ist in [Aic2002b] zu finden. Es wird aufgezeigt, daß sich die FE-berechnete Spannungsverteilung bezüglich Höchstwert und Form deutlich von der angenommenen dreiecksförmigen Verteilung unterscheidet. So ist verglichen mit der FE-berechneten Spannungsverteilung die in DIN 1052:2004 angegebene Verteillänge $l_{t,90}$ deutlich länger und die Maximalspannung am Durchbruchrand deutlich niedriger.
- Es wird von der unzutreffenden Annahme ausgegangen, daß die Spannungsverteilung unabhängig von der Beanspruchungskombination ist. Unter Beanspruchungskombination (auch Beanspruchungsart) wird im folgenden immer das Moment/Querkraft-Verhältnis verstanden.
- Der Bemessungsansatz berücksichtigt entsprechend der Vorgehensweise bei einem klassischen Festigkeitskriterium keinen Größeneinfluß. Dies steht im Widerspruch dazu, daß die Beeinflussung der Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung vom beanspruchten Volumen oder ausschließlich von der beanspruchten Höhe weitgehend anerkannt und normativ verankert ist [DIN 1052:2004, EN 1995-1-1:2004].

2.3 Bemessungsansatz nach prEN 1995-1-1:2003

Der Querkraftnachweis für durchbrochene Biegeträger nach prEN 1995-1-1:2003 wird analog zu demjenigen für einen ausgeklinkten Träger nach prEN 1995-1-1:2003 bzw. EN 1995-1-1:2004 durchgeführt (siehe Bild 2, Beilage 1). Die linear bruchmechanische Bemessung eines rechtwinklig ausgeklinkten Trägers nach prEN 1995-1-1:2003 geht auf den in [Gus1988] und [Lar1989] beschriebenen Bemessungsvorschlag zurück.

Der Nachweis der Querkraft V an einem durchbrochenen Biegeträger der Trägerhöhe h erfolgt wie der Nachweis der Querkraft $V/2$ an einem ausgeklinkten Träger der Höhe $h/2$ (vgl. Bild 2b, Beilage 1) gemäß

$$\tau_d = \frac{1,5 V_d}{b h_{ef}} \leq k_v f_{v,d} \quad (7)$$

mit

$$k_v = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ k_n \left(1 + \frac{1,1 i^{1,5}}{\sqrt{h}} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{h} \left(\sqrt{\alpha (1-\alpha)} + 0,8 \frac{x}{h} \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2} \right)} \end{array} \right. \quad (8)$$

Auf der Widerstandsseite repräsentiert $f_{v,d}$ den Bemessungswert der Schubfestigkeit und k_v ist ein Abminderungsfaktor ($k_v \leq 1$), formal vergleichbar dem Abminderungsfaktor k_A in DIN 1052:1988 bei der Bemessung des ausgeklinkten Trägers. Der Wert i in der Bestimmungsgleichung für k_v repräsentiert die Neigung der Ausklinkung, h ist die Trägerhöhe, x ist der Abstand zwischen Lastangriffspunkt und Ausklinkungsecke und $\alpha = h_{ef}/h$ (mit $h_{ef} = h_{ru}$) ist die relative Ausklinkungshöhe. Der Wert k_n beträgt für Brettschichtholz aller Festigkeitsklassen $k_n = 6,5$. Auf der Einwirkungsseite entspricht V_d dem Bemessungswert der Schubkraft, h_{ef} der reduzierten Höhe und b der Trägerbreite.

Zum skizzierten Bemessungsansatz für runde Durchbrüche nach prEN 1995-1-1:2003 sind folgende Bemerkungen angezeigt:

- Die Zurückführung des Querkzugproblems am Durchbruch auf den ausgeklinkten Träger scheint für den Fall eines rechteckigen Durchbruchs in erster Näherung plausibel (vgl. Bild 2a, Beilage 1). Im Gegensatz hierzu stellt jedoch die Annahme einer Analogie zwischen einem runden Durchbruch und einem schräg ausgeklinkten Träger rein geometrisch eine extreme Vereinfachung des mechanischen Problems dar.
- Der Bemessungsansatz wurde ohne Kalibrierung an Versuchsergebnissen mit durchbrochenen Trägern implementiert.
- Der Bemessungsansatz beinhaltet nur den Nachweis der Querkraftbeanspruchung. Dies ist für ausgeklinkte Träger, abgesehen von separat nachzuweisenden Sonderfällen, ausreichend, da die Momentenbeanspruchung überwiegend vernachlässigbar gering ist. Durchbrüche in Biegeträgern hingegen sind stets einer zusätzlichen Momentenbeanspruchung und in Einzelfällen sogar einer reinen Momentenbeanspruchung ausgesetzt. Da eine Momentenbeanspruchung ebenfalls Querkzugspannungen am Durchbruchrand erzeugt, ist der Momenteneinfluß in der Bemessung zu berücksichtigen.

- Im Gegensatz zum festigkeitsbasierten Bemessungsansatz nach DIN 1052:2004, bei dem die Trägerhöhe linear in die Tragfähigkeit eingeht, weist der linear bruchmechanische Ansatz einen ausgeprägten Größeneinfluß auf. Entsprechend dem Maßstabgesetz der linearen Bruchmechanik geht die Querschnittshöhe mit dem Faktor \sqrt{h} in die Tragfähigkeit ein. Die Unterstellung einer linear bruchmechanischen Größengesetzmäßigkeit für ein mechanisches Problem ohne Geometrie- und Spannungssingularität stellt auch bei sehr sprödebrüchigem Materialwiderstand einen sehr konservativen Ansatz dar.

2.4 Durchbrüche in gekrümmten Trägern nach DIN 1052:2004 und nach prEN 1995-1-1:2003

Nach DIN 1052:2004 dürfen Durchbrüche in unverstärkten Trägerbereichen mit planmäßiger Querkzugbeanspruchung (z.B. in gekrümmten Trägern) nicht angeordnet werden. Der Normentwurf prEN 1995-1-1:2003 fordert in einem solchen Fall einen speziellen Nachweis. Hinweise darauf, wie dieser Nachweis zu führen ist, werden nicht gegeben.

2.5 Gegenüberstellung der Bemessungsansätze nach DIN 1052:2004 und nach prEN 1995-1-1:2003

Im folgenden werden die Bemessungsansätze nach DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 einander gegenübergestellt. Der Vergleich umfaßt den Einfluß der folgenden Parameter: Trägerhöhe, Schnittkraftverhältnis M/V und relative Durchbruchgröße d/h .

Es werden die beiden deutlich unterschiedlichen Trägerhöhen $h = 500$ und 2000 mm betrachtet, um zum einen die absoluten Querkrafttragfähigkeiten aufzuzeigen und um zum anderen den Größeneffekt der einzelnen Bemessungsansätze zu veranschaulichen. Die relativen Durchbruchgrößen werden im Bereich von $d/h = 0,1$ bis $0,4$ betrachtet. Das Schnittkraftverhältnis am Durchbruch wird in Abhängigkeit von der Trägerhöhe im Bereich von $M/V = 1h$ bis $5h$ variiert. In allen Berechnungsbeispielen beträgt die Trägerbreite $b = 100$ mm.

Für den Vergleich der Bemessungsansätze nach DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 werden die charakteristischen Festigkeitswerte der Normen DIN 1052:2004 bzw. DIN EN 1194 verwendet. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, daß sich die relevanten Festigkeitswerte in den beiden Normen z.T. erheblich voneinander unterscheiden (siehe Tabelle 1, Beilage 2). Wäh-

rend in DIN 1052:2004 die Festigkeitswerte $f_{t,90,k}$ und $f_{v,k}$ über alle Brettschichtholz-Festigkeitsklassen konstant angenommen werden, zeigen die Festigkeitswerte nach DIN EN 1194 eine starke Abhängigkeit von der Festigkeitsklasse. Insbesondere bei der Brettschichtholzklasse GL 24c (BS 11c) weichen die Werte der beiden Normen erheblich voneinander ab.

Aus vorstehend genanntem Grund wird der Tragfähigkeitsvergleich zum einen mit der „niedrigen“ Brettschichtholz-Festigkeitsklasse GL 24c (BS 11c), bei der die Festigkeitswerte der beiden Normen stark voneinander abweichen, und zum anderen mit der „hohen“ Brettschichtholz-Festigkeitsklasse GL 32h (BS 16h), bei der die Festigkeitswerte der beiden Normen annähernd gleich sind, durchgeführt. (Konkret: Bei der Bemessung nach DIN 1052:2004 wird durchweg der konstante charakteristische Wert der Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung $f_{t,90,k} = 0,5 \text{ N/mm}^2$ verwendet, während bei der Bemessung nach prEN 1995-1-1:2003 der charakteristische Wert der Schubfestigkeit $f_{v,k}$ für GL 24c mit $2,2 \text{ N/mm}^2$ und für GL 32h mit $3,8 \text{ N/mm}^2$ angesetzt wird.)

Die erhaltenen Ergebnisse der charakteristischen Querkrafttragfähigkeiten für runde Durchbrüche sind in Bild 3a, b bis Bild 6a, b, Beilage 3 bis Beilage 4, zusammengestellt. Die Ergebnisse in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße und in Abhängigkeit vom Schnittkraftverhältnis sind jeweils für eine Trägerhöhe von $h = 500 \text{ mm}$ und $h = 2000 \text{ mm}$ für die Brettschichtholz-Festigkeitsklasse GL 24c (BS 11c) in Bild 3 und Bild 4, Beilage 3, und für die Brettschichtholz-Festigkeitsklasse GL 32h (BS 16h) in Bild 5 und Bild 6, Beilage 4, dargestellt. Die Berechnungen der Querkrafttragfähigkeiten in Abhängigkeit vom d/h -Verhältnis erfolgten für ein Schnittkraftverhältnis von $M/V = 3h$. Die Berechnungen der Querkrafttragfähigkeiten in Abhängigkeit vom Schnittkraftverhältnis M/V wurden für eine relative Durchbruchgröße von $d/h = 0,3$ vorgenommen.

Bei der Betrachtung der Diagramme fallen die folgenden Unterschiede zwischen den Bemessungsansätzen auf:

- Bei beiden Bemessungsansätzen nimmt die charakteristische Querkrafttragfähigkeit - mechanisch zwingend - mit zunehmender relativer Durchbruchgröße ab. Die Abnahme der Querkrafttragfähigkeit und der Kurvenverlauf der Ansätze nach DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 sind hierbei ähnlich.
- Eine Abhängigkeit der charakteristischen Querkrafttragfähigkeit vom Schnittkraftverhältnis M/V weist nur der Ansatz nach DIN 1052:2004 auf. Bei den betrachteten Beispielen reduziert sich die Querkrafttragfähigkeit mit zunehmendem Momentenanteil am Schnittkraftverhältnis

M/V (1h bzw. 5h) jeweils um 31% (siehe Bild 4a, b, Beilage 3, und Bild 6a,b, Beilage 4). Im Gegensatz dazu bleibt bei dem Ansatz nach prEN 1995-1-1:2003 der Momenteneinfluß gänzlich unberücksichtigt.

- Für die charakteristischen Querkrafttragfähigkeiten unterschiedlicher BSH-Festigkeitsklassen werden zum Teil bemerkenswerte Unterschiede zwischen den beiden Bemessungsansätzen DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 erhalten. Während die Querkrafttragfähigkeiten nach DIN 1052:2004 aufgrund des konstanten Festigkeitswertes $f_{t,90,k}$ unabhängig von der Festigkeitsklasse sind, hängen die Querkrafttragfähigkeiten nach prEN 1995-1-1:2003 ausgeprägt von der Festigkeitsklasse ab. Die Querkrafttragfähigkeiten erhöhen sich hierbei entsprechend den Verhältnissen der charakteristischen Schubfestigkeitswerte (Tabelle 1, Beilage 2). In den betrachteten Beispielen steigt die Querkrafttragfähigkeit von GL 24c auf GL 32h um 73%.
- Ein Größeneinfluß bleibt nach DIN 1052:2004 unberücksichtigt, während der Bemessungsansatz nach prEN 1995-1-1:2003 einen deutlichen Höheneinfluß beinhaltet. Die Beispiele zeigen, daß die Tragfähigkeitswerte für kleine Träger ($h = 500 \text{ mm}$) nach prEN 1995-1-1:2003 für beide Festigkeitsklassen über den Werten nach DIN 1052:2004 liegen, wohingegen für große Träger ($h = 2000 \text{ mm}$) bei der Festigkeitsklasse GL 24c das Gegenteil der Fall ist. Bei der Festigkeitsklasse GL 32h ist der Abstand zwischen den beiden Ansätzen deutlich vermindert.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich die Bemessungsansätze zum einem in den Absolutwerten der Querkrafttragfähigkeiten zum Teil erheblich voneinander unterscheiden. So beträgt beispielsweise die Querkrafttragfähigkeit der Konfiguration „ $h = 500 \text{ mm}$, $d/h = 0,3$, $M/V = 5h$, GL 32h „ nach prEN 1995-1-1:2003 rd. das Dreifache des Rechenwertes nach DIN 1052:2004. Zum anderen werden grundlegende Einflußparameter in sehr unterschiedlicher Weise oder gar nicht berücksichtigt.

3 Bauteilversuche zur Kalibrierung von Bemessungsansätzen

3.1 Versuche in der Literatur

Experimentelle Untersuchungen an unverstärkten Durchbrüchen in Brettschichtholzträgern sind in [Ben1971], [Fre1974], [Kol 1977], [Joh1977], [Pen1980] und [Joh1983] zu finden. Tabelle 2, Beilage 5, beinhaltet eine Zusammenstellung der in der Literatur aufgeführten Untersuchungen an runden Durchbrüchen.

Zu den literaturbekannten Versuchen mit runden (und auch rechteckigen) Durchbrüchen ist zusammenfassend folgendes anzumerken:

- Die zur Verfügung stehende Datenbasis deckt fast ausschließlich gerade Träger mit vergleichsweise kleinen Querschnittsabmessungen (550×80 mm und 500×90 mm) ab. Untersuchungen zu Durchbrüchen in gekrümmten Trägern sind in der Literatur nicht erwähnt.
- Es wurden überwiegend nur Durchbrüche mit großen relativen Durchbruchgrößen d/h untersucht; die meisten literaturbekannten Versuche wurden mit d/h -Verhältnissen $\geq 0,5$ geprüft. (Anmerkung: Das Höchstmaß der relativen Durchbruchgröße ist in DIN 1052:1988 und in DIN 1052:2004 auf $d/h \leq 0,4$ beschränkt.)
- Es liegen keine systematischen Untersuchungen über den Einfluß der relativen Durchbruchgröße d/h auf die Traglast vor.
- Es liegen keine systematischen Untersuchungen über den Einfluß der Bauteilgröße auf die Traglast vor.
- In den literaturbekannten Untersuchungen waren die Durchbrüche, von wenigen Ausnahmen abgesehen, einem Schnittkraftverhältnis (M/V -Verhältnis) mit dominierender Querkraftbeanspruchung V ausgesetzt. Es sind keine systematischen Untersuchungen über den Einfluß eines zunehmenden M/V -Verhältnisses bekannt. Bei den durchgeführten Versuchen an Durchbrüchen unter reiner Momentenbeanspruchung versagten alle Träger infolge Biegung.
- Es wurden überwiegend nur ein bis zwei Prüfkörper pro Konfiguration geprüft, d.h. es liegen keine statistisch auswertbaren Datensätze vor.
- Eine wesentliche Feststellung der Literaturlauswertungen betrifft die Versagenslasten. Diese sind in den jeweiligen Untersuchungen sehr unterschiedlich definiert. Zum einen werden

Rißlasten, die oft nicht genau definiert sind, und zum anderen Bruchlasten angegeben. Da die Rißlasten erheblich von den Bruchlasten abweichen können (siehe nachfolgend), ist eine vergleichende Betrachtung unterschiedlicher Literaturquellen vielfach mit hohen Unsicherheiten verbunden.

Die vorstehenden Ausführungen belegen Defizite der bekannten experimentellen Untersuchungen. Eines der beiden wesentlichen Ziele des durchgeführten Forschungsvorhabens bestand daher darin, eine konsistente experimentelle Datenbasis zur Kalibrierung eines Bemessungsansatzes zu generieren.

3.2 Bauteilversuche im Rahmen des Forschungsvorhabens

3.2.1 Untersuchte traglastrelevante Einflußparameter

Im Hinblick auf die Kalibrierung eines Bemessungsansatzes wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens die folgenden Parameter hinsichtlich ihres Einflusses auf die Tragfähigkeit durchbrochener Träger untersucht:

- die relative Durchbruchgröße (d/h -Verhältnis),
- die Trägerhöhe (Größeneinfluß),
- die Beanspruchungsart (M/V - Schnittkraftverhältnis am Durchbruch) und
- die Trägerform.

Um den Einfluß der genannten Parameter so wenig wie möglich durch weitere Einflußfaktoren zu überdecken, wurden alle Untersuchungen an homogen aufgebauten Brettschichtholzträgern der Festigkeitsklasse GL 32h (BS 16h) durchgeführt. Die verwendete Holzart war durchweg Fichte. Alle Versuchsträger wiesen runde Durchbrüche auf, welche durchweg symmetrisch zur Trägerachse, d.h. in der Mitte der Querschnittshöhe angeordnet waren. Der Trägerbereich, in den der runde Durchbruch gefräst wurde, wurde in Bezug auf Äste oder andere Defekte **nicht** speziell ausgesucht, so daß den Versuchsergebnissen eine der Festigkeitsklasse entsprechende natürliche Defektverteilung zugrunde liegt. Die Querschnittsbreite betrug bei allen Versuchsträgern 120 mm.

Nachstehend wird die Festlegung der genannten unterschiedlichen Versuchsparameter erläutert (siehe auch Tabelle 3, Beilage 6):

- **Relative Durchbruchgröße (d/h-Verhältnis):** Es wurden bei den geraden Trägern drei verschiedene d/h-Verhältnisse ($d/h = 0,2, 0,3$ und $0,4$) untersucht. Die Wahl des größten untersuchten d/h-Verhältnisses von $0,4$ ist darin begründet, daß einerseits die Bemessungsnormen DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 dieses Verhältnis als obere Grenze angeben. Andererseits zeigten FE-Berechnungen, daß sich ab einem Verhältnis von rd. $d/h = 0,4$ der Einfluß der geometrischen Randbedingungen (Trägerober- und Unterseite bei $\pm h/2$) in zunehmend nichtlinearer Weise auf die Spannungen am Durchbruch auswirkt.
- **Trägerhöhe (Größeneinfluß):** Es wurden zwei verschiedene Trägerhöhen untersucht, die sich um den Faktor 2 unterscheiden ($h = 450$ mm und $h = 900$ mm). Da die in der Literatur angegebenen Versuchsergebnisse überwiegend an Trägern vergleichsweise kleiner Trägerhöhen ($h = 500$ mm) gewonnen wurden, wurde hier mit der Trägerhöhe $h = 900$ mm bewußt eine Trägerhöhe gewählt, welche mittleren bis größeren praxisrelevanten Bauteilabmessungen entspricht.
- **Beanspruchungsart (M/V- Schnittkraftverhältnis am Durchbruch):** Bei den geraden Trägern wurden zwei verschiedene auf die Trägerhöhe bezogene Schnittkraftverhältnisse am Durchbruch (jeweils bezogen auf den Durchbruchmittelpunkt) untersucht: $M/V = 1,5h$ und $M/V = 5h$. Das Verhältnis $M/V = 1,5h$ stellt zufolge FE-Untersuchungen das kleinste zu realisierende Schnittkraftverhältnis dar, bei dem noch von einem ungestörten Spannungsfluß am Durchbruch ausgegangen werden kann. Das Schnittkraftverhältnis $M/V = 1,5h$ repräsentiert eine überwiegende Querkraftbeanspruchung. Das Schnittkraftverhältnis $M/V = 5h$ stellt eine relativ hohe Momentenbeanspruchung dar, welche sich versuchstechnisch mit genügend Abstand zwischen Lasteinleitungspunkt und Durchbruch realisieren ließ. Die Bestimmung der Versagenslast am Durchbruch unter einer reinen Momentenbeanspruchung erwies sich infolge der hohen Biegezugbeanspruchungen am Durchbruch als problematisch (vgl. [Höf2005]).
- **Trägerform:** Es wurden zwei verschiedene Trägerformen untersucht: gerade Träger und gekrümmte Träger. Die überwiegende Mehrzahl der Versuche ($56/62 = 90\%$) wurde an geraden Trägern durchgeführt. Bei gekrümmten Trägern treten bei positiver Momentenbeanspruchung zusätzlich zu den Querkraftbeanspruchungen am Durchbruch planmäßige Querkraftbeanspruchungen im gekrümmten Bereich auf, die sich anzunehmend auf die Tragfähigkeit auswirken. Die Untersuchungen zum Krümmungseinfluß wurden an zwei verschiedenen Trägerhöhen $h = 450$ mm und $h = 900$ mm, welche identisch zu den geraden Trägern gewählt wurden, durchgeführt. Für die querschnittsbezogene Trägerkrümmung h/r_m wurde für beide Trägerhöhen $h/r_m = 0,03$ gewählt. Damit ergeben sich bei den Trägerhöhen

von $h = 450$ mm und $h = 900$ mm die mittleren Krümmungsradien von $r_m = 15$ m bzw. $r_m = 30$ m.

Tabelle 3, Beilage 6, beinhaltet eine Zusammenstellung der im Forschungsvorhaben untersuchten Testseriengruppen und Testserien. Anzumerken ist, daß einige Versuche des in Tabelle 3, Beilage 6, angegebenen Prüfprogramms in einem thematisch zuordenbaren SFB-finanzierten Forschungsvorhaben geprüft wurden (gesondert gekennzeichnet). Die Ergebnisse der im Vorfeld bzw. parallel zum DIBt-Vorhaben durchgeführten Versuche werden mit aufgeführt und ausgewertet, da dies zu einer deutlichen Vergrößerung der Datenbasis führt.

Die Testseriengruppen mit geraden Trägern beinhalten je drei Testserien mit unterschiedlichen d/h -Verhältnissen. Im Gegensatz dazu beinhalten die Testseriengruppen mit gekrümmten Trägern (aus Kostengründen) jeweils nur eine Testserie mit $d/h = 0,4$.¹

Die Versuchsträger wurden von sechs verschiedenen Brettschichtholz-Herstellern gefertigt, wobei die Versuchsserien jeweils so zusammengestellt wurden, daß jede Versuchsserie Träger von unterschiedlichen Herstellern beinhaltet. Eine Ausnahme hiervon bilden (aus Kostengründen) die gekrümmten Träger, bei denen alle Träger von einem Hersteller stammten.

3.2.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Alle durchbrochenen Träger wurden im Biegeversuch geprüft. Die untersuchten Trägerabmessungen und die realisierten Versuchsaufbauten der Testseriengruppen sind in Bild 7 bis Bild 12, Beilage 7 bis Beilage 9, dargestellt. Fotos des Versuchsaufbaus sind in Bild A1a, b, Anhang 1, gezeigt. Die Durchbrüche wiesen immer einen Mindestabstand von $1,5 \times$ Trägerhöhe zum nächstliegenden Lasteinleitungspunkt auf.

Alle Versuche wurden weggesteuert in einem servohydraulischen Mehrzylinder-Prüfstand durchgeführt. Die Belastung erfolgte mit einer für die jeweiligen Testseriengruppen konstanten Prüfgeschwindigkeit bis zum globalen Versagen des Trägers. Die mittlere Versuchszeit (\pm Standardabweichung) aller Träger bis zum Bruch betrug 348 ± 93 Sekunden. Der Feuchtegehalt des Brett-

¹ Abweichend vom Forschungsantrag wurde für die gekrümmten Träger anstatt des d/h -Verhältnisses $d/h = 0,3$ das Verhältnis $d/h = 0,4$ gewählt, da sich nach Abschluß der Versuche an den geraden Trägern zeigte, daß die Ergebnisse für das Verhältnis $d/h = 0,4$ deutlichere Differenzierungen erlauben und geeigneter für Vergleiche herangezogen werden können.

schichtholzes betrug zum Zeitpunkt der Versuche $10,9 \pm 1,5\%$. Die mittlere auf eine Holzfeuchte von 12% bezogene Rohdichte aller geprüften Trägers betrug $471 \pm 38 \text{ kg/m}^3$. Bei allen Versuchen wurde das globale Last-Verformungsverhalten mittels Durchbiegungsmessung in der Mitte der Trägerlänge gemessen. Desweiteren wurde bei allen Versuchen eine eingehende Protokollierung des visuell erkennbaren Rißfortschritts am Durchbruch vorgenommen. Aufgrund des bekannten Schädigungsverlaufes (siehe Kap. 4.1) konnte eine visuelle Rißbeobachtung ohne Gefährdung mittels zweier Personen an je einer Seite des Trägers aus unmittelbarer Nähe (Abstand $\approx 30 \text{ cm}$ vom Durchbruch) durchgeführt werden. Hierbei wurde sowohl die Rißbildung in der Durchbruchswandung, d.h. innerhalb der Querschnittsbreite, als auch die Rißbildung in Trägerlängsrichtung aufgezeichnet.

4 Versuchsergebnisse des Forschungsvorhabens

4.1 Schädigungsentwicklung am Durchbruch

4.1.1 Prinzipielle Schädigungsentwicklung am Durchbruch

Bei allen in Tabelle 3, Beilage 6, aufgeführten Testseriengruppen liegt am Durchbruch ein kombiniertes Schnittkraftverhältnis M/V vor. Dabei stellt sich eine unsymmetrische Spannungsverteilung rechtwinklig zur Faserrichtung am Durchbruch ein, wobei von den beiden Bereichen mit Querkzugspannungen derjenige in der Biegedruckzone höher beansprucht ist als der gegenüberliegende Bereich in der Biegezugzone (siehe Bild 13, Beilage 10). Im folgenden wird der höher beanspruchte Bereich in der Biegedruckzone mit AF und der geringer beanspruchte Bereich in der Biegezugzone mit AN bezeichnet.

Der Versagensmechanismus an geraden Trägern mit runden Durchbrüchen läßt sich wie folgt beschreiben (vgl. auch [Aic2003] [Höf2005]).

Bei nahezu allen Trägern war eine stabile Rißentwicklung an den beiden querkzugbeanspruchten Durchbruchsseiten AN und AF festzustellen. Die einzelnen Stufen der Rißentwicklung sind schematisch in Bild 14, Beilage 11, dargestellt. Die Entstehung des Risses (Anriß) war im höchstbeanspruchten Bereich des Durchbruches stets in der Nähe der Querschnittsmitte zu beobachten (Bild 14c, Beilage 11). Die Lage der Rißinitierung im Querschnittsinneren resultiert aus der polar anisotropen Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften innerhalb der Radial-Tangentialfläche (Stirnholzebene) der Brettlamellen, vgl. [Aic....]. Nach dem Anriß im Querschnittsinneren pflanzte sich

der Riß zu den Querschnittsrändern hin fort. Anschließend setzt ein ebenfalls stabiler Rißfortschritt in Trägerlängsrichtung ein (Bild 14d-e, Beilage 11). Endgültiges globales Versagen des Trägers trat ein, sobald sich der Riß auf der AN-Seite bis zum Auflager hin fortgepflanzt hatte.

Während die beschriebene Rißentwicklung bei den Trägern mit kleinem M/V-Verhältnis am Durchbruch ($M/V = 1,5h$) an beiden Durchbruchseiten, AN und AF, meistens gleichzeitig zu beobachten war, trat bei den Testseriengruppen mit größerem M/V-Verhältnis am Durchbruch ($M/V = 5h$) und somit dominierenden Querkzugspannungen an der AF-Seite, die Rißentwicklung an der AF-Seite stets deutlich früher auf als an der gegenüberliegenden AN-Seite.

Das Schädigungsverhalten der gekrümmten Träger entsprach prinzipiell dem der geraden Träger. Hierbei verlief der Rißfortschritt in Trägerlängsrichtung parallel zur Trägerraußenkante, d.h. der Faser- und Trägerkrümmung folgend.

Schematisch läßt sich der Schädigungsverlauf in die vier nachfolgend genannten Stufen untergliedern (Bild 14c-e, Beilage 11):

Stufe 1+2: Anriß und Rißfortschritt im Querschnitt des Trägers

Stufe 3: Durchriß des Trägers in Querschnittsbreitenrichtung und Übergang der Rißentwicklung in Trägerlängsrichtung

Stufe 4: Rißfortschritt in Trägerlängsrichtung bis zum globalen Versagen des Trägers

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Schädigungsstufen - Anriß, Durchriß und globales Versagen - wie folgt definiert:

- Anriß: Das erste, visuell erkennbare Auftreten eines Risses im Querschnittsinneren des Durchbruchs wird als Anriß definiert. Die genaue visuelle Bestimmung des Anrisses und des Anrißzeitpunkts ist schwierig, da der haarfeine, kaum geöffnete Riß im Jahrringübergang zwischen Früh- und Spätholz verläuft und sich kaum von der farblichen Schattierung der Jahrringübergänge absetzt. Zudem treten im Hirnholz teilweise sehr dünne Schwindrisse auf, die sich kaum von dem zu erwartenden Anriß unterscheiden. In dieser Arbeit wurde ein Riß *erst dann* als Anriß definiert, wenn von ihm eine weitere Rißentwicklung ausging.

- Durchriß: Als Durchriß wird der Schadenszustand am Durchbruch definiert, bei dem sich ein Riß ausgehend vom Querschnitt des Durchbruchs in Trägerlängsrichtung ausbreitet und an *beiden* Trägeroberflächen zu sehen ist.
- Globales Versagen: Als globales Versagen wird der Schadenszustand definiert, bei dem der Riß ausgehend vom Durchbruch das Trägerende am Auflager erreicht hat und keine weitere Laststeigerung mehr möglich ist.

4.1.2 Erläuterung der Schädigungsentwicklung anhand eines Beispiels

Mittels Bild 15 und Bild 16, Beilage 12, wird die Schädigungsentwicklung am Durchbruch exemplarisch anhand eines Trägers der Testserie 900_1.5h_0.3 veranschaulicht. Bild 15, Beilage 12, zeigt die maßstäbliche Draufsicht auf den durchbrochenen Träger mit Rißfortschritt in Trägerlängsrichtung an beiden Durchbruchseiten AN und AF. Die zeitliche Reihenfolge der einzelnen Rißfortschritte ist anhand der aufwärts zählenden Rißfortschrittsnummern gekennzeichnet, die getrennt für die Vorder- und Rückseite des Trägers dokumentiert wurden. Gleiche Rißfortschrittsnummern an unterschiedlichen Positionen bedeuten, daß diese Rißfortschritte zum selben Zeitpunkt auftraten. Die jeweilige Rißlänge der einzelnen Rißfortschritte läßt sich an der Skala im unteren Bildabschnitt ablesen. Bild 16a, b, Beilage 12, zeigt ebenfalls maßstäblich für die Durchbruchseiten AN und AF die projizierte Querschnittsfläche mit dem jeweiligen Lamellenaufbau, der Jahrringlage und dem Rißverlauf (ebenfalls mit Rißfortschrittsnummern versehen). Die beiden Rißfronten des Anrisses sind jeweils links und rechts mit der selben Rißfortschrittsnummer bezeichnet.

Der betrachtete Träger zeigte zuerst einen Anriß (1) im Querschnittsinneren der AF-Seite und anschließend einen Anriß (2) an der AN-Seite (Bild 16a, b, Beilage 12). Die Längen der Anrisse 1 und 2 in Querschnittsbreitenrichtung sind in Bild 16a, b, Beilage 12, jeweils durch Kennzeichnung der beiden Rißenden mit der jeweiligen Rißnummer kenntlich gemacht. Anschließend setzte eine Rißentwicklung im Querschnitt auf der AF-Seite (3, 4) und der AN-Seite (5) ein. Danach begann der Rißfortschritt in Trägerlängsrichtung (Bild 15, Beilage 12). Zuerst ist an beiden Seiten eine Rißentwicklung nur auf der Träger-Vorderseite zu sehen (6, 7, 8). Mit der Rißfortschrittsnummer 9 ist die Rißentwicklung an der AF-Seite auch auf der Träger-Rückseite zu sehen. Dies bedeutet, daß ab der Rißfortschrittsnummer 9 die AF-Seite des Durchbruchs „durchgerissen“ ist und gemäß obiger Definition der Schadenszustand „Durchriß“ vorliegt. Der Durchriß an der AN-Seite tritt ab

der Rißfortschrittsnummer 12 ein. Danach erfolgte der Rißfortschritt abwechselnd auf beiden Seiten. Globales Versagen des Trägers trat ein, als sich der Riß auf der AN-Seite ab der Rißfortschrittsnummer 18 instabil in Richtung des Auflagers bis zum Trägerende hin fortgepflanzt hatte. Der dargestellte Rißfortschritt mit den zugehörigen Rißlängen zeigt, daß der durchbrochene Träger bereits deutlich vor dem globalen Versagen erheblich geschädigt war.

Einen weiteren Aufschluß über die Relevanz der Schädigungsstufen gibt die Zuordnung der einzelnen Rißfortschritte zur globalen Last-Durchbiegungskurve des Trägers. Die Last-Verschiebungskurven in Bild 17, Beilage 13, zeigen auf der Abszisse die Durchbiegung des Trägers in Trägermitte und auf der Ordinate die Querkraft am Durchbruch. Bild 17a, Beilage 13, bildet die vollständige Kurve ab; Bild 17b, Beilage 13, zeigt einen Detail-Ausschnitt des oberen Last-Verformungsbereichs, wobei die Rißfortschrittsnummern mit angegeben sind. Bild 17b, Beilage 13, zeigt, daß der Anriß auf der AF-Seite (1) bei 66% und auf der AN-Seite (2) bei 72% der Höchstlast ($V_u = 100,9 \text{ kN}$) eintrat. Im Anschluß daran war über einen relativ langen Zeitraum Rißentwicklung im Querschnitt zu beobachten, bis es bei 90% der Höchstlast zum Durchriß an der AF-Seite (9) kam. Der Durchriß läßt sich auch an einem kleinen Lasteinbruch in der globalen Last-Durchbiegungskurve des Trägers erkennen. Unmittelbar anschließend kam es bei 93% der Höchstlast zum Durchriß an der gegenüberliegenden AN-Seite (12). Danach konnte über rd. 10% der Traglast stabiler Rißfortschritt in Trägerlängsrichtung bis zum globalen Versagen beobachtet werden.

4.2 Schädigung der untersuchten Träger

4.2.1 Versagensarten

Die in Kap. 4.1 dargestellte Schädigungsentwicklung zeigte sich nicht bei allen Trägern in gleicher Ausprägtheit. Es wird daher bei der Ergebnisbeschreibung zwischen zwei verschiedenen Durchbruchsversagen und zwar zwischen Durchbruchsversagen A und Durchbruchsversagen B unterschieden (siehe nachfolgend). Weiterhin kam es vereinzelt zu einem reinen Biegeversagen der Träger. Hierzu ist anzumerken, daß dies überwiegend darauf zurückzuführen ist, daß die BSH-Festigkeit einer Lieferung deutlich unterhalb den Anforderungen der Festigkeitsklasse GL 32h lag und das Brettschichtholz somit eine deutlich zu geringe Biegefestigkeit aufwies. In einigen Fällen trat auch ein kombiniertes Durchbruchs- und Biegeversagen auf. Die vier genannten Versagensarten sind wie folgt definiert:

- Durchbruchsversagen A: Der Träger versagte infolge Querzugversagen am Durchbruch, wobei eine Rißentwicklung mit Durchriß an einer oder an beiden Durchbruchsseiten (AN oder AF) vor dem globalen Versagen zu beobachten war.
- Durchbruchsversagen B: Der Träger versagte infolge Querzugversagen am Durchbruch, wobei vor dem globalen Versagen kein Durchriß an einer der beiden Durchbruchsseiten (AN oder AF) zu beobachten war.
- Durchbruchs- und Biegeversagen: Der Träger zeigte ein kombiniertes Versagen, wobei das Biegeversagen im mittleren Trägerbereich und der Durchriß an einer oder an beiden Durchbruchsseiten gleichzeitig eintrat, so daß nicht mit Sicherheit gesagt werden kann, welches der beiden Versagen primär war.
- Biegeversagen: Der Träger versagte infolge Biegebruch im mittleren Trägerbereich. (Anmerkung: Das Biegeversagen war mit Ausnahme eines Trägers darin begründet, daß die Biegefestigkeiten deutlich unterhalb der geforderten charakteristischen Biegefestigkeit von $f_{m,k} = 32 \text{ N/mm}^2$ für GL 32h lagen.

Insgesamt wurde bei 81% aller Versuche ein Durchbruchsversagen vom Typ A oder B (Durchbruchsversagen A = 65%, Durchbruchsversagen B = 16%) erhalten. Bei 7% der Versuche trat ein kombiniertes Durchbruchs- und Biegeversagen auf und bei 12% der Versuche erfolgte ein unplanmäßiges Biegeversagen. Die Versagensarten der einzelnen Träger sind in Tabelle 4 bis Tabelle 9, Beilage 14 bis Beilage 18, angegeben.

Die Träger der Testseriengruppen 450_1.5h_d/h, 900_1.5h_d/h, G450_5h_d/h und G900_5h_d/h zeigten durchweg ein Durchbruchsversagen vom Typ A oder B. Bei den Testseriengruppen 450_5h_d/h, 900_5h_d/h mit einem größeren Schnittgrößenverhältnis M/V am Durchbruch bzw. in Trägermitte kam es bei 56% der Träger zu einem Durchbruchsversagen vom Typ A oder B, bei 17% der Träger zu einem kombinierten Durchbruchs- und Biegeversagen und bei 27% der Träger zu einem Biegeversagen.

Anmerkung: Die Wahrscheinlichkeit eines Biegeversagens vor einem Versagen am Durchbruch wäre rechnerisch bei der Testserie 450_5h_0.2 am größten gewesen. Unterstellt man näherungsweise eine Reduktion der Durchrißlasten von 16% bezogen auf die Durchrißlasten der Testserie 450_1.5h_0.2, abgeschätzt mit dem in Kap. 7.5 vorgestellten Bemessungsmodell, so müßte die Biegefestigkeit der Träger mindestens dem 1,5fachen der charakteristischen Biegefestigkeit der

Festigkeitsklasse GL 32h (BS 16h) entsprechen, damit ein Versagen am Durchbruch auftritt. Aus diesem Grund wurde von der Realisierung dieser Testserie abgesehen.

Da bei den Testseriengruppen 450_5h_d/h und 900_5h_d/h ein Anteil von 27% der Träger ein Biegeversagen aufwies, von denen über die Hälfte nicht zur Auswertung verwendet werden konnte, wurden einige zusätzliche Versuche durchgeführt, um für alle Testserien (ausgenommen den gekrümmten Trägern) eine im Hinblick auf Durchbruchversagen auswertbare Probenanzahl von i.d.R. 5 Trägern zu erhalten.

Tabelle 4 bis Tabelle 9, Beilage 14 bis Beilage 18, geben für jeden Träger die Versagensart an und ob er für die weitere Auswertung verwendet wird. Desweiteren beinhalten die Tabellen für jeden Träger die Rohdichte, die Anriß- und die Durchrißlast jeweils an den beiden Durchbruchseiten AN und AF, die Höchstlast sowie die maximale absolute und relative Rißlänge auf jeder der beiden Durchbruchseiten AN und AF.

Bild A2a bis Bild A14b, Anhang A2 bis A14, zeigen für jede Testserie die Versagensbilder eines ausgewählten Trägers, der entweder infolge Durchbruchversagen A, Durchbruchversagen B oder infolge kombiniertem Durchbruchs- und Biegeversagen gebrochen ist. Es ist jeweils eine Frontalansicht des Durchbruchs mit dem Rißverlauf in der Durchbruchumgebung und eine Detailansicht des Rißverlaufs im Querschnitt des Durchbruchs dargestellt. Teilweise läßt sich anhand der angezeichneten Rißnummerierungen² der Ablauf des Rißfortschritts erkennen.

4.2.2 Last-Durchbiegungskurven

In Bild 18 bis Bild 22, Beilage 19 bis Beilage 23, sind die globalen Last-Durchbiegungskurven aller geprüften Träger dargestellt. In den Diagrammen ist jeweils die Querkraft am Durchbruch über der Gesamtdurchbiegung des Trägers in Trägermitte aufgetragen. Bis zum Durchriß konnte bei nahezu allen Trägern eine weitestgehend lineare globale Last-Durchbiegungskurve beobachtet werden. Ab der Durchrißlast ließen sich teilweise Lasteinbrüche in der globalen Last-Durchbiegungskurve beobachten. Es ist festzustellen, daß die Lasteinbrüche mit größer werdendem d/h-Verhältnis zunehmen. Dies liegt darin begründet, daß bei kleinen d/h-Verhältnissen die

² Anmerkung: Die Rißnummerierungen der Träger stellen Versuchsbezeichnungen dar, die ohne detaillierte Versuchsprotokolle teilweise nicht stringent nachvollziehbar sind. Es lassen sich daran jedoch die einzelnen Rißabschnitte gut erkennen.

Rißöffnung bzw. die absolute Energiefreisetzung im Verhältnis zur Gesamtverformung bzw. zur gesamten potentiellen Energie des Trägers sehr klein ist und sich der Anriß somit nicht oder nur sehr schwach in der Last-Durchbiegungskurve niederschlägt. Dies zeigt, daß Unstetigkeiten in der global gemessenen Last-Verformungskurve nicht als Kenngröße für eine lokale Schädigungsstufe am Durchbruch verwendet werden können. Die zutreffende Bestimmung des Schädigungsmaßes muß daher lokal erfolgen.

4.2.3 Rißlängen

Der Fortschritt des Risses in Trägerlängsrichtung wurde bei allen Trägern, sofern möglich, bis zum Versagen, aufgezeichnet. Vor dem globalen Versagen waren häufig bereits erhebliche Rißlängen und Rißöffnungen festzustellen. Um die Rißlängen unterschiedlicher Träger- und Durchbruchskonfigurationen miteinander vergleichen zu können, wird die relative Rißlänge L_{rel} betrachtet, d.h. das Verhältnis der Rißlänge zum Durchbruchsdurchmesser. Die maximale relative Rißlänge $L_{rel,max}$ in Trägerlängsrichtung, die vor dem globalen Versagen aufgezeichnet werden konnte, ist für jeden Träger in Tabelle 4 bis Tabelle 9, Beilage 14 bis Beilage 18, für beide Durchbruchsseiten AN und AF angegeben. Zur Ermittlung der maximalen relativen Rißlänge wurde jeweils der Mittelwert der sichtbaren Rißlänge auf beiden Trägeroberflächen verwendet. Die maximale relative Rißlänge $L_{rel,max}$ liegt bei Betrachtung aller Träger im Bereich von 0 bis 6,7; im Mittel beträgt $L_{rel,max} = 0,9$.

Betrachtet man nur die größere der beiden maximalen relativen Rißlängen der Durchbruchsseiten AN und AF, sodann mit $L_{rel,max,D}$ bezeichnet, so beträgt der Mittelwert über alle Träger $L_{rel,max,D} = 1,3$. Tabelle 10, Beilage 24, beinhaltet für alle Testserien die Mittelwerte von $L_{rel,max,D}$; es ist keine eindeutige Tendenz festzustellen, ob die maximale relative Rißlänge am Durchbruch von der Träger- oder Durchbruchskonfiguration abhängt. Hierzu ist anzumerken, daß die Bestimmung der maximalen Rißlänge mit einer gewissen Unschärfe behaftet ist, da kurz vor dem globalen Versagen der Rißfortschritt mit beträchtlichen Rißfortschrittslängen teilweise sehr schnell erfolgte.

4.3 Versagenslasten

4.3.1 Allgemeines

In der Literatur werden für die Versagenslast eines durchbrochenen Trägers von den jeweiligen Autoren unterschiedliche Lasten angegeben (vgl. Kap. 3.1). Zum einen wird die Höchstlast des durchbrochenen Trägers und zum anderen die Reißlast am Durchbruch als Versagenslast bezeichnet. Teilweise ist nicht eindeutig angegeben, ob die genannten Lasten den Höchstlasten oder den Reißlasten entsprechen. Sind Reißlasten als Versagenslasten angegeben, so ist der Begriff „Reißlast“ häufig nicht genau definiert. In einigen Literaturstellen werden Höchstlasten von Trägern angegeben, die infolge Biegung versagten und somit für die Durchbruchsbemessung irrelevant sind.

Nachstehend werden die Versuche des in Kap. 3.2 vorgestellten Versuchsprogramms hinsichtlich der Versagenslasten diskutiert und ausgewertet.

4.3.2 Definition der Lasten

Die durchbrochenen Träger versagen, wie in Kap. 4.1 beschrieben, in mehreren Schädigungsstufen. Die Schädigung am Durchbruch beginnt i.d.R. in der Querschnittsmitte. Dem ersten visuell erkennbaren Auftreten eines Risses im Querschnittsinneren des Durchbruchs, hier als **Anriß** bezeichnet, folgte in fast allen Fällen (90%) eine stabile Reißentwicklung in der Querschnittsebene hin zu den Querschnittsrändern. Ab dem Zeitpunkt, ab dem die Reißentwicklung im Querschnitt **beide** Querschnittsränder erreicht hat, hier als **Durchriß** bezeichnet, breitete sich der Riß in Trägerlängsrichtung aus. Die Reißentwicklung in Trägerlängsrichtung erfolgte im Regelfall (80%) stabil. Die genannten Schädigungsstufen können an einem oder an beiden Durchbruchsbereichen (AN und AF) beobachtet werden. **Globales Versagen** des Trägers tritt ein, wenn der instabil verlaufende Riß das Trägerende am Auflager erreichte.

Für jeden Träger wurden die einzelnen Schädigungsstufen zusammen mit den dazugehörigen Belastungen dokumentiert. Entsprechend der drei oben genannten kennzeichnenden Schädigungszustände Anriß, Durchriß und globales Versagen ergeben sich drei kennzeichnende Lasten, die hier mit **Anrißlast**, **Durchrißlast** und **Höchstlast**, bezeichnet werden:

- **Anrißlast:** Als Anrißlast wird die Querkraft am Durchbruch bezeichnet, bei welcher der Anriß erstmalig beobachtet wurde. Für jeden Durchbruch gibt es zwei Anrißlasten, eine für die Durchbruchsseite AN und eine für die Durchbruchsseite AF. Trat kein Anriß vor dem

Durchriß oder vor dem globalen Versagen auf, so ist die Anrißlast mit der Durchrißlast bzw. mit der Höchstlast identisch. Es ist anzumerken, daß die Bestimmung der Anrißlast versuchstechnisch nicht unproblematisch ist; die Anrißlast weist daher eine deutlich höhere Fehlerbreite auf als die Durchrißlast.

- **Durchrißlast:** Als Durchrißlast wird die Querkraft am Durchbruch bezeichnet, bei welcher der Durchriß erstmalig beobachtet wird. Für jeden Durchbruch gibt es zwei Durchrißlasten, eine für die Durchbruchseite AN und eine für die Durchbruchseite AF. Für den Fall, daß vor dem globalen Versagen kein Durchriß auftrat, wird die Durchrißlast mit der Höchstlast gleichgesetzt. Die Bestimmung der Durchrißlast ist versuchstechnisch sehr genau möglich.
- **Höchstlast:** Als Höchstlast wird die höchste aufnehmbare Querkraft des durchbrochenen Trägers bezeichnet.

In Tabelle 4 bis Tabelle 9, Beilage 14 bis Beilage 18, sind die Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten für jeden einzelnen Träger aller Testserien angegeben.

In die weitere Auswertung der Versuche wurden alle Träger einbezogen, die entweder Durchbruchsversagen A, Durchbruchsversagen B oder ein kombiniertes Durchbruchs- und Biegeversagen aufwiesen. Die infolge Biegung versagten Träger wurden ebenfalls zur Auswertung der Durchrißlasten verwendet, sofern deren durch Biegeversagen bestimmten Traglasten über der mittleren Durchrißlast der entsprechenden Testserie liegen.

In Tabelle 11 bis Tabelle 16, Beilage 25 bis Beilage 29, sind die Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten der zur weiteren Auswertung verwendeten Träger der einzelnen Testseriengruppen zusammengestellt. Tabelle 17, Beilage 30, enthält eine zusammenfassende Darstellung der kennzeichnenden Lasten aller Testserien; für jede Testserie sind der Mittelwert und der Variationskoeffizient für die Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten angegeben. Da je Durchbruchseite (AN bzw. AF) eine separate Anriß- bzw. Durchrißlast vorliegt, wurde für die Bestimmung der Mittelwerte der Anriß- bzw. der Durchrißlasten jeweils die niedrigere der beiden Anriß- bzw. Durchrißlasten verwendet, unabhängig davon, auf welcher Durchbruchseite die jeweilige Last bestimmt wurde. Desweiteren sind für jede Testserie die Verhältnisse der mittleren Anrißlast zur mittleren Höchstlast sowie der mittleren Durchrißlast zur mittleren Höchstlast angegeben. Eine graphische Darstellung der kennzeichnenden Lasten in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße ist in Bild 23, Beilage 31, in Abhängigkeit vom Moment/Querkraft-Verhältnis in Bild 24, Beilage 32, und in Abhängigkeit von der Trägerkrümmung in Bild 25, Beilage 33, gegeben. Zur besseren Veranschaulichung

der Einflüsse der Versuchsparameter sind die Mittelwerte der Versuchsergebnisse durch lineare Interpolation verbunden.

Aus den genannten Tabellen und Diagrammen läßt sich hinsichtlich der Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten folgendes ableiten:

4.3.2.1 Anrißlasten

Bei der Mehrzahl der Träger war an einer (90%) oder an beiden (56%) Durchbruchseiten ein Anriß vor dem Durchriß zu beobachten.

Bei den Testseriengruppen mit dem Schnittgrößenverhältnis $M/V = 1,5h$ lagen die Anrißlasten der beiden Durchbruchseiten AN und AF relativ dicht beieinander. Bei den Testseriengruppen der geraden und gekrümmten Träger mit $M/V = 5h$ wichen die Anrißlasten der beiden Durchbruchseiten stärker voneinander ab; weiterhin traten die Anrißlasten an der AF-Seite erheblich früher auf als an der AN-Seite.

Anrisse sind lokale Schädigungen, bei denen die Spannungsspitzen im Querschnitt abgebaut werden. Die Höhe der Anrißlast hängt in hohem Maße von den lokalen Querschnittsgegebenheiten (Lamellenaufbau, Jahrringlage) am Durchbruch ab. Die große Variabilität der lokalen Verhältnisse bedingt eine große Streuung der Anrißlasten. Der Variationskoeffizient schwankte zwischen den einzelnen Testserien von 19,2% bis 52,6%; im Mittel betrug der Variationskoeffizient 30,2%.

4.3.2.2 Durchrißlasten

Das Auftreten des Durchrisses stellt den Übergang von der lokalen zur globalen Schädigung dar.

Die Durchrißlasten liegen deutlich höher als die Anrißlasten. Während bei den Testseriengruppen 900_1.5h_d/h und G450_5h_0.4 die Durchrißlast stets vor der Höchstlast auftrat, war bei den restlichen Testseriengruppen in etwa bei der Hälfte der Versuche die Durchrißlast identisch mit der Höchstlast. Die Verhältnismerte Durchrißlast/Höchstlast der einzelnen Testserien sind in Tabelle 17, Beilage 30, angegeben. Weiterhin war bei den Testseriengruppen mit $M/V = 5h$ am Durchbruch die Durchrißlast auf der AF-Seite stets kleiner als oder identisch der Durchrißlast auf der AN-Seite. Dies war bei den Testseriengruppen mit $M/V = 1,5h$ am Durchbruch nur zu 81% der Fall. Die Variationskoeffizienten der Durchrißlasten sind wesentlich niedriger als die der zugehörigen Anrißlasten. Der mittlere Variationskoeffizient beträgt 18,0%.

4.3.2.3 Höchstlasten

Bei Erreichen der Höchstlast ist der Träger im Bereich des Durchbruchs meistens bereits erheblich geschädigt. Es konnten häufig Risse mit einer Rißöffnung bis zu rd. 5 mm und einer Rißlänge bis zu einem Vielfachen des Durchbruchdurchmessers beobachtet werden.

Nach Eintreten des Durchrisses ist meist noch eine Laststeigerung bis zur Höchstlast möglich (vgl. Tabelle 17, Beilage 30). Das globale Versagen der Träger wurde durch Erreichen der Schubtragfähigkeit (in Interaktion mit Querkraft) der Träger am Auflager erreicht. Von deutlichem Einfluß ist die Vorholzlänge, d.h. die Länge zwischen Rißspitze und Trägerende. Die Höchstlast steht nicht im direktem Zusammenhang mit dem Durchbruch. Wie Tabelle 17, Beilage 30, und Bild 23 bis Bild 25, Beilage 31 bis Beilage 33, zeigen, liegen die Verhältnisse von Durchrißlast zu Höchstlast bei den Testserien mit der Trägerhöhe $h = 900$ mm stets niedriger als diejenigen der zugehörigen Testserien mit der Trägerhöhe $h = 450$ mm.

Die Variationskoeffizienten der Höchstlasten sind mit einer Ausnahme wesentlich niedriger als die der zugehörigen Durchrißlasten. Der mittlere Variationskoeffizient der Höchstlasten der durchweg gravierend vorgeschädigten Träger beträgt 10,7%.

4.3.3 Durchrißlasten und Höchstlasten

Bei den Durchrißlasten wird zur Auswertung jeweils nur die niedrigste der beiden Durchrißlasten eines Durchbruchs verwendet.

Die verwertbare Probenanzahl je Testserie beträgt bei den geraden Trägern im Mittel fünf, was eine gute Abschätzung des Mittelwertes erlaubt. Im Falle der gekrümmten Träger stehen für die Mittelwertbildung jeweils drei Träger zur Verfügung. Im Gegensatz zu den Mittelwerten sind die Standardabweichungen bzw. die Variationskoeffizienten mit größeren Unsicherheiten behaftet. In Tabelle 17, Beilage 30, sind die Variationskoeffizienten angegeben. In Tabelle 18 und Tabelle 19, Beilage 34, sind zusätzlich die Standardabweichungen aufgeführt.

Bei den Durchrißlasten umspannt der Variationskoeffizient einen relativ weiten Bereich von 11,5% bis 35,0%, wobei der Variationskoeffizient der Testserie G900_5h_0.4 (gekrümmte Träger) mit einem Wert von 35,0% erheblich über den Werten der anderen Testserien liegt; hierbei muß jedoch berücksichtigt werden, daß diese Testserie nur einen Probenumfang von drei Trägern aufweist. Der Mittelwert des Variationskoeffizienten über alle Testserien beträgt bei den Durchrißlasten 18,0%. Betrachtet man ausschließlich die geraden Träger, so beträgt die Spanne der Variati-

onskoeffizienten der Durchrißlasten 11,5% bis 26,2%; der mittlere Variationskoeffizient liegt bei 16,4%.

Bei den Höchstlasten umspannt der Variationskoeffizient aller Testserien einen Bereich von 4,0% bis 19,4%. Der Mittelwert des Variationskoeffizienten über alle Testserien beträgt bei den Höchstlasten 10,7%. Betrachtet man ausschließlich die geraden Träger, so umfaßt die Spanne der Variationskoeffizienten ebenfalls 4,0% bis 19,4%; der mittlere Variationskoeffizient liegt bei 11,1%.

Die Streuung der Durchriß- bzw. Höchstlasten hängt weder signifikant vom d/h-Verhältnis noch vom beanspruchten Volumen ab. In umfangreichen Untersuchungen der Querkzugfestigkeit an unterschiedlichen Prüfvolumina in [Aic1998] konnte ebenfalls keine Abhängigkeit der Streuung vom Volumen festgestellt werden. Es wird daher als gerechtfertigt angesehen, den Variationskoeffizienten konstant für alle Testserien mit dem Testserienmittelwert anzusetzen. Bei den Durchrißlasten wird somit im weiteren für alle Testserien einheitlich ein Variationskoeffizient von $V = 18,0\%$ verwendet und für die Höchstlasten wird einheitlich der Variationskoeffizient $V = 10,7\%$ angenommen.

Die unter Zugrundelegung einer Gaußverteilung berechneten 5%-Fraktile³ $x_{5,konst}$ aus den jeweiligen Mittelwerten der Testserien und dem als konstant angenommenen Variationskoeffizienten sind in Tabelle 18, Beilage 34, für die Durchrißlasten und in Tabelle 19, Beilage 34, für die Höchstlasten angegeben. Die so ermittelten 5%-Fraktile $x_{5,konst}$ verlaufen parallel zu den Mittelwertskurven. Zum Vergleich sind jeweils auch die 5%-Fraktile $x_{5,ind}$ angegeben, welche aus den individuellen Standardabweichungen bzw. Variationskoeffizienten der einzelnen Testserien resultieren.

Bild 26 bis Bild 28, Beilage 35 bis Beilage 37, zeigen eine graphische Darstellung der Durchrißlasten in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße (Bild 26), in Abhängigkeit vom M/V-Verhältnis (Bild 27) und in Abhängigkeit vom Krümmungsradius (Bild 28). In jedem Diagramm sind die Mittelwerte, die beiden 5%-Fraktile ($x_{5,ind}$ und $x_{5,konst}$) und die Einzelergebnisse der jeweiligen Testserien angegeben.

³ Abweichend von der üblichen Schreibweise wird im vorliegenden Forschungsbericht die untere 5%-Fraktile durchweg mit x_5 anstatt mit x_{05} bezeichnet.

Bild 29 bis Bild 31, Beilage 38 bis 40, zeigen sinngemäß dieselben graphischen Darstellungen für die Höchstlasten.

Die 5%-Fraktilewerte $x_{5,ind}$ sind stets kleiner gleich dem niedrigsten Testserienwert. Die 5%-Fraktilewerte $x_{5,konst}$ sind mit einer Ausnahme (Testserie 900_5h_0.4) ebenfalls stets kleiner gleich dem niedrigsten Testserienwert.

Anhand der Mittelwertskurven und der Kurven der 5%-Fraktilewerte $x_{5,konst}$ läßt sich die Abhängigkeit der Durchriß- und Höchstlasten von den untersuchten Parametern relative Durchbruchgröße, M/V-Verhältnis und Krümmungsradius wie nachstehend dargelegt, aufzeigen.

4.3.3.1 Einfluß der relativen Durchbruchgröße (d/h-Verhältnis)

Die Durchriß- und Höchstlasten nehmen mit zunehmender Durchbruchgröße (d/h-Verhältnis) erwartungsgemäß deutlich ab; vergleiche hierzu Tabelle 18 und Tabelle 19, Beilage 34. Das Ausmaß der Tragfähigkeitsreduzierung ist bei den Durchriß- und Höchstlasten gut vergleichbar. Die Durchrißlast verringert sich bei einer Vergrößerung des d/h-Verhältnisses von $d/h = 0,2$ auf $d/h = 0,4$ bei einem Schnittkraftverhältnis von $M/V = 1,5h$ bei den Testseriengruppen 450_1.5h_d/h und 900_1.5h_d/h um 38% bzw. 35%; im Mittel beträgt die Abnahme 36,5%. Bei der Testseriengruppe 900_5h_d/h mit einem Schnittkraftverhältnis am Durchbruch von $M/V = 5h$ nimmt die Durchrißlast um 42% ab. Bei den Höchstlasten betragen die Tragfähigkeitsreduzierungen bei den Testseriengruppen 450_1.5h_d/h und 900_1.5h_d/h 37% bzw. 31%, im Mittel 34%. Bei der Testseriengruppe 900_5h_d/h nimmt die Höchstlast um 32% ab.

4.3.3.2 Einfluß der Trägerhöhe (Größeneinfluß)

Anhand der unterschiedlichen Trägerhöhen bei ansonsten gleichbleibenden Träger- und Durchbruchskonfigurationen läßt sich der Größeneinfluß beurteilen. Genaugenommen wird nur der Einfluß der Trägerhöhe betrachtet, die sich bei den beiden Testseriengruppen um den Faktor 2 unterscheidet; die Trägerbreite war mit $b = 120$ mm bei allen Versuchen konstant.

In

Tabelle 20, Beilage 41, sind die Verhältnisse der mittleren Durchriß- und Höchstlasten der einander entsprechenden Testserien aufgezeigt. Das mittlere Querkraftverhältnis der unterschiedlich hohen Träger beträgt auf dem Niveau der Mittelwerte und der charakteristischen Werte bei den Durchrißlasten 1,31 und bei den Höchstlasten 1,54. Läge kein Größeneinfluß vor, müßte das Ver-

hältnis 2 betragen. Dies verdeutlicht, daß ein deutlicher Größeneinfluß vorliegt, dem in einem Bemessungsmodell Rechnung zu tragen ist.

4.3.3.3 Momenteneinfluß (M/V-Verhältnis)

Anhand der Testseriengruppen 450_1.5h_d/h und 450_5h_d/h bzw. 900_1.5h_d/h und 900_5h_d/h, die sich lediglich durch das Moment/Querkraft-Verhältnis am Durchbruch unterscheiden, läßt sich der Momenteneinfluß beurteilen. Die Verhältnisse der mittleren Durchriß- und Höchstlasten der einander entsprechenden Testserien sind in Tabelle 21, Beilage 41, angegeben. Die hohen Streuungsmaße gestalten die Quantifizierung des M/V-Verhältnisses auf die Tragfähigkeit schwierig. Qualitativ läßt sich jedoch sagen, daß mit zunehmenden Momenteneinfluß die Tragfähigkeiten abnehmen.

4.3.3.4 Einfluß der die Trägerform

Anhand der Testserien 450_5h_0.4 und G450_5h_0.4 bzw. 900_5h_0.4 und G900_5h_0.4 läßt sich der Einfluß der Trägerkrümmung beurteilen. In Tabelle 22, Beilage 41, sind die Verhältnisse der Durchriß- und Höchstlasten der einander entsprechenden Testserien aufgezeigt. Das mittlere Querkraftverhältnis beträgt bei einer Zunahme der Trägerkrümmung von $r_m/h = 0$ auf $r_m/h = 0,03$ bei den Durchrißlasten 1,26 und bei den Höchstlasten 1,20. Dies zeigt, daß bereits eine sehr geringe Trägerkrümmung zu einer signifikanten Reduzierung der Traglasten führt.

4.4 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Versuche wurden hinsichtlich des Schädigungsverhalten und der Traglasten ausgewertet und diskutiert. Die vorliegende Datenbasis umfaßt den Einfluß der Trägerhöhe (Größeneinfluß), den Einfluß der relativen Durchbruchgröße (d/h-Verhältnis), den Einfluß des Moment/Querkraft-Verhältnisses und den Einfluß der Trägerkrümmung.

Wesentliche qualitative Ergebnisse der durchgeführten Versuche sind:

- Es liegt ein sehr ausgeprägter Größeneinfluß vor.
- Die Traglasten sinken mit zunehmender relativer Durchbruchgröße deutlich.
- Die Traglasten nehmen mit zunehmendem Schnittkraftverhältnis M/V am Durchbruch ab.

- Die Traglasten nehmen bereits bei geringer überlagerter Trägerkrümmung deutlich ab.

5 Gegenüberstellung: Experimentelle Ergebnisse – bekannte Bemessungsansätze

Im folgenden werden die Lösungen der Bemessungsansätze DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 mit den Durchriß- und Höchstlasten der in Kap. 4 aufgeführten Versuche an geraden Trägern verglichen. Die Gegenüberstellung erfolgt auf dem Niveau der charakteristischen Festigkeitswerte (5%-Fraktilewerte). Für die Berechnung der charakteristischen Tragfähigkeiten der beiden Bemessungsansätze DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 werden die charakteristischen Festigkeitswerte der Brettschichtholz-Festigkeitsklasse GL 32h der relevanten Normen DIN 1052:2004 und EN 1194 verwendet (siehe auch Kap. 2.5).

5.1.1 Gegenüberstellung mit Durchrißlasten

Bild 32a-d, Beilage 42, und Tabelle, Beilage 44, beinhalten eine Gegenüberstellung der Tragfähigkeiten zufolge der Bemessungsansätze DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 mit den experimentellen Durchrißlasten. Die Diagramme in Bild 32a-d, Beilage 42, zeigen jeweils die rechnerischen charakteristischen Querkrafttragfähigkeiten in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße für die vier Testseriengruppen mit geraden Trägern. Für die experimentellen Ergebnisse sind jeweils die beiden 5%-Fraktilewerte $x_{5,ind}$ und $x_{5,konst}$ angegeben (vgl. Kap. 4.3.3). Zusätzlich sind die Mittelwerte und die Einzelergebnisse der jeweiligen Testserien mit angegeben.

Zusammenfassend läßt sich folgendes festhalten:

- Die Abhängigkeit der charakteristischen Tragfähigkeit von der relativen Durchbruchgröße d/h wird qualitativ durch die beiden Bemessungsansätze gut wiedergegeben.
- Ein Vergleich der absoluten charakteristischen Tragfähigkeiten zeigt folgendes:
 - a) Der Bemessungsansatz nach DIN 1052:2004 zeigt für die Testseriengruppe 450_1.5h_d/h eine sehr gute Übereinstimmung mit den 5%-Fraktilewerten der experimentellen Durchrißlasten (Rechenwert/experimentelle Durchrißlast = $1,03 \pm 0,07$). Für die Testseriengruppe 900_1.5h_d/h liegen die nach DIN 1052:2004 ermittelten Werte sehr deutlich über den experimentellen Werten ($1,43 \pm 0,15$). Im Falle der Testseriengruppe 450_5h_d/h liegen die charakteristischen Tragfähigkeiten nach DIN 1052:2004 deutlich unter den Versuchswerten ($0,78 \pm 0,01$); dies zeigt auf, daß der Momenteneinfluß nach DIN 1052:2004 zu stark ge-

wichtet ist. Die rechnerischen charakteristischen Tragfähigkeiten der Testseriengruppe 900_5h_d/h liegen vergleichbar der Testseriengruppe 900_1.5h_d/h deutlich über den experimentellen charakteristischen Werten ($1,31 \pm 0,30$). Die Tatsache, daß die charakteristischen Tragfähigkeiten zufolge DIN 1052:2004 bei beiden Testseriengruppen mit der Trägerhöhe $h = 900$ mm im Mittel um den Faktor $(1,43 + 1,31)/2 = 1,37$ deutlich zu hoch liegen, resultiert aus der Nichtberücksichtigung des Größeneinflusses.

- b) Der Bemessungsansatz nach prEN 1995-1-1:2003 ergibt für alle Testseriengruppen wesentlich zu hohe Tragfähigkeiten. Im Mittel aller vier Testseriengruppen liegen die rechnerischen charakteristischen Tragfähigkeiten um den Faktor $(2,14 + 2,19 + 2,31 + 2,77)/4 = 2,35$ über den jeweiligen experimentellen charakteristischen Werten. Weiterhin sind die nach prEN 1995-1-1:2003 berechneten Werte für die Testseriengruppen 450_1.5h_d/h und 900_1.5h_d/h bzw. für die Testseriengruppen 450_5h_d/h und 900_5h_d/h jeweils identisch, da der Bemessungsansatz keinen Momenteneinfluß berücksichtigt.

5.1.2 Gegenüberstellung mit Höchstlasten

Bild 33 a-d, Beilage 43, und Tabelle, Beilage 44, beinhalten eine Gegenüberstellung der Tragfähigkeiten zufolge der Bemessungsansätze DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 mit den experimentellen Höchstlasten. Die Diagramme in Bild 33a-d, Beilage 43, zeigen jeweils die rechnerischen charakteristischen Querkrafttragfähigkeiten in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße für die vier Testseriengruppen mit geraden Trägern. Für die experimentellen Ergebnisse sind jeweils die beiden ermittelten 5%-Fraktilenwerte $x_{5,ind}$ und $x_{5,konst}$ angegeben (vgl. Kap. 4.3.3). Zusätzlich sind die Mittelwerte und die Einzelergebnisse der jeweiligen Testserien mit angegeben.

Zusammenfassend läßt sich folgendes festhalten:

- Die Abhängigkeit der charakteristischen Tragfähigkeit von der relativen Durchbruchgröße d/h wird qualitativ durch die beiden Bemessungsansätzen gut wiedergegeben.
- Ein Vergleich der absoluten charakteristischen Tragfähigkeiten zeigt folgendes:
 - a) Die charakteristischen Tragfähigkeiten nach DIN 1052:2004 liegen abgesehen von der Testseriengruppe 900_1.5h_d/h, unter den 5%-Fraktilenwerten der Höchstlasten. Im Falle der Testseriengruppe 900_1.5h_d/h liegt eine nahezu vollständige Übereinstimmung vor (Rechenwert/experimentelle Höchstlast = $1,01 \pm 0,07$). Im Falle der Testseriengruppen

450_1.5h_d/h, 450_5h_d/h und 900_5h_d/h liegen die charakteristischen Tragfähigkeiten nach DIN 1052:2004 deutlich unter den Versuchswerten ($0,83 \pm 0,04$; $0,60 \pm 0,02$ und $0,83 \pm 0,02$).

- b) Der Bemessungsansatz nach prEN 1995-1-1:2003 ergibt für alle Testseriengruppen wie bereits bei den Durchrißlasten wesentlich zu hohe Tragfähigkeiten. Im Mittel aller vier Testseriengruppen liegen die rechnerischen charakteristischen Tragfähigkeiten um den Faktor $(1,72 + 1,55 + 1,77 + 1,76)/4 = 1,70$ über den jeweiligen experimentellen charakteristischen Werten. Weiterhin sind die nach prEN 1995:2003 berechneten Werte für die Testseriengruppen 450_1.5h_d/h und 900_1.5h_d/h bzw. für die Testseriengruppen 450_5h_d/h und 900_5h_d/h jeweils identisch, da der Bemessungsansatz keinen Momenteneinfluß berücksichtigt.

5.1.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend läßt sich festhalten:

- Der Bemessungsansatz nach prEN 1995-1-1:2003 liefert durchweg, auch bei sehr unterschiedlichen Versuchskonfigurationen, wesentlich zu hohe charakteristische Tragfähigkeiten gegenüber einer sehr umfassenden Datenbasis. Im Mittel aller Versuchskonfigurationen beträgt die rechnerische charakteristische das 2,4fache der charakteristischen experimentellen Durchrißlasten und das 1,7fache der charakteristischen experimentellen Höchstlasten. Das erhaltene sicherheitsrelevant nicht vertretbare Ergebnis der Untersuchungen bestätigt die von den Autoren in Vorversuchen erhaltenen Ergebnisse und die auf Hinweis der Autoren vollzogene Rücknahme des Bemessungsansatzes aus der EN 1995-1-1:2004.
- Für die nach dem Bemessungsansatz DIN 1052:2004 berechneten charakteristischen Tragfähigkeiten gilt:
 - Die rechnerischen Tragfähigkeiten stimmen für kleine Träger ($h = 450$ mm) gut mit den charakteristischen experimentellen Durchrißlasten überein; bei hohen Trägern ($h = 900$ mm) liegen die rechnerischen Werte bezüglich der Durchrißlasten deutlich auf der unsicheren Seite.
 - Die rechnerischen Tragfähigkeiten sind teilweise sehr konservativ bezüglich der charakteristischen experimentellen Höchstlasten.

- Nach Ansicht der Autoren erscheint eine Zugrundelegung der Höchstlasten als Versagenslasten aus den nachgenannten Gründen sicherheitsrelevant nicht vertretbar:
 - Viele Träger wiesen nach Überschreiten der Durchrißlast erhebliche Rißlängen (bis zu einem Vielfachen des Durchbruchsdurchmessers) in Trägerlängsrichtung auf.
 - Bei rd. 30% der Träger mit Durchbruchversagen fiel die Durchrißlast mit der Höchstlast zusammen, d.h. unmittelbar an den Querschnittsdurchriß trat instabile Rißverlängerung bis zum Auflager und damit Versagen des Trägers auf. In allen anderen Fällen mit mehr oder weniger deutlichem Unterschied zwischen Durchriß- und Höchstlast trat stabiler Rißfortschritt zwischen beiden Lastniveaus auf. Ungeachtet der Tatsache, daß in den berichteten Versuchen der stabile Rißfortschritt zwischen den Zeitpunkten der Durchrißlast und der Höchstlast durch Lasterhöhung getrieben wurde, ist keinesfalls auszuschließen, daß der Rißfortschritt nicht auch teilweise oder gänzlich bei konstant gehaltenem Durchrißlastniveau aufgetreten wäre. (Anmerkung: In einem orientierenden ergänzenden Bauteilversuch nach Abschluß des berichteten Forschungsvorhabens wurde der Sachverhalt des angesprochenen kurz/mittelfristigen Rißfortschritts belegt.) Es ist in diesem Zusammenhang auch darauf hinzuweisen, daß der kurz-, mittel- und langfristige Rißfortschritt ausgehend von einem Querschnittsdurchriß keinesfalls ausreichend⁴ durch die k_{mod} -Abminderungsfaktoren, die den Festigkeitseinfluß der kumulierten Lasteinwirkungsdauer und der Klimaeinwirkungen erfassen, abgedeckt wird.

⁴ Mittels der k_{mod} Faktoren wird die für organische Werkstoffe typische, quasi homogene Festigkeitsminderung/Materialdegradation in Abhängigkeit von den Parametern Belastungszeit, -verlauf und -höhe in Verbindung mit den Klimabedingungen erfaßt. Die erhaltene globale Festigkeitsminderung resultiert im wesentlichen aus verschmierter Schädigung und Mikrorißwachstum ausgehend von Defekten auf der Nano-, Mikro- und Mesostrukturebene. Der durch die k_{mod} -Werte beschriebene „Alterungsprozess“ strebt lastabhängig asymptotisch einem Endwert zu. Im Gegensatz dazu stellt der Querschnittsdurchriß eine Schädigung auf der Makroskala dar, welche die Geometrie des Bauteils so ändert, daß eine globale Spannungssingularität/überhöhung an der Rißfront vorliegt. Der zeit- und lastabhängige Makrorißfortschritt repräsentiert die diskrete Schädigung des Bauteils (= Geometrieänderung) und ist weitestgehend getrennt von einer verschmierten endlichen Materialdegradation zu sehen.

6 Bemessungsrelevante Spannungen am Durchbruch

6.1 Allgemeines

Befindet sich in einem geraden oder gekrümmten Träger ein Durchbruch, so können die Biege-, Schub- und ggf. Querspannungen (σ_x , τ und σ_y) im Bereich des Durchbruchs nicht mehr ungehindert übertragen werden (Bild 34a,b, Beilage 45). Es kommt zu einer Spannungsumlagerung, wobei in der Umgebung des Durchbruchs Spannungskonzentrationen der drei Spannungskomponenten σ_x , σ_y und τ_{xy} auftreten, vgl. Bild 13, Beilage 10, Bild 35 und Bild 36, Beilage 47 und Beilage 48.

In [Höf2005] wird für gerade Träger die Schadensrelevanz der Spannungskomponenten unter Verwendung eines quadratischen Versagenskriteriums diskutiert. Es wird gezeigt, daß die Spannungskomponente rechtwinklig zur Faserrichtung infolge der extrem niedrigen Festigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung mit weit über 90% den Hauptanteil der Interaktion ausmacht und somit in ausreichender Näherung als alleinig maßgebend für die Reißinitiierung angesehen werden kann. Im folgenden wird somit nur die schadigungsrelevante Spannungskomponente σ_y rechtwinklig zur Faserrichtung betrachtet. Diese Betrachtungsweise findet sich in Übereinstimmung mit dem festigkeitsbasierten Bemessungsansatz nach DIN 1052:2004.

6.2 Modellierung und Materialparameter

Den 2dimensionalen linear elastischen FE-Berechnungen⁵ wurde ein ebener Spannungszustand und orthotropes Materialverhalten mit den für Brettschichtholz gemäß DIN EN 1194 typischen Steifigkeitsverhältnissen von $m = E_l / E_q : E_l / G_{lq} = 30 : 16$ zugrundegelegt ($l =$ faserparallel; $q =$ rechtwinklig zur Faserrichtung). Die Querkontraktionszahl $\nu_{lq} = \nu_{ql} E_q / E_l$ (1. Index: Verzerrungsrichtung) wurde mit 0,015 angesetzt ([Neu1981]). In [Aic2001] durchgeführte Sensitivitätsuntersuchungen zum Einfluß der Orthotropieverhältnisse in dem für Brettschichtholz realistischen Steifigkeits-Streubereich von $m \approx 25 : 20$ bis $33 : 17$ zeigten überwiegend nur geringe Spannungsunterschiede (max. rd. 5%) gegenüber den angenommenen Referenzsteifigkeitsverhältnissen.

⁵ Für die Spannungsberechnungen wurde das Finite-Elemente-Programm ANSYS verwendet.

6.3 Gerade Träger

Die Spannungsverteilung rechtwinklig zur Faserrichtung in der Durchbruchumgebung eines geraden Trägers ist in [Aic2001] ausführlich erläutert und wurde in [Aic2003] experimentell nachgewiesen. In [Aic2001] wurden die Beanspruchungsarten Moment und Querkraft getrennt voneinander betrachtet und jeweils für die maximale Spannung am Durchbruch einfache analytische Formeln abgeleitet. Die angegebenen Formeln zur Berechnung der maximalen Spannung am Durchbruch beziehen sich auf einzelne runde Durchbrüche. Bei mehreren nebeneinander liegenden Durchbrüchen (Abstand der Durchbrüche $\leq 1,5 \times$ Trägerhöhe) beeinflussen sich die Spannungsfelder der Durchbrüche gegenseitig was zu einer weiteren Spannungserhöhung gegenüber einfach durchbrochenen Trägern führt.

6.3.1 Spannungen rechtwinklig zur Faserrichtung zufolge reiner Momentenbeanspruchung

In einem geraden Biegeträger unter reiner Momentenbeanspruchung müssen infolge des Durchbruchs nur die Biegespannungen umgelagert werden (Bild 34a, Beilage 45). Die daraus entstehenden Spannungen rechtwinklig zur Faserrichtung σ_y in der Umgebung des Durchbruchs sind in Bild 35a, Beilage 47, gezeigt. Der Maximalwert der Zugspannung rechtwinklig zur Faserrichtung befindet sich direkt am Durchbruchsrand bei $\varphi = 60^\circ$ und lässt sich in guter Näherung mit folgender aus FE-Berechnungen abgeleiteten Formel ausdrücken (siehe [Aic2001]):

$$\sigma_{y,\max,M} = 0,1 \frac{M}{W} \frac{d}{h}, \quad (9)$$

hierbei ist M das Moment an der Stelle des Durchbruchmittelpunktes.

Der Fehler zwischen den FE-berechneten maximalen Spannungen und den Spannungswerten nach Gl. (9) beträgt im Mittel 0,9% (Tabelle 25, Beilage 46).

6.3.2 Spannungen rechtwinklig zur Faserrichtung zufolge fiktiv reiner Querkraftbeanspruchung

In einem geraden Biegeträger unter fiktiv reiner Querkraftbeanspruchung müssen infolge des Durchbruchs die Schubspannungen umgelagert werden (Bild 34a, Beilage 45). Die daraus entstehenden Spannungen rechtwinklig zur Faserrichtung σ_y in der Umgebung des Durchbruchs sind in Bild 35b, Beilage 47, gezeigt. Hier befindet sich der Maximalwert der Zugspannung rechtwinklig zur Faserrichtung am Durchbruchsrand bei $\varphi = 40^\circ$ und berechnet sich wie folgt (siehe [Aic2001]):

$$\sigma_{y,\max,V} = \frac{3}{2} \frac{V}{b h} \left(1,23 + 0,82 \frac{d}{h} \right), \quad (10)$$

wobei V die Querkraft an der Stelle des Durchbruchsmittelpunktes ist.

Der Fehler zwischen den FE-berechneten maximalen Spannungen und den Spannungswerten nach Gl. (10) beträgt im Mittel 1,5% (Tabelle 25, Beilage 46).

6.3.3 Spannungen rechtwinklig zur Faserrichtung zufolge kombinierter Momenten- Querkraftbeanspruchung

Bei einer kombinierten M/V-Beanspruchung können die beiden Anteile aus der reinen Momentenbeanspruchung und der fiktiv reinen Querkraftbeanspruchung addiert werden. Da die Spannungsmaxima infolge Moment und Querkraft jedoch nicht an der selben Stelle am Durchbruchrand liegen, kann der aus der Superposition erhaltene Wert bis zu 20% größer sein als der exakte Wert für die spezielle M/V-Kombination. Zur genaueren Berechnung der Überlagerungsspannung aus M und V am Durchbruchrand kann die Zugspannung rechtwinklig zur Faserrichtung gemäß

$$\sigma_{y,\max,M/V} = (\sigma_{y,\max,V} + \sigma_{y,\max,M}) \chi_{M/V} \quad (11)$$

mit

$$\chi_{M/V} = \begin{cases} 0,9 & \text{für kombinierte M/V-Beanspruchung} \\ 1 & \text{für reine M-Beanspruchung} \end{cases} \quad (12)$$

bestimmt werden (Tabelle 24, Beilage 46). Der Fehler der so erhaltenen Spannung beträgt im Mittel 3,0% (Tabelle 25, Beilage 46).

6.4 Gekrümmter Träger

In geometrischer Hinsicht ist jeder Träger, dessen Achse eine planmäßige Krümmung aufweist ein gekrümmter Träger. In baupraktischer Hinsicht wird jedoch unterschieden zwischen gekrümmten Trägern mit planmäßiger Krümmung und geraden Trägern mit planmäßiger Überhöhung. Der planmäßig gekrümmte Träger weist auch bei planmäßiger Belastung eine architektonisch/tragwerksplanerische gewollte Krümmung auf. Der gerade, planmäßig überhöhte Träger weist i.d.R. bei planmäßiger Belastung keine Krümmung mehr auf.

Nach DIN 1052:2004 dürfen in unverstärkten Trägerbereichen mit planmäßiger Querkraftbeanspruchung (z.B. in gekrümmten Trägern) keine Durchbrüche angeordnet werden; prEN 1995-1-1:2003

fordert für Durchbrüche in gekrümmten Trägern einen speziellen, nicht weiter spezifizierten Nachweis. Während bei der Bemessung ohne Durchbrüche die Querkzugspannungen in planmäßig überhöhten (sehr schwach gekrümmten) Trägern im allgemeinen vernachlässigt werden, stellt sich die Frage wie der Tragwerksplaner bei Durchbrüchen in planmäßig überhöhten Trägern zu verfahren hat. Nachfolgend wird dargelegt, daß sich Durchbrüche in beliebig überhöhten/gekrümmten Trägern mit einfachen Beziehungen berechnen lassen und die zusätzliche Berücksichtigung der Krümmung keinen wesentlichen Mehraufwand für den Nachweis bedeutet.

6.4.1 Spannungen rechtwinklig zur Faserrichtung zufolge reiner Momentenbeanspruchung

Betrachtet man den Sachverhalt bei gekrümmten Trägern, so treten bei einer reinen Momentenbeanspruchung Biegespannungen und Querkzugspannungen auf (Bild 34b, Beilage 45).

Da sich die Biegespannungsverteilung im undurchbrochenen Trägerbereich mit zunehmender Trägerkrümmung im Krümmungsbereich $0 \leq h/r_m \leq 0,2$ kaum ändert, kann der maximale Spannungsanteil σ_y aus den umgelenkten Biegespannungen ebenfalls mit Gl. (9) berechnet werden.

Im Gegensatz zur Biegespannungsverteilung hängt die Zugspannungsverteilung rechtwinklig zur Faserrichtung, wie bekannt, empfindlich von der Trägerkrümmung h/r_m ab

$$\sigma_{y,\max} = 0,25 \frac{M}{W} \frac{h}{r_m} \quad (13)$$

und muß bei der Ermittlung der maximalen Zugspannung σ_y am Durchbruch in einem gekrümmten Träger mit berücksichtigt werden.

Der Maximalwert der Zugspannung rechtwinklig zur Faserrichtung läßt sich in guter Näherung mit folgender aus FE-Parameterstudien abgeleiteten Formel ausdrücken:

$$\sigma_{y,\max,M} = \frac{M}{W} \left(0,43 \frac{h}{r_m} + 0,1 \frac{d}{h} \right). \quad (14)$$

Der erste Term in der Klammer der Gl. (14) entspricht hierbei dem Anteil der Zugspannungen rechtwinklig zur Faserrichtung, welcher von der Trägerkrümmung abhängt; der zweite Term in der Klammer entspricht dem Anteil aus den Biegespannungen (vgl. Gl. (9)), welcher von der Trägerkrümmung unabhängig ist.

Der Fehler zwischen den FE-berechneten maximalen Spannungen und den Spannungswerten nach

Gl. (14) beträgt im Mittel 2,8% (Tabelle 25, Beilage 46).

Ein Vergleich der Beziehungen (9) und (13) mit Gleichung (14) zeigt, daß die maximale Querspannung am Durchbruchrand eines gekrümmten Trägers nur sehr unzureichend durch eine reine Superposition der Maximalwerte für den geraden Träger mit Durchbruch und den gekrümmten Träger ohne Durchbruch angenähert wird.

Die Spannungsverteilung rechtwinklig zur Faserrichtung σ_y in der Umgebung des Durchbruchs in einem gekrümmten Träger unter reiner Momentenbeanspruchung ist in Bild 36a, Beilage 48, gezeigt.

6.4.2 Spannungen rechtwinklig zur Faserrichtung zufolge fiktiv reiner Querkraftbeanspruchung

Bei gekrümmten Trägern (Krümmungsbereich $0 \leq h/r_m \leq 0,2$) mit einer fiktiv reinen Querkraftbeanspruchung liegt eine Schubspannungsverteilung im Träger vor, die sich nur geringfügig von der Schubspannungsverteilung eines geraden Trägers unterscheidet. Für die Berechnung des Maximalwertes der Zugspannung rechtwinklig zur Faserrichtung für gekrümmte durchbrochene Träger unter fiktiv reiner Querkraftbeanspruchung kann daher Gl. (10) verwendet werden.

6.4.3 Spannungen rechtwinklig zur Faserrichtung zufolge kombinierter M/V-Beanspruchung

Bei einer kombinierten M/V-Beanspruchung in gekrümmten durchbrochenen Trägern läßt sich das Spannungsmaximum $\sigma_{y,max,M/V}$ ebenfalls wie in Kap. 6.3.3 berechnen (Tabelle 24, Beilage 46). Der Fehler der so erhaltenen Spannung beträgt im Mittel weniger als 2,3% (Tabelle 25, Beilage 46).

7 Weibull-Theorie basiertes Bemessungsmodell

7.1 Allgemeines

Ein Bemessungsmodell, welches die methodisch bedingten Defizite der Bemessungsansätze nach DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 geeignet überwindet, muß, wie experimentell nachgewiesen, den folgenden Einflußgrößen Rechnung tragen:

- absolute Bauteilgröße
- relative Durchbruchgröße
- Momenten/Querkraft-Verhältnis
- ggf. Trägerkrümmung.

Eingehende rechnerische Untersuchungen zeigten, daß die Anpassung der Weibull-Theorie [Wei1939] für defektbehaftete spröde Materialien auf das vorliegende Problem einen sehr zutreffenden Ansatz darstellt. Die Weibull-Theorie ist allgemein gut geeignet die Versagenswahrscheinlichkeit von Bauteilen unterschiedlicher Größe mit inhomogen Spannungsverteilungen abzubilden. Die Anwendung der Weibull-Theorie auf Holz und Brettschichtholz insbesondere für Beanspruchungen rechtwinklig zur Faserrichtung bei gekrümmten und satteldachförmigen BSH-Trägern geht auf die Arbeiten von Barrett [Bar1974] und Barrett et al. [Bar1975] zurück, vgl. auch [Dil2004], Aicher und Dill-Langer [Aic2005]. Ein Vorteil des Weibull-Konzepts insbesondere im Vergleich zu linear bruchmechanischen Ansätzen liegt darin, daß der Größeneinfluß in einer abgeschwächten, jedoch mechanisch plausiblen Weise berücksichtigt werden kann.

7.2 Abriß der Weibull-Theorie

Für die Versagenswahrscheinlichkeit F bzw. für die Überlebenswahrscheinlichkeit S eines Prüfkörpers mit beliebiger Spannungsverteilung im Volumen⁶ Ω gilt:

$$F = 1 - S = 1 - e^{-\int_{\Omega} f(\sigma) d\Omega} \quad (15)$$

Für die Funktion der Spannungsverteilung $f(\sigma)$ gilt nach Weibull im Rahmen der einfacher handhabbaren 2parametrischen Näherung

⁶ Die Bezeichnung Ω für das Volumen erfolgte zur Vermeidung von Verwechslungen, da die Querkraft bereits mit der Bezeichnung V belegt wurde.

$$f(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m, \quad (16)$$

mit

m = Weibull-Exponent, σ_0 = Skalierungsparameter

Die Versagenswahrscheinlichkeit des Volumens Ω ergibt sich sodann zu

$$F = 1 - e^{-\int_{\Omega} \left(\frac{\sigma(x,y,z)}{\sigma_0} \right)^m d\Omega}. \quad (17)$$

Um die Schadensrelevanz unterschiedlicher Spannungsverteilungen miteinander vergleichen zu können, wird die sog. Weibull-Spannung eingeführt

$$\sigma_{\text{wei}} = \left(\frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \sigma^m(x,y,z) d\Omega \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (18)$$

Die Weibull-Spannung repräsentiert einen konstanten Vergleichsspannungswert der zur gleichen Versagenswahrscheinlichkeit des beanspruchten Volumens führt wie die tatsächlich vorhandene inhomogene Spannungsverteilung.

Das Verhältnis k_{dis} zwischen einem prinzipiell beliebigen Bezugswert der inhomogenen Spannungsverteilung (z.B. des Höchstwertes σ_{max}) und der Weibull-Spannung

$$k_{\text{dis}} = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_{\text{wei}}} \quad (19)$$

charakterisiert den Grad der Inhomogenität der Spannungsverteilung. Mit den Gln. (15) und (19) ergibt sich das Verhältnis der Spannungen bzw. Festigkeiten (σ_{max}) zweier Strukturen 1 und 2 zu

$$\frac{\sigma_{\text{max},2}}{\sigma_{\text{max},1}} = \frac{k_{\text{dis},2}}{k_{\text{dis},1}} \left(\frac{\Omega_1}{\Omega_2} \right)^{1/m}. \quad (20)$$

7.3 Gegenüberstellung Referenzprüfkörper – Durchbruch

Die in den Normen DIN 1052:2004 und DIN EN 1194 angegebene charakteristische Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung wird gemäß EN 408:2004 im einachsigen Zugversuch an einem prismatischen Referenzprüfkörper mit einem Volumen von $\Omega = 0,01 \text{ m}^3$ ermittelt. Dabei wird die „scheinbare“ Zugfestigkeit wie allgemein üblich aus dem Quotienten von Bruchlast und Quer-

schnittsfläche berechnet, d.h. es wird davon ausgegangen, daß die Spannungsverteilung im Querschnitt konstant ist. Die tatsächliche Spannungsverteilung im BSH-Querschnitt ist jedoch zufolge der zylindrischen Anisotropie der Brettlamellen nicht konstant, sondern verläuft entlang der Querschnittsbreite sehr inhomogen (Aicher und Dill Langer [Aic1996], Aicher et. al [Aic2001b]). In Bild 37a, Beilage 49, ist die Spannungsverteilung rechtwinklig zur Faserrichtung im Referenzprüfkörper schematisch dargestellt. Der Wert der Zugfestigkeit entspricht somit einem fiktiven konstanten Spannungswert im Querschnitt (auch Weibull-Spannung genannt), der die gleiche Versagenswahrscheinlichkeit aufweist wie die tatsächlich vorhandene Spannungsverteilung.

Die räumlich inhomogene Zugspannungsverteilung rechtwinklig zur Faserrichtung am Durchbruch weist in Richtung der Querschnittsbreite näherungsweise dieselbe Inhomogenität auf, wie diejenige des prismatischen Referenzprüfkörpers. Zufällige Abweichungen zwischen den Lamellenaufbauten der Querschnitte der Bauteile gegenüber den Querschnitten der Referenzprüfkörper erhöhen die Streuungen der vorhersagbaren Traglasten. Abweichend vom Referenzprüfkörper ist im vorliegenden Fall die zusätzliche Inhomogenität der Spannungen in Trägerlängs- und -höhenrichtung. In Bild 37b, Beilage 49, ist die inhomogene Spannungsverteilung am Durchbruch entlang des höchstbeanspruchten Pfades schematisch dargestellt. Da der Einfluß der Inhomogenität in Richtung der Querschnittsbreite des Trägers bereits in der Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung enthalten ist, genügt es für die Durchbruchsbemessung ausschließlich die inhomogene Spannungsverteilung in Trägerlängs- und -höhenrichtung zu berücksichtigen.

7.4 Schädigungsrelevanter Integrationsbereich am Durchbruch

7.4.1 Allgemeines

Der Bereich innerhalb dessen die Weibull-Spannung (Gl.(18))

$$\sigma_{\text{wei}} = \left(\frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \sigma^m(x, y, z) d\Omega \right)^{\frac{1}{m}}$$

einer Spannungskomponente zu ermitteln ist, kann je nach Dimensionalität des Problems ein Volumen, eine Fläche oder eine Linie darstellen. Bei einer Reihe von Problemstellungen folgt der zu integrierende Bereich der Spannungsverteilung aus der äußeren Geometrie der Proben bzw. Bauteile. Ein Beispiel hierfür ist die inhomogene Verteilung der Spannung rechtwinklig zur Faserrichtung über die Trägerhöhe bei gekrümmten Trägern mit Integration über die gesamte Höhe. Im

Fall von Durchbrüchen in Biegeträgern ist der Integrationsbereich jedoch nicht mehr offensichtlich. Außer dem Durchbruchrand ist zunächst keine eindeutige Begrenzung vorhanden. Zur Festlegung eines bemessungsrelevant korrekten Integrationsbereichs wurden daher folgende Überlegungen angestellt.

Der Einfluß des Integrationsbereichs auf die Weibull-Spannung wird anhand der Verteilung der Spannungskomponente $\sigma_y(s)$ entlang des höchstbeanspruchten horizontalen Pfades s am Durchbruchrand untersucht. Bild 38a, Beilage 50, zeigt für einen exemplarisch betrachteten Fall die inhomogene Spannungsverteilung $\sigma_y(s)$ mit dem Maximum $\sigma_{y,max}$ am Durchbruchrand. Wie ersichtlich, fällt die Spannung anfänglich sehr schnell ab und nähert sich ab einer Länge von $s \approx 200$ mm einem Wert von näherungsweise Null an.

In Bild 38b, Beilage 50, sind der Mittelwert der inhomogenen Spannungsverteilung $\sigma_{y,mean}$, die Weibull-Spannung σ_{wei} und der Formbeiwert k_{dis} jeweils in Abhängigkeit von der Integrationslänge aufgetragen. Im Rahmen der Weibull-Integration wurde der übliche Weibull-Exponent $m = 5$ gemäß EN 1995-1-1:2004 verwendet.

Die Weibull-Spannung nach Gl.(18), die für eine infinitesimal kleine Integrationslänge mit dem Mittelwert übereinstimmt - hier in unmittelbarer Nähe des Durchbruchrandes - weist mit zunehmender Integrationslänge einen deutlichen Unterschied gegenüber dem Mittelwert auf. Im Gegensatz zum Mittelwert, bei dem alle Werte gleich gewichtet sind, werden bei der Weibull-Spannung (vorausgesetzt: $m > 1$) die höheren Werte stärker gewichtet. Somit liegt die Weibull-Spannung über der Mittelwerts-Spannung. Der k_{dis} -Wert nach Gl. (19) verläuft genau entgegengesetzt zur Weibull-Spannung. Beginnend mit $k_{dis} = 1$ steigt er mit zunehmender Integrationslänge stetig an.

Vergleicht man einen Körper mit inhomogener Spannungsverteilung mit einem Referenzprüfkörper der Länge s_{ref} und einer konstanten Spannung über die Länge ($k_{dis,ref} = 1$), so ergibt sich das Verhältnis zwischen der maximalen Spannung der inhomogenen Spannungsverteilung und der konstanten Spannung des Referenzprüfkörpers bei gleicher Versagenswahrscheinlichkeit F zu:

$$\frac{\sigma_{y,max}(F)}{\sigma_{ref}(F)} = \frac{k_{dis}}{k_{dis,ref}} \left(\frac{s_{ref}}{s} \right)^{1/m} = k_{dis} \left(\frac{250}{s} \right)^{1/5} . \quad (21)$$

In dem Beispiel wurde $s_{ref} = 250$ mm genauso lang gewählt, wie der betrachtete Ausschnitt der in Bild 38a, Beilage 50, dargestellten Spannungsverteilung. Gleichung (21) ist in Abhängigkeit von der Integrationslänge in Bild 38c, Beilage 50, angegeben. Die Kurve zeigt, daß sich das Verhältnis

für sehr kurze Integrationslängen stark verändert, sich aber relativ schnell einem konstanten Wert annähert. In dem gewählten Beispiel bleibt der Wert ab einer Integrationslänge von 40 mm konstant. Betrachtet man die zugehörige Spannungsverteilung in Bild 38a, Beilage 50, so erkennt man, daß bei der Länge $s = 40$ mm der σ_y -Wert immer noch ca. 40% des Maximalwertes entspricht. Das gewählte Beispiel zeigt, daß sich das Verhältnis $\sigma_{y,\max}(F)/\sigma_{\text{ref}}(F)$ zweier Körper bei Forderung gleicher Versagenswahrscheinlichkeit ab einer bestimmten Integrationslänge, ausgehend vom Maximalwert entlang des Spannungsabfalls, einem konstanten Wert annähert. Spannungswerte, die bezogen auf den Maximalwert der Spannungsverteilung sehr niedrig sind oder sich gar dem Wert Null annähern, haben keinen Einfluß mehr auf den Verhältniswert.

Die Wahl der relevanten Integrationslänge bzw. allgemein des Integrationsbereichs hängt von der Form der inhomogenen Spannungsverteilung, der Größe des beanspruchten Bereiches und von der Größe des Weibull-Exponenten ab. Bei der Festlegung der Integrationsgrenzen des schädigungsrelevanten Bereichs ist folgendes zu beachten:

- Der Integrationsbereich muß den Bereich der maximalen Spannungen einschließen.
- Treten mehrere Spannungskonzentrationen mit unterschiedlichen Vorzeichen auf, ist nur die schädigungsrelevante Spannungskonzentration, in diesem Fall der Bereich mit Zugspannungen, einzuschließen.
- Falls es aus geometrischen Gründen schwierig ist, einen einfachen Bereich zu bestimmen, in dem ausschließlich Spannungen eines Vorzeichens auftreten, sollten die absoluten Spannungswerte verwendet werden.
- Schließt der Integrationsbereich Bereiche ein, deren Werte im Vergleich zum Maximalwert sehr klein oder Null sind, führt dies gemäß den Voraussetzungen der Weibull-Theorie nicht zu einer Verfälschung des Ergebnisses.

7.4.2 Bestimmung des Integrationsbereiches am Durchbruch

Für die Festlegung des Integrationsbereichs am runden Durchbruch, innerhalb dessen die Weibull-Spannung für die inhomogene Spannungsverteilung rechtwinklig zur Faserrichtung zu ermitteln ist, werden im folgenden die in Kap. 6 vorgestellten Formeln verwendet.

In Kap. 6 wurde gezeigt, daß die Form des Spannungsfeldes in der Durchbruchumgebung von der Beanspruchungskombination der am Durchbruch angreifenden Schnittkräfte abhängt. Betrachtet man zunächst die Beanspruchungen Moment bzw. Querkraft einzeln, so erhält man jeweils eine

symmetrische Spannungsverteilung am Durchbruch, wobei die Spannungen entlang des Durchbruchs bei der Momentenbeanspruchung in insgesamt sechs und bei der Querkraftbeanspruchung in insgesamt vier abwechselnd positive und negative Bereiche gegliedert sind (vgl. Bild 35a und Bild 36a, Beilagen 47 und 48).

Die Bereiche mit den höchsten Querkzugspannungen finden sich bei beiden Beanspruchungsarten im selben Quadranten des Durchbruchs. Dies ist in Bild 39a, b, Beilage 51, mit der zusätzlichen Kennzeichnung des höchstbeanspruchten Pfades dargestellt. Bei reiner Momentenbeanspruchung befindet sich der höchstbeanspruchte Pfad mit dem Spannungsmaximum bei $\varphi_M = 60^\circ$ und bei der „reiner“ Querkraftbeanspruchung bei $\varphi_V = 40^\circ$. Die Abklinglängen der Spannungsverteilungen am höchstbeanspruchten Pfad hängen ausschließlich vom Durchbruchsdurchmesser d bzw. von der relativen Durchbruchgröße d/h ab und betragen

- bei Momentenbeanspruchung: $l_{\text{dis},M} = 0,45 d$ und (22)

- bei Querkraftbeanspruchung: $l_{\text{dis},V} = 2 d (1 - d/h)$. (23)

Im Falle einer kombinierten Moment/Querkraftbeanspruchung überlagern sich die beiden Querkzug-Spannungsfelder infolge Moment und Querkraft im betrachteten Quadranten. Die (Winkel-) Position und die Abklinglänge des höchstbeanspruchten Pfades liegen hierbei mit

$$\varphi_V < \varphi_{M/V} < \varphi_M \text{ und } l_{\text{dis},M} < l_{\text{dis},M/V} < l_{\text{dis},V}$$

jeweils zwischen den Werten der beiden Einzelbeanspruchungen.

Wie vorstehend erläutert, gilt für die Wahl des Integrationsbereiches zur Berechnung der Weibull-Spannung einer inhomogenen Spannungsverteilung, daß der Bereich der maximalen Spannungen eingeschlossen ist und Bereiche nichtrelevanter Spannungskonzentrationen hier Querdruckspannungen ausgeschlossen werden. Aufgrund der Tatsache, daß die höchstbeanspruchten Pfade im Extremfall nur um einen Winkel von 20° auseinander liegen, läßt sich im Fall von runden Durchbrüchen ein konstanter Integrationsbereich festlegen, der die höchstbeanspruchten Pfade beider Einzelbeanspruchungen beinhaltet und somit auch den höchstbeanspruchten Pfad jeder beliebigen kombinierten Moment/Querkraftbeanspruchung. Um den Bereich hoher Querkzugspannungen für die beiden Einzelbeanspruchungen ausreichend einzuschließen wurde der Integrationsbereich in y -Richtung durch die horizontalen Linien, ausgehend vom Durchbruchsrand bei $\varphi_1 = 20^\circ$ und $\varphi_2 = 80^\circ$ begrenzt. Somit ist auch der Bereich der Druckspannungen bei der reinen Momentenbeanspruchung zwischen $\varphi = 0^\circ$ bis ca. 20° ausgeschlossen. Die noch verbleibenden Begrenzungslinien des

Integrationsbereichs bilden der Durchbruchrand und eine Linie im Abstand ℓ parallel zum Durchbruchrand. Basierend auf Vergleichsrechnungen wurde der Abstand ℓ auf $d/2$ festgelegt. Der vom Integrationsbereich A eingeschlossene Spannungsbereich der beiden Einzelbeanspruchungen ist in Bild 40b, c, Beilage 51, angegeben. Der Integrationsbereich A beträgt somit

$$A = 0,5 d (\cos(20^\circ) d/2 - \cos(80^\circ) d/2) = 0,1915 d^2. \quad (24)$$

Der gewählte Integrationsbereich A ist unabhängig von der Beanspruchungsart und hängt ausschließlich vom Durchbruchdurchmesser ab. Der Integrationsbereich ist gleichermaßen für gerade und gekrümmte Träger (bis zu einer Krümmung von $h/r_m \leq 0,1$) geeignet.

7.4.3 Bestimmung der Formbeiwerte k_{dis}

Nach der Festlegung des Integrationsbereichs kann die Weibull-Spannung σ_{wei} nach Gl. (18) und damit der Formbeiwert k_{dis} nach Gl. (19) der innerhalb der Integrationsgrenzen liegenden Spannungsverteilung ermittelt werden. Es ist darauf hinzuweisen, daß der Formbeiwert k_{dis} direkt vom gewählten Integrationsbereich abhängt, d.h. bei anderen Integrationsbereichen ergeben sich andere k_{dis} -Werte. In Tabelle 26, Beilage 53, sind die k_{dis} -Werte für den Integrationsbereich gemäß Gl. (24) angegeben. Für die Ermittlung des k_{dis} -Wertes zwischen den angegebenen M/V-Verhältnissen kann linear interpoliert werden. Eine graphische Darstellung der k_{dis} -Werte in Abhängigkeit von der Trägerkrümmung ist in Bild 41, Beilage 53, angegeben.

Im Rahmen einer Parameterstudie wurde die Veränderlichkeit des k_{dis} -Wertes in Abhängigkeit von verschiedenen M/V- und d/h-Verhältnissen untersucht. Es zeigte sich, daß sich der k_{dis} -Wert bei einer Variation des d/h-Verhältnisses von $d/h = 0,1$ bis $0,4$ nur geringfügig ändert ($< 2\%$); dieser Einfluß wird im folgenden nicht weiter berücksichtigt. Im Gegensatz dazu liegt eine zu berücksichtigende Abhängigkeit des k_{dis} -Wertes vom M/V-Verhältnis und von der Trägerkrümmung h/r_m vor.

7.5 Bemessungsmodell

7.5.1 Einwirkungsseite

Die Einwirkungen werden durch die in Kap. 6 eingeführten Gleichungen zur Berechnung der Maximalwerte der Zugspannungen rechtwinklig zur Faserrichtung am Durchbruchrand beschrieben.

Anmerkung: Die Spannungen $\sigma_{t,90}$, $\sigma_{t,90,V}$ und $\sigma_{t,90,M}$ sowie die Schnittgrößen M und V sind im letzten Bemessungsansatz die Bemessungswerte der Spannungen und Schnittgrößen und so dann mit den endständigen tiefgestellten Index d bezeichnet (z. B. $\sigma_{t,90,d}$, V_d). Da die Kalibrierfaktoren für das Bemessungsmodell aus den charakteristischen Einwirkungen abgeleitet werden (z. B. $\sigma_{t,90,k}$, V_k) wurde nachstehend auf die Angabe von Subskripten d oder k abgesehen.) Es gilt:

$$\sigma_{t,90} = (\sigma_{t,90,V} + \sigma_{t,90,M}) \chi_{M/V} \quad (25)$$

mit

$$\sigma_{t,90,M} = \frac{M}{W} \left(0,43 \frac{h}{r_m} + 0,1 \frac{d}{h} \right) \quad (26)$$

$$\sigma_{t,90,V} = \frac{3}{2} \frac{V}{bh} \left(1,23 + 0,82 \frac{d}{h} \right) \quad (27)$$

$$\chi_{M/V} = \begin{cases} 0,9 & \text{für kombinierte M/V-Beanspruchung} \\ 1 & \text{für reine M-Beanspruchung} \end{cases} \quad (28)$$

Die Schnittgrößen M und V sind jeweils auf den Durchbruchmittelpunkt bezogen. Die Fehlerbandbreite der Spannungen zufolge der angegebenen Gleichungen ist für gerade und gekrümmte Träger in Tabelle 25, Beilage 46, angegeben.

7.5.2 Widerstandsseite

Die Bestimmung der effektiven Querkzugfestigkeit $f_{t,90,eff}$ am Durchbruch in Abhängigkeit von der Spannungsverteilung und der Größe des beanspruchten Volumens erfolgt nach Gl. (20). Unter Berücksichtigung der nachstehenden Substitutionen (die Struktur 1 in Gl. (20) entspricht dem Referenz-Festigkeitsprüfkörper nach EN 408)

Struktur 1 = Referenzprüfkörper	Struktur 2
$\Omega_1 = \Omega_{\text{ref}} = 10000000 \text{ mm}^3$	$\Omega_2 = A b = 0,1915 d^2 b$ (siehe Gl. 24)
$k_{\text{dis},1} = k_{\text{dis,ref}} = 1$	$k_{\text{dis},2} = k_{\text{dis}}$ nach Tabelle 26, Beilage 53
$\sigma_{\text{max},1} = f_{t,90,k}$	

ergibt sich zunächst

$$\sigma_{\text{max},2} = f_{t,90,k} k_{\text{dis},2} \left(\frac{\Omega_{\text{ref}}}{\Omega_2} \right)^{1/m} \quad (29)$$

Mit der Umbenennung $f_{t,90,\text{eff},k} = \sigma_{\text{max},2}$, $k_{\text{dis}} = k_{\text{dis},2}$ und $\Omega = \Omega_2$ und nach Festlegung des Weibull-Exponenten für Brettschichtholz zu $m = 5$ ergibt sich die Widerstandsseite zu

$$f_{t,90,\text{eff},k} = f_{t,90,k} k_{\text{dis}} \left(\frac{\Omega_{\text{ref}}}{\Omega} \right)^{0,2} \quad (30)$$

mit

$f_{t,90,\text{eff},k}$ = effektive charakteristische BSH-Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung

$f_{t,90,k}$ = charakteristischer Wert der BSH-Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung ermittelt im Normversuch nach DIN EN 408 respektive gemäß Festlegung in DIN 1052:2004

k_{dis} = Formbeiwert der Spannungsverteilung rechtwinklig zur Faserrichtung (siehe Tabelle 26, Beilage 53)

Ω_{ref} = Bezugsvolumen von 10^7 mm^3

Ω = $0,1915 d^2 b$

d = Durchbruchdurchmesser

b = Trägerbreite.

Der Wert $f_{t,90,\text{eff},k}$ nach Gl. (30) repräsentiert die effektive charakteristische Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung am runden Durchbruch unter Berücksichtigung des Größeneinflusses und der vorliegenden Spannungsverteilung.

Im Falle der geraden Träger wurde überprüft, inwieweit sich der Modifikationsfaktor $k_{\text{dis}} (\Omega_{\text{ref}}/\Omega)^{0,2}$ der Referenzzugfestigkeit $f_{t,90,k}$ basierend auf dem in Kap. 7.4.2 definierten Integrationsbereich A (Gl. 24), von demjenigen unterscheidet, bei dem der Integrationsbereich individuell an die entsprechenden Beanspruchungsarten angepaßt wurde. Dafür wurde für die reine Momentenbeanspruchung außerdem der Integrationsbereich mit den Begrenzungslinien in y-Richtung bei $\varphi_1 = 40^\circ$ und $\varphi_2 = 80^\circ$ und für die „reine“ Querkraftbeanspruchung der Integrationsbereich mit den Begrenzungslinien bei $\varphi_1 = 20^\circ$ und $\varphi_2 = 60^\circ$ untersucht. Der Parameter ℓ (vgl. Bild 40a, Beilage 51) wurde jeweils bei 0,5 d belassen. Es zeigte sich, daß die Ergebnisse zufolge der individuellen Integrationsbereiche nur um ca. 1% von denjenigen des Integrationsbereichs A abweichen. Weitere Untersuchungen, bei denen der Parameter ℓ des Integrationsbereichs A von 0,5 d auf 1,0 d unter Konstanthaltung der horizontalen Begrenzungen erhöht wurde, zeigten keine Änderung der Ergebnisse.

7.5.3 Nachweis

Der Nachweis der Zugspannungen rechtwinklig zur Faserrichtung am runden Durchbruch unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite und nach Einführung eines Kalibrierfaktors c zur Anpassung an die experimentelle Datenbasis lautet:

$$\frac{\sigma_{t,90,d}}{f_{t,90,d} k_{\text{dis}} c \left(\frac{\Omega_{\text{ref}}}{\Omega} \right)^{0,2}} \leq 1 \quad (31)$$

7.6 Kalibrierung des Weibull-basierten Bemessungsmodells anhand der Versuchsergebnisse

Zur Kalibrierung des Bemessungsmodells werden nachfolgend die nach dem Weibull-basierten Bemessungsansatz vorhergesagten Traglasten mit den Versuchsergebnissen (siehe Kap. 4.3.3) verglichen. Dem Vergleich werden einerseits die Durchrißlasten und andererseits die Höchstlasten zugrundegelegt.

7.6.1 Diskussion: unkalibrierte Bemessungsergebnisse – experimentelle Durchrißlasten

In Bild 42 bis Bild 44, Beilage 54 bis Beilage 56, sind die experimentellen Durchrißlasten und die rechnerischen charakteristischen Querkrafttragfähigkeiten graphisch dargestellt. Im einzelnen zeigt Bild 42, Beilage 54, die Querkrafttragfähigkeit in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße; in Bild 43, Beilage 55, ist die Abhängigkeit vom M/V-Verhältnis dargestellt und Bild 44, Beilage 56, zeigt die Abhängigkeit von der bezogenen Tragwerkkrümmung. In jedem Diagramm sind bezüglich der experimentellen Ergebnisse die Mittelwerte, die 5%-Fraktilenwerte ($x_{5, konst}$) und die Einzelergebnisse der jeweiligen Testserien angegeben. Den rechnerischen Ergebnissen liegt für die in den experimentellen Untersuchungen ausschließlich verwendete BSH-Festigkeitsklasse GL 32h (BS 16h) die charakteristische Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung $f_{t,90,k} = 0,5 \text{ N/mm}^2$ zugrunde. Der angesetzte $f_{t,90,k}$ -Wert entspricht infolge der betrachteten BSH-Festigkeitsklassen GL 32h/BS16h sowohl DIN 1052:2004 als auch DIN EN 1194, die sich bei anderen BSH-Festigkeitsklassen bezüglich des Wertes $f_{t,90,k}$ teilweise erheblich voneinander unterscheiden.

Tabelle, Beilage 44, enthält eine tabellarische Gegenüberstellung der experimentellen und rechnerischen Ergebnisse.

Bild 42, Beilage 54, zeigt, daß die Abhängigkeit der Tragfähigkeiten vom d/h-Verhältnis für die Versuchsserien beider Trägerhöhen durch das Bemessungsmodell sehr gut wiedergegeben wird. Die experimentelle Tragfähigkeit reduziert sich bei einer Vergrößerung des d/h-Verhältnisses von $d/h = 0,2$ auf $d/h = 0,4$ bei einem Schnittkraftverhältnis am Durchbruch von $M/V = 1,5h$ bei den Testseriengruppen 450_1.5h_d/h und 900_1.5h_d/h um 38% bzw. 35%, d.h. im Mittel um 36,5%. Bei der Testseriengruppe 900_5h_d/h mit dem Schnittkraftverhältnis $M/V = 5h$ reduziert sich die Tragfähigkeit um 42%. Im Vergleich dazu ergeben sich für die Tragfähigkeitsreduzierung zufolge des Bemessungsmodells für $M/V = 1,5h$ und $M/V = 5h$ Werte von 36% bzw. 42%.

Der Sachverhalt, daß die Übereinstimmung für beide untersuchten Trägergrößen näherungsweise gleich gut ist, belegt, daß das Bemessungsmodell den Größeneinfluß zutreffend abbildet. Das Verhältnis der Tragfähigkeiten beträgt für einen Trägerhöhenunterschied von $h_1/h_2 = 2$ zufolge des Bemessungsmodells 1,52 im Vergleich dazu betragen die experimentellen Verhältnisse 1,31 und 1,54 für die Durchriß- bzw. Höchstlasten.

Bild 43, Beilage 55, zeigt, daß die Abhängigkeit der experimentellen Tragfähigkeiten vom M/V-Verhältnis in der Tendenz mit dem Weibull-basierten Bemessungsmodell übereinstimmt. Zuzufolge

des Bemessungsmodells reduziert sich die Tragfähigkeit bei einem zunehmenden Schnittkraftverhältnis am Durchbruch von $M/V = 1,5h$ auf $M/V = 5h$ für die d/h -Verhältnisse $d/h = 0,2, 0,3$ und $0,4$ um 16% , 23% bzw. 28% . Experimentell (Tabelle 21, Beilage 41) betrug die Reduzierung der Tragfähigkeiten im Mittel 13% . Aufgrund der Tatsache, daß die Streuungen der Versuchsergebnisse größer sind als der rechnerische Effekt des untersuchten Parameters M/V , ist die quantitative Übereinstimmung nur mäßig.

Bild 44, Beilage 56, zeigt bei beiden Testserien mit unterschiedlichen Querschnittshöhen eine gut vergleichbare Abhängigkeit der Tragfähigkeiten von der Trägerkrümmung. Die Reduzierung der Tragfähigkeit bei einer Zunahme der Trägerkrümmung von $r_m/h = 0$ auf $r_m/h = 0,03$ beträgt experimentell im Mittel 26% ; zufolge des Bemessungsmodells ergibt sich im Mittel eine Tragfähigkeitsreduzierung um 17% .

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß das Weibull-basierte Bemessungsmodell die Abhängigkeit der Tragfähigkeiten von den wesentlichen Einflußparametern, wie Größeneinfluß, relative Durchbruchgröße, Moment/Querkraft-Verhältnis und Trägerkrümmung zufriedenstellend wieder gibt.

Die berechneten unkalibrierten charakteristischen Tragfähigkeiten stimmen gut mit den experimentellen 5%-Fraktilewerten der Durchrißlasten überein. Das mittlere Verhältnis (\pm Standardabweichung) der Rechenwerte zu den experimentellen Ergebnissen der 13 Testserien beträgt $0,95 \pm 0,13$. Die mittlere absolute Abweichung liegt bei 11% .

Bei 10 von 13 Testserien liegen die rechnerischen Werte niedriger bzw. auf gleicher Höhe wie die experimentellen charakteristischen Tragfähigkeiten.

7.6.2 Diskussion: kalibrierte Bemessungsergebnisse – experimentelle Durchrißlasten

Die Übereinstimmung der berechneten charakteristischen Tragfähigkeiten des Bemessungsmodells mit den experimentellen Ergebnissen läßt sich durch die Einführung eines skalaren Kalibrierfaktors c noch verbessern. Mittels der Methode der Minimierung der Fehlerquadrate zwischen den berechneten und den experimentellen charakteristischen Werten aller Testserien gemäß

$$\sum_{\text{alle Serien}} \left(\frac{V_{\text{Versuch,Serie}} - (V_{\text{Bemessung}} c)}{V_{\text{Versuch,Serie}}} \right)^2 \Rightarrow \text{Minimum} \quad (32)$$

ergibt sich ein skalarer Kalibrierfaktor von $c = 1,03$. Die um den Kalibrierfaktor c korrigierten rechnerischen charakteristischen Tragfähigkeiten sind ebenfalls in Bild 42 bis Bild 44, Beilage 54 bis Beilage 56, eingetragen (gestrichelte Linien). Das mittlere Verhältnis der berechneten zu den experimentellen charakteristischen Tragfähigkeiten aller Testserien liegt nun bei $0,98 \pm 0,15$. Die mittlere absolute Abweichung beträgt 10%.

Bei 9 von 13 Testserien liegen die berechneten kalibrierten Ergebnisse niedriger bzw. auf gleicher Höhe wie die experimentellen charakteristischen Tragfähigkeiten.

7.6.3 Diskussion: unkalibrierte Bemessungsergebnisse – experimentelle Höchstlasten

In Bild 45 bis Bild 47, Beilage 57 bis Beilage 59, sind die experimentellen Höchstlasten und die rechnerischen charakteristischen Querkrafttragfähigkeiten graphisch dargestellt. Im einzelnen zeigt Bild 45, Beilage 57, die Querkrafttragfähigkeiten in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße; in Bild 46, Beilage 58, ist die Abhängigkeit vom M/V-Verhältnis dargestellt und Bild 47, Beilage 59, zeigt die Abhängigkeit von der bezogenen Trägerkrümmung. In jedem Diagramm sind bezüglich der experimentellen Ergebnisse die Mittelwerte, die 5%-Fraktilenwerte ($x_{5,konst}$) und die Einzelergebnisse der jeweiligen Testserien angegeben. Tabelle, Beilage 44, enthält eine tabellarische Gegenüberstellung der experimentellen und rechnerischen Ergebnisse.

Die Diagramme veranschaulichen, daß die experimentellen charakteristischen Querkrafttragfähigkeiten basierend auf den Höchstlasten durchweg deutlich über den rechnerischen charakteristischen Querkrafttragfähigkeiten liegen. Das mittlere Verhältnis (\pm Standardabweichung) der rechnerischen zu den experimentellen charakteristischen Tragfähigkeiten aller Testserien beträgt $0,68 \pm 0,07$. Die mittlere absolute Abweichung liegt bei 32%.

7.6.4 Diskussion: kalibrierte Bemessungsergebnisse – experimentelle Höchstlasten

Der skalare Kalibrierfaktor c zur Anpassung der rechnerischen charakteristischen Tragfähigkeiten an die experimentellen charakteristischen Höchstlasten ergibt sich zu 1,45. Die um den Kalibrierfaktor c korrigierten rechnerischen charakteristischen Tragfähigkeiten sind ebenfalls in Bild 45 bis Bild 47, Beilage 57 bis Beilage 59, eingetragen. Das mittlere Verhältnis der rechnerischen zu den experimentellen charakteristischen Tragfähigkeiten aller Testserien beträgt $0,99 \pm 0,10$. Die mittlere absolute Abweichung liegt bei 8%.

Tabelle, Beilage 44, enthält eine tabellarische Gegenüberstellung der rechnerischen und der experimentellen Ergebnisse.

Bild 45, Beilage 57, zeigt, daß die Abhängigkeit der Höchstlast-basierten Tragfähigkeiten (= Traglasten) vom d/h -Verhältnis für die Versuchsserien beider Trägerhöhen durch das kalibrierte Bemessungsmodell sehr gut wiedergegeben wird. Die experimentelle Traglast reduziert sich bei einer Vergrößerung des d/h -Verhältnisses von $d/h = 0,2$ auf $d/h = 0,4$ bei einem Schnittkraftverhältnis von $M/V = 1,5h$ bei den Testseriengruppen 450_1.5h_d/h und 900_1.5h_d/h um 37% bzw. 31%, d.h. im Mittel um 34%. Die Tragfähigkeitsreduzierung zufolge des Bemessungsmodells beträgt in sehr guter Übereinstimmung 36%. Bei der Testseriengruppe 900_5h_d/h mit dem Schnittkraftverhältnis von $M/V = 5h$ beträgt die experimentelle Traglastabnahme 32%, während die Tragfähigkeitsreduzierung des Bemessungsmodells bei 42% liegt.

Bild 46, Beilage 58, zeigt die Abhängigkeit der Tragfähigkeiten vom M/V -Verhältnis. Wie im Falle der Durchrißlasten nimmt die experimentelle und die rechnerische Tragfähigkeit bei einer Zunahme des Schnittkraftverhältnisses am Durchbruch von $M/V = 1,5h$ auf $M/V = 5h$ ab. Zuzufolge des Bemessungsmodells reduziert sich die Tragfähigkeit für die d/h -Verhältnisse von 0,2, 0,3 und 0,4 um 16%, 23% bzw. 28%. Die experimentellen Ergebnisse weisen eine Abnahme in vergleichbarer Größenordnung auf (siehe Tabelle 21, Beilage 41); die verstärkte Tragfähigkeitsabnahme mit steigendem d/h -Verhältnis geht aus den Versuchsergebnissen jedoch nicht eindeutig hervor.

Bild 47, Beilage 59, zeigt bei beiden Testserien mit unterschiedlichen Querschnittshöhen eine gut vergleichbare Abhängigkeit der Tragfähigkeiten von der Trägerkrümmung. Die Reduzierung der Tragfähigkeit bei einer Zunahme der Trägerkrümmung von $r_m/h = 0$ auf $r_m/h = 0,03$ beträgt bei den Versuchen im Mittel 20%; zuzufolge des Bemessungsmodells ergibt sich eine Tragfähigkeitsreduzierung um 17%.

Der Sachverhalt, daß die Übereinstimmung zwischen den Versuchen und der Berechnung für beide Trägergrößen näherungsweise gleich gut ist, belegt, daß der Größeneinfluß gut erfaßt wird; das Verhältnis der Tragfähigkeiten für einen Trägerhöhenunterschied von $h_1/h_2 = 2$ beträgt zuzufolge des Bemessungsmodells 1,52 und nach den Versuchsergebnissen 1,54.

Bei 8 von 13 Testserien liegen die berechneten kalibrierten Ergebnisse niedriger als die experimentellen charakteristischen Tragfähigkeiten.

7.7 Gegenüberstellung von Bemessungsansätzen

Nachfolgend wird das an den Durchriß- und Höchstlasten der Bauteilversuche kalibrierte Weibull-basierte Bemessungsmodell mit den in Kap. 2 vorgestellten Bemessungsansätzen nach DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 verglichen. Die Gegenüberstellung erfolgt wie in Kap. 2.4, indem die dort beschriebenen Trägergrößen, Schnittkraftverhältnisse, relativen Durchbruchgrößen und BSH-Festigkeitsklassen betrachtet werden.

Zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeiten nach dem Weibull-basierten Bemessungsansatz wird die charakteristische Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung nach EN 1194 mit $f_{t,90,k} = 0,35$ bzw. $0,5 \text{ N/mm}^2$ für die BSH-Festigkeitsklassen GL 24c und GL 32h verwendet. Da in DIN 1052:2004 der $f_{t,90,k}$ - Wert für alle Festigkeitsklassen konstant $0,5 \text{ N/mm}^2$ beträgt, betreffen die genannten $f_{t,90,k}$ - Unterschiede ausschließlich den Vergleich mit prEN 1995-1-1:2003 (siehe unten).

Die berechneten charakteristischen Querkrafttragfähigkeiten für runde Durchbrüche sind in Bild 48 bis Bild 51, Beilage 60 bis Beilage 61, zusammengestellt, wobei die Werte für den Weibull-basierten Bemessungsansatz zum einen für die Kalibrierung an die Durchrißlasten und zum anderen für die Kalibrierung an die Höchstlasten angegeben sind. Bild 48 und Bild 49, Beilage 60, zeigen die Ergebnisse für die BSH-Festigkeitsklasse GL 24c (BS 11c) für die Trägerhöhen $h = 500 \text{ mm}$ und $h = 2000 \text{ mm}$, wobei Bild 48 die Querkrafttragfähigkeiten in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße und Bild 49 die Querkrafttragfähigkeiten in Abhängigkeit vom Schnittkraftverhältnis darstellt. Bild 50 und Bild 51, Beilage 61, veranschaulichen den vorstehenden Sachverhalt für die BSH-Festigkeitsklasse GL 32h (BS 16h). Die Berechnungen der Querkrafttragfähigkeiten in Abhängigkeit vom d/h -Verhältnis erfolgten jeweils für ein Schnittkraftverhältnis von $M/V = 3h$ und die Berechnungen der Querkrafttragfähigkeiten in Abhängigkeit vom Schnittkraftverhältnis für ein d/h -Verhältnis von $d/h = 0,3$.

Bild 52a, b und Bild 53a, b, Beilage 62, veranschaulichen den Einfluß der Trägerkrümmung auf die Tragfähigkeit anhand eines Trägers der Trägerhöhe $h = 2000 \text{ mm}$, wobei Bild 52 die Durchrißlast-kalibrierten und Bild 53 die Höchstlast-kalibrierten Tragfähigkeiten zeigt. Bild 52a und Bild 53a, Beilage 62, zeigen die Tragfähigkeiten für unterschiedlich gekrümmte Träger in Abhängigkeit vom d/h -Verhältnis während Bild 52b und Bild 53b, Beilage 62, die Tragfähigkeiten in Abhängigkeit vom M/V -Verhältnis darstellen.

Der **qualitative** Vergleich der Bemessungsansätze nach DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 mit den Weibull-basierten Tragfähigkeiten zeigt folgendes:

- Die Abhängigkeit der charakteristischen Querkrafttragfähigkeit von der relativen Durchbruchgröße d/h entspricht zufolge des Weibull-basierten Bemessungsmodells etwa derjenigen nach DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003. Nach DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 verringert sich die Tragfähigkeit bei einer Vergrößerung der relativen Durchbruchgröße von $d/h = 0,1$ nach $d/h = 0,4$ um 55% bzw. 60%. Nach dem Weibull-basierten Bemessungsansatz verringert sich die Tragfähigkeit um 60%. (Anmerkung: Nach prEN 1995-1-1:2003 weicht die d/h -Abhängigkeit bei kleinen Trägern ab, da sich bei diesen ein k_v -Wert > 1 ergeben kann, der zufolge genannter Norm nicht zulässig ist und durch 1 ersetzt werden muß.)
- Die Abhängigkeit der charakteristischen Querkrafttragfähigkeit vom Schnittkraftverhältnis M/V ist für alle drei Bemessungsansätze unterschiedlich. prEN 1995-1-1:2003 weist keine Berücksichtigung des Momenteneinflusses auf. Im Gegensatz dazu reduziert sich die Querkrafttragfähigkeit bei zunehmenden Momenteneinfluß von $M/V = 1h$ bis $5h$ nach DIN 1052:2004 um 31% und zufolge des Weibull-basierten Bemessungsmodells um 21%.
- Der Größeneinfluß wird in DIN 1052:2004 nicht berücksichtigt. Im Gegensatz dazu beinhalten der Weibull-basierte Bemessungsansatz und prEN 1995-1-1:2003 einen Größeneinfluß. Dem Bemessungsansatz nach prEN 1995-1-1:2003 liegt das Maßstabgesetz der linearen Bruchmechanik bezüglich der Querschnittshöhe zugrunde; ein Einfluß der Querschnittsbreite wird ansatzgemäß nicht berücksichtigt. Im Gegensatz hierzu beinhaltet das Weibull-basierte Bemessungsmodell einen Volumeneinfluß. Tabelle 27, Beilage 63, zeigt einen Vergleich des Größeneinflusses der betrachteten Bemessungsansätze für den Fall gleicher d/h - und M/V -Verhältnisse. Es ist ersichtlich, daß sich die Tragfähigkeiten bei einem Trägerhöhenunterschied von beispielsweise $h_1/h_2 = 2$ nach DIN 1052:2004 verdoppeln, während sie sich nach prEN 1995-1-1:2003 um den Faktor 1,41 und nach dem Weibull-basierten Bemessungsansatz um den Faktor 1,52 erhöhen.
- Der Einfluß der Trägerkrümmung wird in den Bemessungsansätzen nach DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 nicht berücksichtigt. Das Weibull-basierte Bemessungsmodell enthält die Berücksichtigung des Parameters „Trägerkrümmung“ in konsistenter Umsetzung der Weibull-basierten Querkzugbemessung gekrümmter BSH-Träger in beiden Normen. Bild 52 und Bild 53, Beilage 62, zeigen, daß die Tragfähigkeit (erwartungsgemäß) mit zunehmender Träger-

krümmung abnimmt. Weiterhin ist ersichtlich, daß die prozentuale Tragfähigkeitsreduktion außer vom d/h-Verhältnis erwartungsgemäß erheblich vom M/V-Verhältnis abhängt. Letzteres erklärt sich aus dem zunehmenden Anteil von planmäßigen Spannungen rechtwinklig zur Faserrichtung in gekrümmten Trägern, die aus der Umlenkung der Moment-abhängigen Normalkräfte parallel zur Faserrichtung resultieren.

Die **quantitative** Gegenüberstellung des Weibull-basierten Bemessungsmodells mit den Ansätzen nach DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 zeigt folgendes: (Anmerkung: Nachstehend wird ausschließlich der Fall der Festigkeitsklasse GL 32h (BS 16h) diskutiert. Dieser Fall deckt für DIN 1052:2004 und das Weibull-basierte Modell infolge des in DIN 1052:2004 in allen BSH-Festigkeitsklassen konstanten $f_{t,90,k}$ -Werts von $0,5 \text{ N/mm}^2$ alle BSH-Festigkeitsklassen ab. Für die DIN EN 1194, die in der jetzigen Fassung deutlich unterschiedliche Festigkeitswerte bei Zugbeanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung in den unterschiedlichen BSH-Festigkeitsklassen aufweist, wird seitens Deutschlands eine mit DIN 1052:2004 vergleichbare Regelung angestrebt).

- Die **Durchrißlast-kalibrierten** Querkraftfähigkeiten des Weibull-basierten Bemessungsansatzes stimmen im Falle der niedrigeren Querschnittshöhe $h = 500 \text{ mm}$ für alle d/h- und M/V-Verhältnisse mit den Ergebnissen der DIN 1052:2004-Bemessung überein. Die charakteristischen Tragfähigkeiten zufolge prEN 1995-1-1:2003 liegen bei der genannten Querschnittshöhe um den Faktor 2 bis 3 über der DIN 1052- und der Weibull-basierten Bemessung. Im Falle der sehr großen Querschnittshöhe $h = 2000 \text{ mm}$ liegen sowohl die nach prEN 1995-1-1:2003 - wie die nach DIN 1052:2004 - berechneten charakteristischen Tragfähigkeiten um das rd. 1,5 - 2,5fache über den Weibull-basierten Tragfähigkeiten.
- Die **Höchstlast-kalibrierten** Querkraftfähigkeiten des Weibull-basierten Bemessungsansatzes liegen im Falle der niedrigen Querschnittshöhe $h = 500 \text{ mm}$ für alle d/h- und M/V-Verhältnisse deutlich (1,2 - 1,4fach) über den Werten der DIN 1052- und der Durchrißlast-kalibrierten Weibull-Bemessung. Im Falle der sehr großen Querschnittshöhe $h = 2000 \text{ mm}$ liegt auch die Höchstlast-kalibrierte Querkrafttragfähigkeit des Weibull-Modells nahezu durchweg sehr deutlich unter den charakteristischen Tragfähigkeiten zufolge DIN 1052:2004 bzw. prEN 1995-1-1:2003.

7.8 Anmerkungen zum Bemessungsmodell

Folgende Empfehlungen bzw. Beschränkungen zum Bemessungsmodell werden vorgeschlagen:

- Die maximale relative Durchbruchgröße sollte $d/h = 0,4$ nicht überschreiten (dies entspricht den Bemessungsansätzen nach DIN 1052:2004 und nach prEN 1995-1-1:2003).
- Das Bemessungsmodell bezieht sich nur auf **einzelne** runde Durchbrüche. Da die gegenseitige Beeinflussung von mehreren nebeneinander liegenden Durchbrüchen von der relativen oder absoluten Durchbruchgröße abhängt, sollte in diesen Fällen ein genauere Nachweis geführt werden. Auf jeden Fall sollte zwischen den Durchbrüchen ein Abstand von mindestens dem 1,5fachen der Trägerhöhe eingehalten werden.
- Der Abstand zwischen Auflager und Durchbruch sollte mindestens das 1,5fache der Trägerhöhe betragen.
- Der Durchbruch sollte symmetrisch zur Trägerachse angeordnet werden.
- Im Falle gekrümmter Träger ist das Bemessungskonzept nur bis zu einer Trägerkrümmung von $h/r_m = 0,03$ empirisch abgesichert.

8 Zusammenfassung

8.1 Ausgangslage

Die Bemessung von Durchbrüchen in Biegeträgern aus Brettschichtholz wurde/wird in den deutschen und europäischen Normen bzw. Normentwürfen sehr unterschiedlich gehandhabt. Die deutsche Holzbaunorm DIN 1052:1988 bemisst durchbrochene Träger sehr restriktiv und begrenzt im Grunde nur die geometrischen Abmessungen. Zuzufolge dieser Norm ist nahezu jeder Durchbruch mit baupraktischer Abmessung zu verstärken. Die europäisch/deutsche Norm DIN EN 1995-1-1:1994 enthält überhaupt keine Bemessung für Durchbrüche. Bei der Überarbeitung der beiden genannten Normen wurden jeweils Bestrebungen unternommen, für Durchbrüche einen sinnvollen Bemessungsansatz mit vertretbarem Berechnungsaufwand zu integrieren.

DIN 1052:2004 und der Normentwurf prEN 1995-1-1:2003 enthalten Bemessungen für Durchbrüche, die jedoch auf grundlegend unterschiedlichen Trag-/Schädigungsmodellen beruhen. So liegt der DIN 1052:2004 ein klassischer Festigkeitsansatz zugrunde, wohingegen der vormalige, letztlich nicht umgesetzte europäische Normentwurf auf einem bruchmechanischen Versagensmo-

dell basiert. Des weiteren unterscheiden sich die beiden Bemessungsansätze hinsichtlich der unterschiedlichen Berücksichtigung wesentlicher Einflußparameter wie beispielsweise des Größeneinflusses und der Beanspruchungsart. Demzufolge zeigen Vergleichsrechnungen mit beiden Bemessungsansätzen für unterschiedliche Träger-, Durchbruchs- und Belastungskonfigurationen zum Teil erhebliche Unterschiede der rechnerischen charakteristischen Tragfähigkeiten, die für den europäischen Bemessungsvorschlag nahezu durchweg deutlich am höchsten liegen. Dieser Sachverhalt führte in Verbindung mit einer großen Diskrepanz von Vorversuchen zum berichteten Forschungsvorhaben dazu, daß die in prEN 1995-1-1:2003 enthaltene Durchbruchsbemessung aus der Schlußfassung des europäischen Normentwurfs gestrichen wurde, womit der Eurocode 5 (EN1995-1-1:2004) nunmehr keine Bemessung für Durchbrüche mehr beinhaltet.

Das Problem von Durchbrüchen in Trägern mit planmäßiger Querkzugbeanspruchung, z.B. in gekrümmten Trägern, wird in den genannten Normenwerken ebenfalls unterschiedlich behandelt. Nach DIN 1052:2004 sind Durchbrüche in Trägern mit planmäßig vorliegender Querkzugbeanspruchung unabhängig vom jeweilig vorherrschenden Querkzugspannungsniveau zu verstärken, während nach prEN 1995-1-1:2003 eine genauere, jedoch nicht spezifizierte Berechnung vorzunehmen ist.

Für die Bewertung und Kalibrierung eines Bemessungsansatzes sind generell Versuchsdaten erforderlich, die das in der Praxis vorkommende Spektrum der Einflußparameter hinreichend abdecken. Die in der Literatur veröffentlichten Versuche an durchbrochenen Biegeträgern aus Brett-schichtholz lassen sich aus mehreren Gründen nur sehr unzureichend zur Kalibrierung verwenden. Zum einen liegt jeweils nur eine sehr geringe Versuchsanzahl je geprüfter Versuchskonfiguration (ein bis zwei Versuche) vor und zum anderen decken die geprüften Konfigurationen nur eine sehr kleine Bandbreite der möglichen Träger-, Durchbruchs- und Belastungskonfigurationen ab.

Die genannten Unstimmigkeiten in den bestehenden normativen Regelungen und die deutlich unzureichende experimentelle Absicherung führten zum vorliegenden Forschungsvorhaben.

8.2 Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen umfaßten insgesamt 68 Biegeträger aus Brett-schichtholz mit runden Durchbrüchen. Alle Brett-schichtholzträger waren homogen aus maschinell sortierten Lamellen der Festigkeitsklasse C35 (MS13) aufgebaut, d.h. entsprachen nominell der BSH-

Festigkeitsklasse GL 32h (BS 16h). In 13 verschiedenen Testserien wurden systematisch die folgenden vier Parameter variiert:

- Trägerhöhe: Es wurden zwei verschiedene Trägerhöhen ($h = 450$ mm und $h = 900$ mm) untersucht, um den Größeneinfluß zu bestimmen (konstante Trägerbreite $b = 120$ mm).
- Relative Durchbruchgröße: Es wurden drei verschiedene relative Durchbruchgrößen ($d/h = 0,2; 0,3$ und $0,4$) untersucht.
- Beanspruchungsart (= Schnittkraftverhältnis M/V am Durchbruch): Es wurden zwei verschiedene Beanspruchungsarten ($M/V = 1,5$ h und $M/V = 5$ h) untersucht.
- Trägerform: Es wurden zwei verschiedene Trägerformen (gerade und gekrümmt: $h/r_m = 0$ und $0,03$) untersucht.

Im Unterschied zu den in der Literatur aufgeführten experimentellen Untersuchungen an durchbrochenen Biegeträgern wurde in der vorliegenden Arbeit durchweg auch die Schädigungsentwicklung am Durchbruch charakterisiert. Hierauf aufbauend wurden kennzeichnende Lasten – Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten – festgelegt.

Bei der überwiegenden Mehrheit der Träger ließ sich eine deutlich abgrenzbare, stufenweise Schädigungsentwicklung feststellen. Der Schädigungsbeginn (die Anrißbildung) erfolgte stets an der Durchbruchsberandung im Inneren der Querschnittsbreite b in der Nähe der Querschnittsmitte. Die Schädigung breitete sich anschließend in der Querschnittsebene zu den Querschnittsrändern $\pm b/2$ des Trägers hin aus. Zum Zeitpunkt des kompletten „Durchreißen“ des Querschnitts setzte sodann überwiegend, d.h. bei rd. 70% der Prüfkörper, ein stabiler Rißfortschritt in Trägerlängsrichtung ein. Endgültiges globales Versagen des Trägers (Höchstlast) trat ein, wenn sich der Riß ab einer bestimmten Rißlänge, sodann instabil verlaufend, bis zum Auflager fortpflanzte.

Für alle Träger wurden die zu den genannten Schädigungsstufen gehörenden kennzeichnenden Lasten dokumentiert und ausgewertet. Der Beginn der Schädigung, d.h. die Anrißlast liegt wesentlich unter den Durchriß- und Höchstlasten und ist in der globalen Last-Verschiebungskurve weder durch einen minimalen Lasteinbruch noch durch eine verringerte Steifigkeit gekennzeichnet. Im Mittel aller Prüfkörper lag die Anrißlast bei rd. 70% der Durchrißlast und bei 59% der Höchstlast.

Die extrem variierenden Verhältnisse von Durchriß- zu Höchstlasten lagen im Mittel aller 58 Träger, bei denen das Versagen durch eine vom Durchbruch ausgehende Schädigungsentwicklung

bestimmt wurde, bei $0,86 \pm 0,14$. Bei rd. 30% der Träger mit Durchbruchsversagen fiel die Durchrißlast mit der Höchstlast zusammen, d.h. unmittelbar an den Querschnittsdurchriß trat instabile Rißverlängerung bis zum Auflager und damit Versagen des Trägers auf. Bei 11 der 13 Testserien mit sehr unterschiedlichen Prüfkfigurationen und Bauteilgrößen gab es mindestens einen, häufig mehrere Prüfkörper bei dem/denen das Verhältnis von Durchriß- zu Höchstlast $\geq 0,95$ war. Bei rd. 50% aller Träger entsprach das Verhältnis von Durchriß- zu Höchstlast einem Wert von $\geq 0,9$. Bei der anderen Hälfte der Prüfkörper lag ein teilweise deutlicher Unterschied zwischen Durchriß- und Höchstlast vor; hierbei betrug das Verhältnis von Durchriß- zu Höchstlast im Mittel (\pm Standardabweichung) $0,75 \pm 0,11$. Die niedrigsten Durchriß- zu Höchstlastverhältnisse betragen rd. 0,5.

Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen repräsentieren erstmalig eine umfassende Datenbasis, die aufgrund der konsistenten Materialauswahl und einer ausreichenden Prüfkörperanzahl die realitätsnahe Kalibrierung eines Bemessungsansatzes für BSH-Träger mit runden Durchbrüchen ermöglicht.

8.3 Bemessungsansatz

Als ausschlaggebender tragfähigkeitsbestimmender Materialwiderstand für die Bemessung von runden Durchbrüchen in Brettschichtholzträgern wurde, übereinstimmend mit DIN 1052:2004, die Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung identifiziert. Hierauf aufbauend wurde in der vorliegenden Arbeit ein neuer Bemessungsansatz erarbeitet, der sich auf die probabilistische Festigkeitsbetrachtung nach Weibull für stochastisch defektbehaftete, sprödebrüchige Materialien stützt. Die Weibull-Theorie ist nachweislich gut geeignet, um die Versagenswahrscheinlichkeit zufolge inhomogener Spannungsverteilungen in unterschiedlichen Bauteilgrößen zu beschreiben. Das Weibull-Materialmodell wird international seit langem und neuerdings auch in der DIN 1052:2004 auf Holzbau-Bemessungsprobleme angewandt, bei denen Zugspannungen bzw. die Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung tragfähigkeitsbestimmend sind. So erfolgt bisher insbesondere der Nachweis der aus Umlenkkräften in gekrümmten und satteldachförmigen Brettschichtholzträgern resultierenden Zugspannungen rechtwinklig der Faserrichtung auf Basis der Weibull-Theorie. Die in der vorliegenden Arbeit umgesetzte Anwendung der Weibull-Theorie auf das Bemessungsproblem der Zugspannungen rechtwinklig zur Faserrichtung in der Durchbruchperipherie stellt letztlich die konsequente Ausweitung einer für den Nachweis von Zugspannungen rechtwinklig zur Faserrichtung für den Holzbau insgesamt geeignet erkannten Theorie dar. In diesem Sinn ermöglicht der neue Bemessungsansatz zum Beispiel auch die völlig unproblematische

Behandlung von Durchbrüchen in (schwach) gekrümmten BSH-Trägern mit planmäßiger Quersugbeanspruchung.

Es wurde gezeigt, daß sich das entwickelte Bemessungsmodell sehr gut mit einem einzigen skalaren Parameter an die beiden wesentlichen, die Tragfähigkeit der BSH-Träger charakterisierenden Lasten – die Durchrißlast und die Versagenslast – anpassen läßt. Die Anpassung des skalaren Kalibrier-Parameters an die Gesamtheit der Versuchsergebnisse erfolgte durch Minimierung der Fehlerquadratsumme zwischen rechnerischen und experimentellen Ergebnissen. Für die Anpassung des Bemessungsmodells an die charakteristischen Querschnitts-Durchrißlasten ergab sich der Kalibrierfaktor c zu 1,03. Die Übereinstimmung der rechnerischen Ergebnisse mit den Versuchswerten beträgt damit im Mittel $0,98 \pm 0,14$. Die mittlere absolute Abweichung der Berechnung von den experimentellen charakteristischen Durchrißlasten der 13 Testserien beträgt 10%. Die Anpassung des Bemessungsmodells an die charakteristischen Höchstlasten ergibt einen Kalibrierfaktor von $c = 1,45$, wobei die Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen sodann im Mittel $0,99 \pm 0,10$ beträgt. Die mittlere absolute Abweichung liegt bei 8%.

Mit Blick auf die empfohlene Implementierung des Bemessungsansatzes in EN 1995-1-1:2004 und DIN 1052:2004 ist darauf hinzuweisen, daß sicherheitsrelevant ausschließlich die Verwendung des an die Durchrißlasten angepaßten Kalibrierfaktors vertretbar ist. Dies läßt sich wie folgt begründen:

Die experimentell erhaltenen Verhältnisse von Durchriß- zu Höchstlasten, die im Mittel aller geprüften Bauteile 0,86 betragen, variierten extrem, wobei in rd. 30% aller Fälle die Durchrißlasten mit den durch schlagartig eintretenden Sprödbruch charakterisierten Höchstlasten übereinstimmten. In allen anderen Fällen mit mehr oder weniger deutlichem Unterschied zwischen Durchriß- und Höchstlast trat stabiler Rißfortschritt zwischen beiden Lastniveaus auf. Ungeachtet der Tatsache, daß in den berichteten Versuchen der stabile Rißfortschritt zwischen den Zeitpunkten der Durchrißlast und der Höchstlast durch Lasterhöhung getrieben wurde, ist keinesfalls auszuschließen, daß der Rißfortschritt nicht auch teilweise oder gänzlich bei konstant gehaltenem Durchrißlastniveau aufgetreten wäre. (Anmerkung: In einem orientierenden ergänzenden Bauteilversuch nach Abschluß des berichteten Forschungsvorhabens wurde der Sachverhalt des vermuteten kurz/mittelfristigen Rißfortschritts bei konstant gehaltenem Durchrißlastniveau bestätigt). Es ist in diesem Zusammenhang auch darauf hinzuweisen, daß der kurz-, mittel- und langfristige Rißfortschritt ausgehend von einem Querschnittsdurchriß keinesfalls ausreichend durch die k_{mod} -

Abminderungsfaktoren, die den Festigkeitseinfluß der kumulierten Lasteinwirkungsdauer und der Klimaeinwirkungen erfassen, abgedeckt wird.

Das grundsätzlich sehr einfach an unterschiedliche charakteristische Werte der Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung anzupassende Weibull-basierte Bemessungsmodell liefert bei kleinen und mittleren Trägerhöhen (bis rd. 0,6 m) vergleichbare Bemessungsergebnisse wie DIN 1052:2004, die in beiden Fällen gut und konservativ mit den Versuchsergebnissen übereinstimmen. So beträgt bei den Testserien mit der Querschnittshöhe $h = 450$ mm das mittlere Verhältnis der rechnerischen charakteristischen Querkrafttragfähigkeiten bezüglich der experimentellen charakteristischen Durchrißlasten im Falle der DIN 1052:2004-Bemessung $0,93 \pm 0,15$ und im Falle des Weibull-Modells $0,91 \pm 0,11$.

Bei größeren Trägerhöhen liefert der, die Bauteilhöhe unzutreffend linear berücksichtigende DIN 1052:2004-Bemessungsansatz, der auf einem klassischen Festigkeitskriteriums beruht, zunehmend deutlich höhere Tragfähigkeiten als das mit den Versuchsergebnissen gut übereinstimmende Weibull-basierte Bemessungsmodell. So beträgt im Falle der experimentell untersuchten Querschnittshöhe $h = 900$ mm das mittlere Verhältnis der rechnerischen charakteristischen Querkrafttragfähigkeiten zu den experimentellen charakteristischen Durchrißlasten bei dem Weibull-Modell $1,05 \pm 0,16$ während sich nach DIN 1052:2004 ein deutlich zu hoher, stark streuender Verhältniswert von $1,37 \pm 0,22$ ergibt. Bei noch größeren Bauteilquerschnittshöhen von 1-2 m, die häufig mit Durchbrüchen ausgeführt werden, nehmen die aufgezeigten Unterschiede zwischen den beiden Bemessungsmodellen in der beschriebenen Tendenz erheblich zu.

Es wird vorgeschlagen, das entwickelte, versuchsmäßig in hohem Umfang verifizierte Weibull-basierte Bemessungsmodell in Neufassungen bzw. Änderungen der EN 1995-1-1:2004 bzw. der DIN 1052:2004 aufzunehmen. Das Modell ermöglicht auch die Berücksichtigung von runden Durchbrüchen in (schwach) gekrümmten Brettschichtholzträgern. Diesbezüglich wurde aufgezeigt, daß der bemessungsrelevante Spannungszustand in der Durchbruchperipherie nicht aus einer einfachen Superposition der Spannungen eines durchbrochenen geraden und eines undurchbrochenen gekrümmten Trägers folgt. Für die sichere Bemessung von Durchbrüchen in mittelgroßen bis sehr großen Bauteilquerschnittshöhen (1-2 m) besteht mit Blick auf die erhaltenen Versuchsergebnisse und die heutige Bemessung in DIN 1052:2004 offensichtlicher Handlungsbedarf.

9 Literatur

- [Aic1995] Aicher, S., Schmidt, J., Brunold, S. (1995): Design of timber beams with holes by means of fracture mechanics. CIB-W18 Meeting 28, Beitrag CIB-W18/28-19-4, Kopenhagen
- [Aic1996] Aicher, S., Dill-Langer, G. (1996): Einfluß der zylindrischen Anisotropie des Holzes und der Belastungsbedingungen auf die off-axis Steifigkeit und die Spannungen eines Brettquerschnitts bei Querkzugbeanspruchung. Otto-Graf-Journal, Vol. 7, S. 216 – 242, Universität Stuttgart
- [Aic1998] Aicher, S., Dill-Langer, G., Ranta-Maunus, A. (1998): Duration of load effect in tension perpendicular to the grain of glulam in different climates. Holz als Roh- und Werkstoff 56, S. 295-305
- [Aic2000] Aicher, S., Höfflin, L. (2000): A contribution to the analysis of glulam beams with round holes. Otto-Graf-Journal, Vol. 11, S. 167-180, Universität Stuttgart
- [Aic2001a] Aicher, S., Höfflin, L. (2001): Runde Durchbrüche in Biegeträgern aus Brettschichtholz. Teil 1: Berechnung. Bautechnik 78 (10), S. 706-715
- [Aic2001b] Aicher, S., Dill-Langer, G., Höffling, L. (2001): Effect of polar anisotropy of wood loaded perpendicular to grain. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, (13), No. 1, S. 1 - 9
- [Aic2002a] Aicher, S. (2002): Stress intensity factor approach. In: Fracture mechanics models for strength analysis of timber beams with a hole or a notch. Report of RILEM Technical Committee 133, (Hrsg.: Gustafsson, P. J.), Report-TVSM-7134, Lund University, Schweden
- [Aic2002b] Aicher, S., Höfflin, L. (2002): Glulam beams with round holes – a comparison of different design approaches vs. test data. CIB-W18 Meeting 35, Beitrag CIB-W18/35-12-1, Kyoto

- [Aic2003] Aicher, S., Höfflin, L., Reinhardt, H.-W. (2003): Verifizierung versagensrelevanter Dehnungsverteilungen im Bereich runder Durchbrüche in Brettschichtholzträgern. Bautechnik 80 (8), S. 523 – 533
- [Aic2005] Aicher, S., Dill-Langer, G. (2005): Effect of lamination anisotropy and lay-up in glued-laminated timbers. Journal of Structural Engineering, ASCE, (131), No. 7, S. 1095 - 1103
- [Bar1974] Barrett, J. D. (1974): Effect of size on tension perpendicular-to-grain strength of Douglas-Fir. Wood and Fiber Science, 6(2):126-143
- [Bar1975] Barrett J. D., Foschi, R. O., Fox, S. P. (1975): Perpendicular-to-grain strength of Douglas-Fir. Canadian Journal of Civil Engineering 2, Nr. 1, S. 50-57
- [Dil2004] Schädigung von Brettschichtholz bei Zugbeanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung. Dissertation, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (Otto-Graf-Institut), Schriftenreihe Heft 88, Stuttgart
- [Ben1971] Bengtsson, S., Dahl, G. (1971): Inverkan av hål nära upplag på hållfastheten hos limträbalkar. Lunds Techniska Högskola, Byggnadsteknik II, Lund
- [Fre1974] Frech, P., Kolb, H. (1974): Untersuchungen an durchbrochenen Bindern aus Brettschichtholz. Forschungsvorhaben Schlußbericht H 30721, Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, Otto-Graf-Institut, Universität Stuttgart
- [Gus1988] Gustafsson, P. J. (1988): A study of strength of notched beams. CIB-W18 Meeting 21, Beitrag CIB-W18A/21-10-1, Vancouver
- [Gus2002] Gustafsson, P. J. (2002): Energy approach used in a draft Eurocode. In: Fracture mechanics models for strength analysis of timber beams with a hole or a notch. Report of RILEM Technical Committee 133, (Hrsg.: Gustafsson, P. J.), Report-TVSM-7134, Lund University, Schweden
- [Höf2003] Höfflin, L., Aicher, S. (2003): Weibull based design approach of round holes in glulam. CIB-W18 Meeting 36, Beitrag CIB-W18/36-12-2, Colorado

- [Höf2005] Höfflin, L. (2005): Runde Durchbrüche in Brettschichtholzträgern – Experimentelle und theoretische Untersuchungen. Dissertation, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (Otto-Graf-Institut), Schriftenreihe Heft 90, Stuttgart
- [Joh1977] Johannesson, B. (1977): Holes in plywood beams and glued laminated timber beams. Publication S77:4, Chalmers University of Technology, Göteborg
- [Joh1979] Johannesson, B. (1977): Håltagning i limträbalkar – förslag till två olika dimensioneringsmetoder. (Holes in glulam beams – two design methods. In schwedisch), Nordisk Träsymposium i Aalborg maj 1979, Nordisk Trätidskrift, No. 6, S. 385-395
- [Joh1983] Johannesson, B. (1983): Design problems for glulam beams with holes. Dissertation, Div. Steel and Timber structures, Chalmers University of Technology, Göteborg
- [Kol1977] Kolb, H., Frech, P. (1977): Untersuchungen an durchbrochenen Bindern aus Brettschichtholz. Holz als Roh- und Werkstoff 35, S. 125 – 134
- [Kol1985] Kolb, H., Epple, A. (1985): Verstärkung von durchbrochenen Brettschichtholzbindern. Schlußbericht Forschungsvorhaben I.4 – 34810, Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, Stuttgart
- [Lar1989] Larsen, H. J., Gustafsson, P. J. (1989): Design of endnotched beams. CIB-W18 Meeting 22, Beitrag CIB-W18A/22-10-1, Berlin
- [Log1991] Logemann, M. (1991): Abschätzung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen mit Ausklinkungen und Durchbrüchen. Dissertation, Universität Hannover
- [Log1992] Logemann, M. (1992): Die Abschätzung der Tragfähigkeit kerbbeanspruchter Holzbauteile mit den Methoden der linear-elastischen Bruchmechanik. Bauingenieur 67, S. 61-67
- [Neu1981] Neuhaus, H. (1981): Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit. Dissertation, in: Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen, Nr. 81-8, Inst. für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität, Bochum
- [Pen1980] Pentalla, V. (1980): Reiällinen liimapuupalkki. Julkaisu 33, Div. Structural Eng. Helsinki University of Technology, Otaniemi

- [Pen1983] Pentalla, V. (1983): Reiällinen liimapuupalkin vahvistaminen ruuveilla. Julkaisu 55, Div. Structural Eng. Helsinki University of Technology, Otaniemi
- [Pet2002] Petersson, H. (2002): Energy release rate analysis. In: Fracture mechanics models for strength analysis of timber beams with a hole or a notch. Report of RILEM Technical Committee 133, (Hrgb.: Gustafsson, P. J.), Report-TVSM-7134, Lund University, Schweden
- [Rii1993] Riipola, K. (1993): Timber beams with holes: fracture mechanics approach. Journal of Structural Engineering, Vol. 121, No. 2, S. 225-239
- [Sch2000] Scheer, C., Haase, K. (2000): Durchbrüche in Brettschichtholzträgern; Teil 2: Bruchmechanische Untersuchungen. Holz als Roh- und Werkstoff 58, S. 217-228
- [Wei1939] Weibull, W. (1939): A statistical theory of the strength of materials. Proceedings of the Royal Swedish Institute of Engineering, No. 151, Stockholm, Schweden

Normen:

- DIN 1052 Teil 1:1988: Holzbauwerke – Berechnung und Ausführung
- DIN 1052:2004: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau.
- DIN V EN V 1995-1-1:1994: Eurocode 5 – Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken , Teil 1-1: Allgemeine – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau (06/94)
- EN 408:2003: Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften.
- EN 1194: Holzbauwerke – Brettschichtholz – Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte.
- EN 1995-1-1:2004: Eurocode 5 - Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau

prEN 1995-1-1:2002: Normentwurf Eurocode 5 – Design of timber structures. prEN 1995-1-1 (final draft):2002-02-28. General Rules– General rules and rules for buildings.

prEN 1995-1-1:2003: Normentwurf Eurocode 5 – Design of timber structures. prEN 1995-1-1 (final draft):2003-04-08 und 2003-05-06. General – Common rules and rules for buildings.

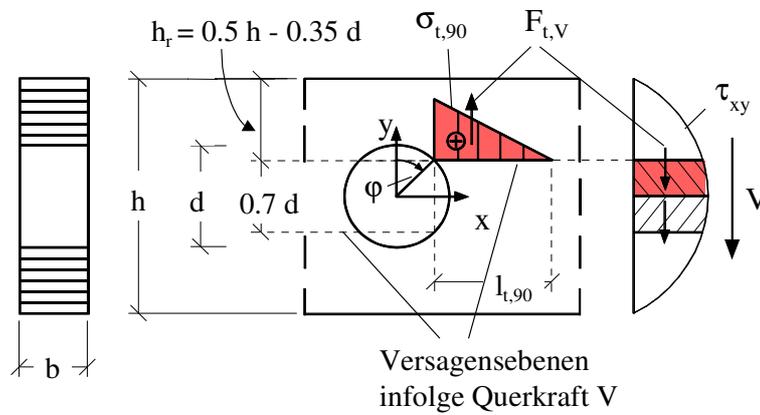


Bild 1: Schematische Darstellung zur Herleitung der Zugkraft $F_{t,V}$ infolge der einwirkenden Querkraft V

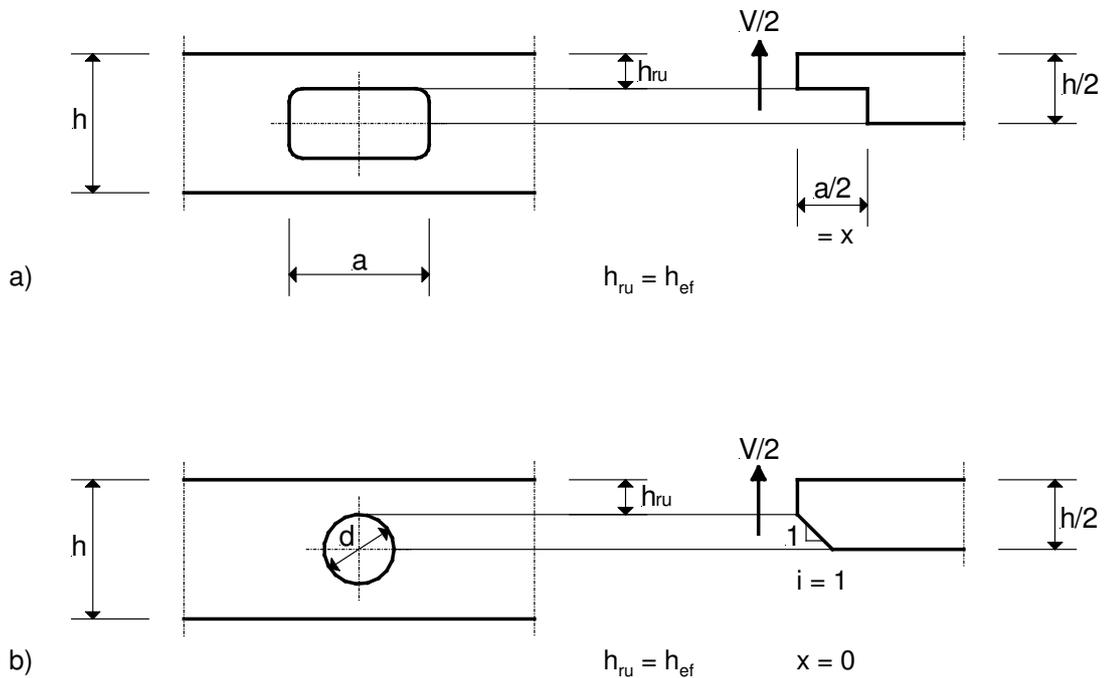


Bild 2a, b: Durchbrochene Biegeträger werden nach prEN 1995-1-1:2003 als quasi-ausgeklinkte Träger betrachtet
a) der rechteckige Durchbruch wird als rechtwinklig ausgeklinkter Träger betrachtet
b) der runde Durchbruch wird als schräg ausgeklinkter Träger betrachtet

Tabelle 1: Charakteristische Festigkeitswerte der Normen DIN EN 1194 und DIN 1052:2004 für kombiniertes und homogenes Brettschichtholz (in N/mm²)

Bemessungs- ansatz	charakt. Werte	GL 24c	GL 24h	GL 28c	GL 28h	GL 32c	GL 32h	GL 36c	GL 36h
		BS 11c	BS 11h	BS 14c	BS 14h	BS 16c	BS 16h	BS 18c	BS 18h
DIN 1052:2004	$f_{m,k}$	24	24	28	28	32	32	36	36
	$f_{t,90,k}$	0,5							
	$f_{v,k}$	3,5							
DIN EN 1194	$f_{m,k}$	24	24	28	28	32	32	36	36
	$f_{t,90,k}$	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,50	0,50	0,60
	$f_{v,k}$	2,20	2,70	2,70	3,20	3,20	3,80	3,80	4,30

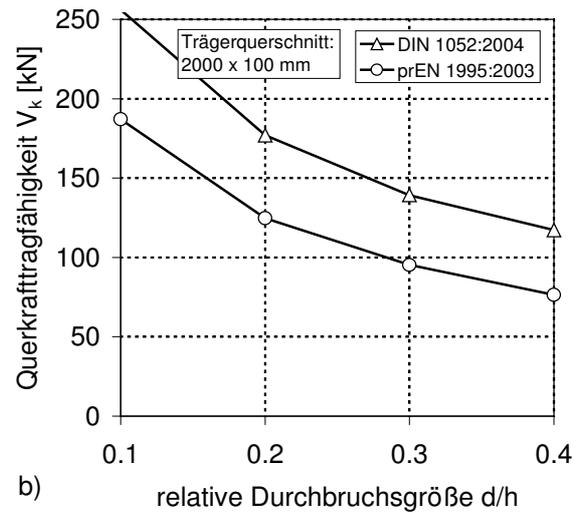
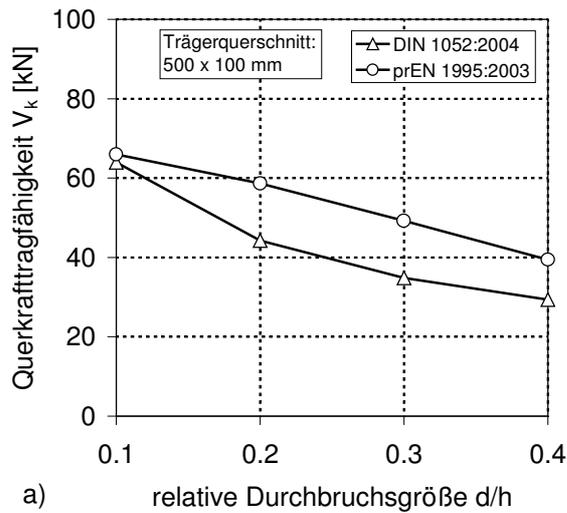


Bild 3a, b: Berechnete charakteristische Querkrafttragfähigkeiten runder Durchbrüche mit $M/V = \text{konst.} = 3h$ für GL 24c (BS 11c) in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße d/h nach den Bemessungsansätzen DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003
 a) Trägerquerschnitt: $500 \times 100 \text{ mm}$ b) Trägerquerschnitt: $2000 \times 100 \text{ mm}$

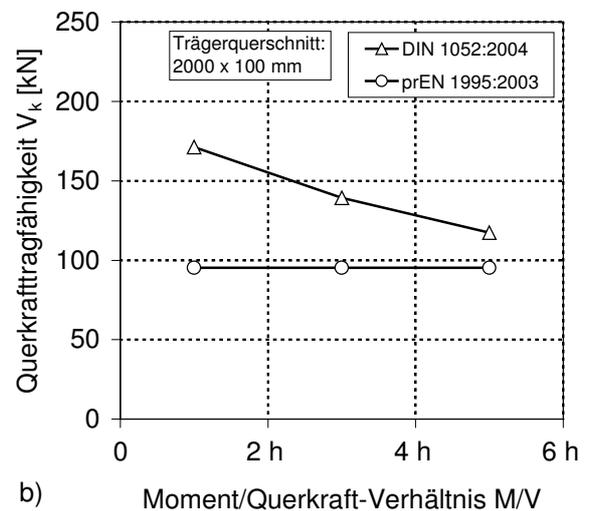
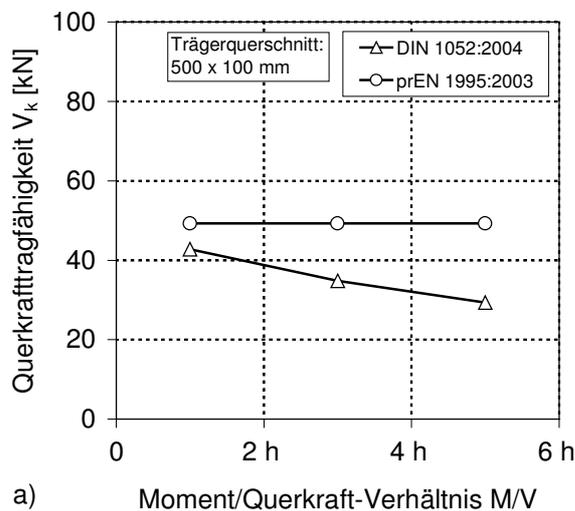


Bild 4a, b: Berechnete charakteristische Querkrafttragfähigkeiten runder Durchbrüche mit $d/h = \text{konst.} = 0,3$ für GL 24c (BS 11c) in Abhängigkeit vom Schnittgrößenverhältnis M/V nach den Bemessungsansätzen DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003
 a) Trägerquerschnitt: $500 \times 100 \text{ mm}$ b) Trägerquerschnitt: $2000 \times 100 \text{ mm}$

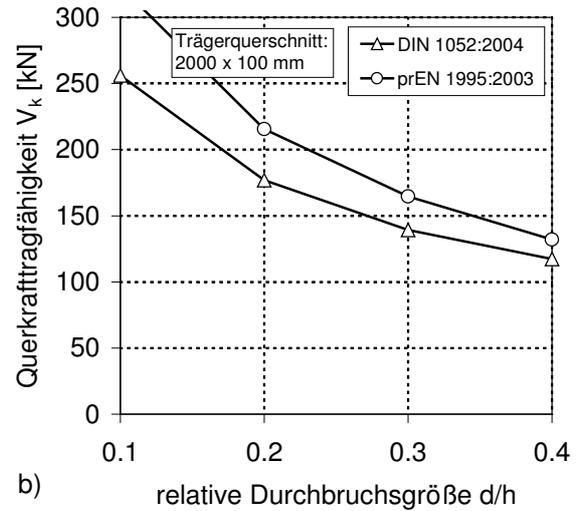
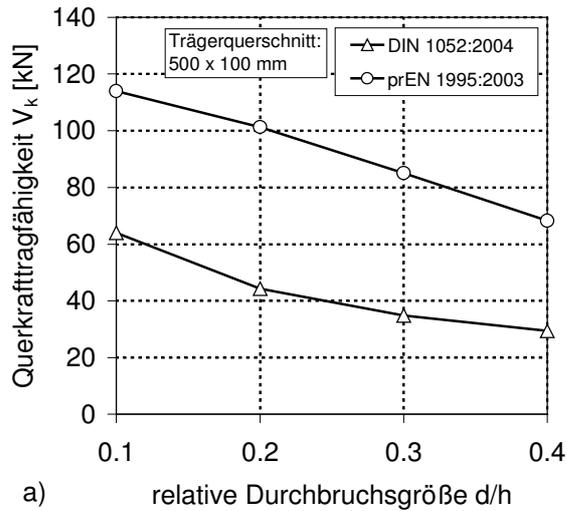


Bild 5a, b: Berechnete charakteristische Querkrafttragfähigkeiten runder Durchbrüche mit $M/V = \text{konst.} = 3h$ für GL 32h (BS 16h) in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße d/h nach den Bemessungsansätzen DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003

a) Trägerquerschnitt: 500 × 100 mm

b) Trägerquerschnitt: 2000 × 100 mm

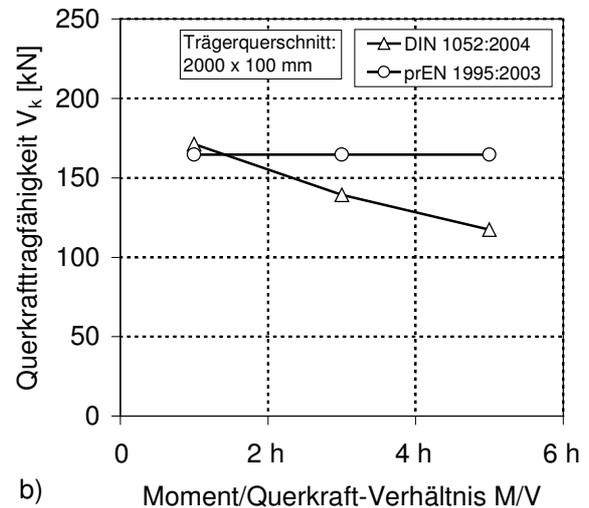
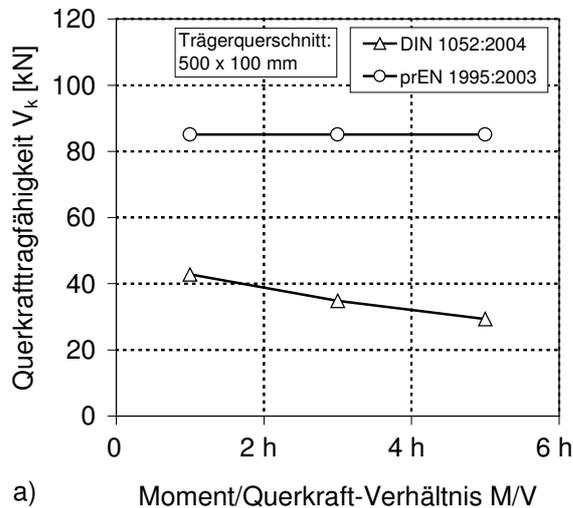


Bild 6a, b: Berechnete charakteristische Querkrafttragfähigkeiten runder Durchbrüche mit $d/h = \text{konst.} = 0,3$ für GL 32h (BS 16h) in Abhängigkeit vom Schnittgrößenverhältnis M/V nach den Bemessungsansätzen DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003

a) Trägerquerschnitt: 500 × 100 mm

b) Trägerquerschnitt: 2000 × 100 mm

Tabelle 2: Zusammenstellung der in der Literatur angegebenen Versuche an Trägern mit runden Durchbrüchen

Bezeichnung	Referenz 3)	Versuchsschema betreffend Last- und Durchbruchs- anordnung	BSH- Festig- keitsklasse	Anzahl der Versuche	Träger- quer- schnitt	Durch- bruchs- durch- messer	relative Durch- bruchs- größe	Schnitt- kraft- ver- hältnis am Durch- bruch	Querkraft		Bemerkung	Versagensart
					b x h	d	d/h	M/V	V _{Riß}	V _{max}		
-	-	-	-	-	mm	mm	-	-	kN	kN	-	-
A1	A		I	2	80 x 550	300	0,55	∞	-	70,0	-	Biegebruch in Trägermitte
A2				2	80 x 550	300	0,55	2,9 h	-	37,6	-	Querzugversagen ausgehend von einem äußeren Durchbruch
B1	B		L 40 D	1	90 x 500	255	0,50	1,2 h	33,8	33,8	-	Querzugversagen am Durchbruch
B2				1	90 x 500	255	0,50	2,1 h	31,6	31,6	-	
B3				1	90 x 500	150	0,30	1,2 h	51,3	51,3	-	
B4				1	115 x 800	400	0,50	1,0 h	57,1	65,8	-	
B5				1	115 x 800	300	0,38	2,0 h	89,5	89,5	-	
C1	C		L 40	1	90 x 500	125	0,25	0,6 h	40,2	-	1)	Querzugversagen am Durchbruch
C2				1	90 x 500	250	0,50	1,3 h	25,7	-	1)	
C3				1	90 x 500	250	0,50	2,8 h	35,0	-	1)	
C4				1	90 x 500	250	0,50	0,6 h	22,5	-	1)	
C5					1	90 x 500	250	0,50	∞	76,0	-	1)
D1	D		L 40	4	88 x 495	125	0,25	2,5 h	51,9	-	2)	Querzugversagen am Durchbruch
D2				4	88 x 495	396	0,8	2,5 h	16,1	-	2)	
E1	E		L 40	1	90 x 500	250	0,5	1,2 h	-	37,5	-	Querzugversagen am Durchbruch
E2				1	90 x 500	150	0,3	1,2 h	-	> 52,5	-	Biegebruch in Trägermitte

Bemerkung:

1) Durchbruch war derart angeordnet, daß sich keine Äste in den Querzugzonen des Durchbruchs befanden

2) Mittelwert aus vier Versuchen; keine Einzelwerte und kein Variationskoeffizient angegeben

3) Literaturquelle:

A [Fre1974], B [Pen1980], C [Joh1977], D [Joh1983], E [Ben1971]

Tabelle 3: Zusammenstellung des experimentellen Versuchsprogramms; alle Träger entsprechen der Festigkeitsklasse GL 32h

Testserien- gruppe	Träger- form	Test- serie	Träger- höhe	Träger- breite	Schnittkraft- verhältnis am Durchbruch	relative Durch- bruch- größe	Durch- bruch- durch- messer	Bemer- kung
[-]	[-]	[-]	h [mm]	b [mm]	M/V [mm]	d/h [-]	d [mm]	[-]
450_1.5h_d/h	gerade	450_1.5h_0.2	450	120	1.5 h	0.2	90	1)
		450_1.5h_0.3				0.3	135	1)
		450_1.5h_0.4				0.4	180	1)
900_1.5h_d/h		900_1.5h_0.2	900	120	1.5 h	0.2	180	1)
		900_1.5h_0.3				0.3	270	1)
		900_1.5h_0.4				0.4	360	1)
450_5h_d/h		450_5h_0.2	450	120	5 h	0.2	90	3)
		450_5h_0.3				0.3	135	2)
		450_5h_0.4				0.4	180	2)
900_5h_d/h		900_5h_0.2	900	120	5 h	0.2	180	2)
		900_5h_0.3				0.3	270	1)
		900_5h_0.4				0.4	360	2)
G450_5h_d/h	gekrümmt $h/r_m = 0.03$	G450_5h_0.4	450	120	5 h	0.4	180	2)
G900_5h_d/h		G900_5h_0.4	900	120	5 h	0.4	360	2)

- 1) Versuche wurden bereits im Vorfeld des Forschungsvorhabens durchgeführt
- 2) Versuche wurden innerhalb des Forschungsvorhabens durchgeführt
- 3) Versuche wurden nicht durchgeführt, da die Biegefestigkeit der Träger über dem 1.5fachen der charakteristischen Biegefestigkeit liegen müßte, um ein Versagen am Durchbruch zu erzielen

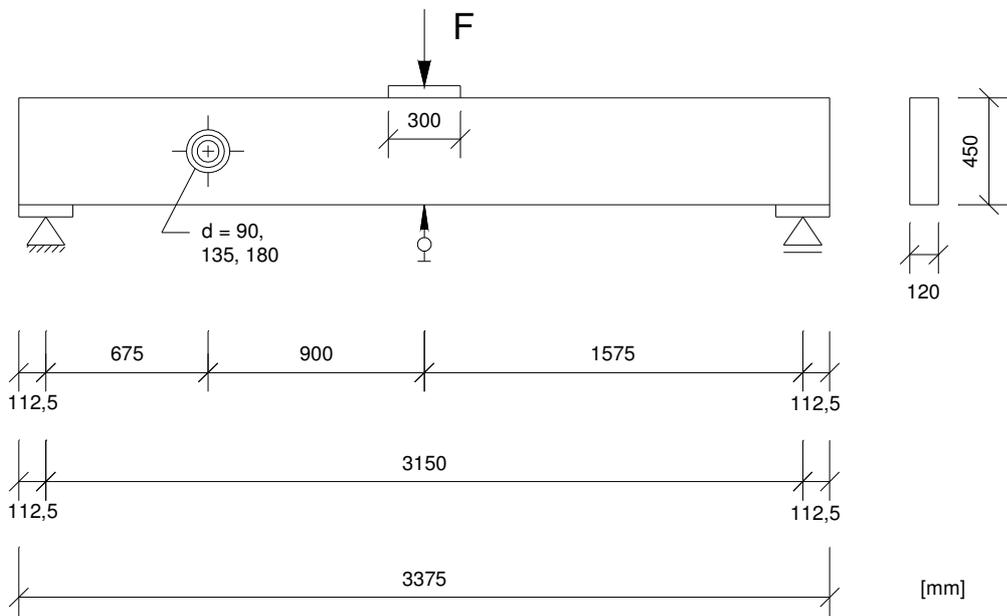


Bild 7: Versuchsanordnung der Testseriengruppe 450_1.5h_d/h

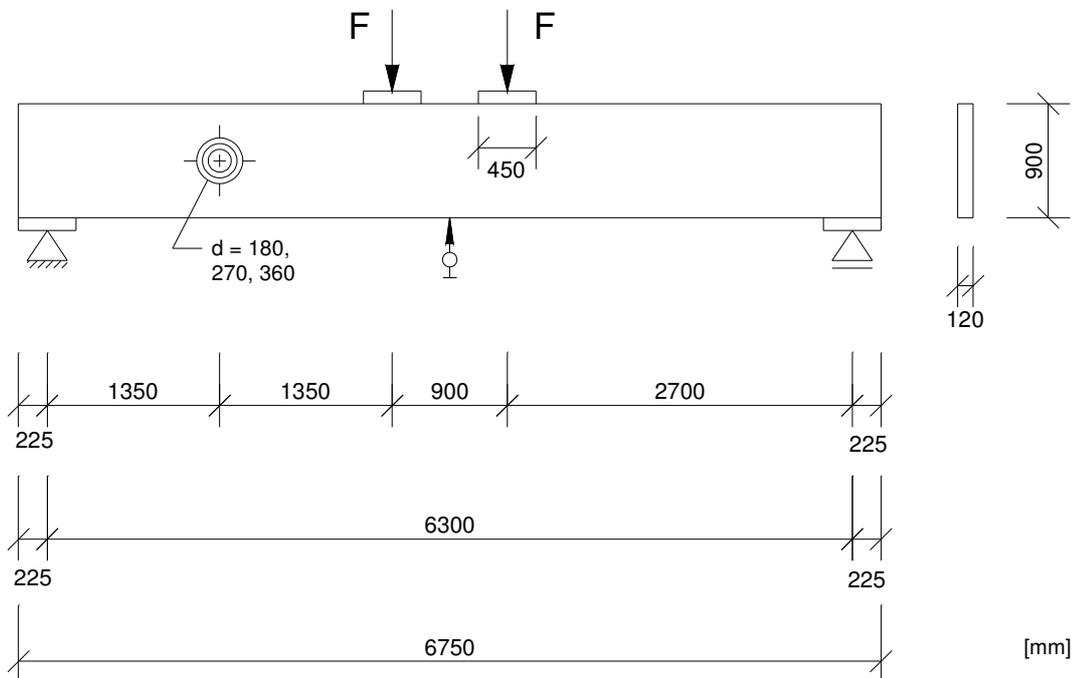


Bild 8: Versuchsanordnung der Testseriengruppe 900_1.5h_d/h

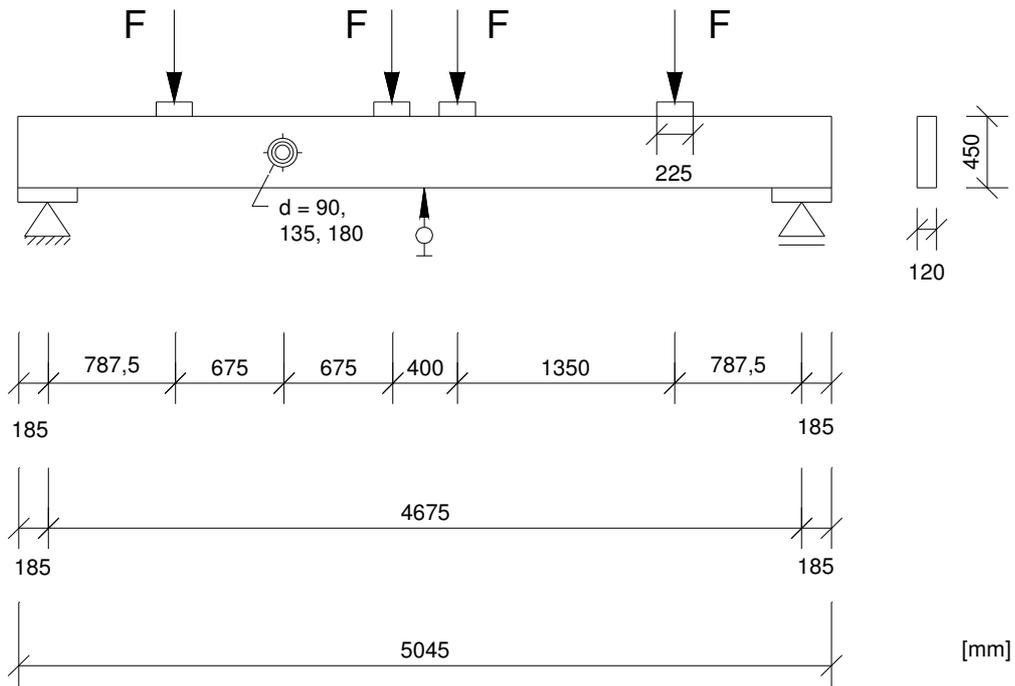


Bild 9: Versuchsanordnung der Testseriengruppe 450_5h_d/h

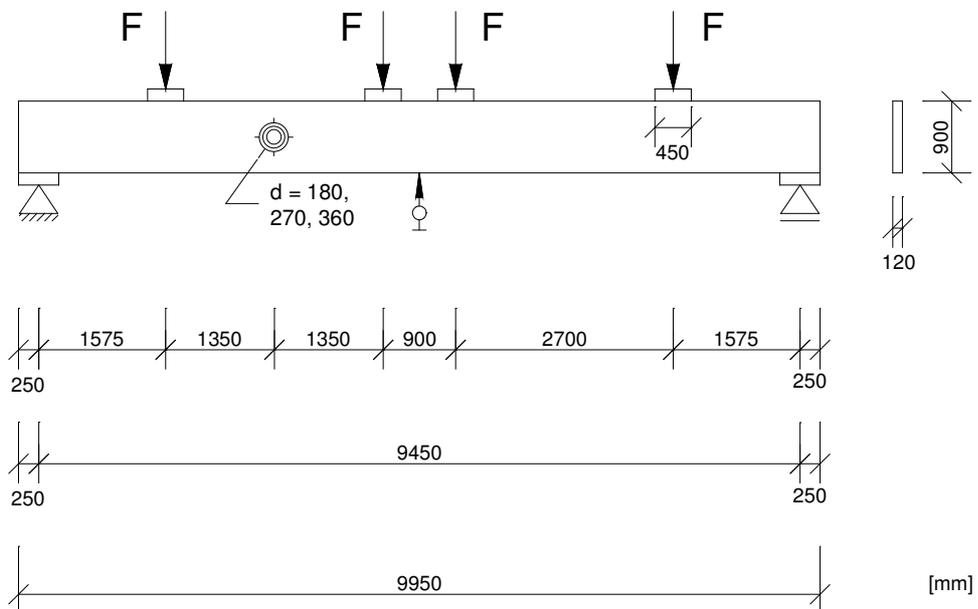


Bild 10: Versuchsanordnung der Testseriengruppe 900_5h_d/h

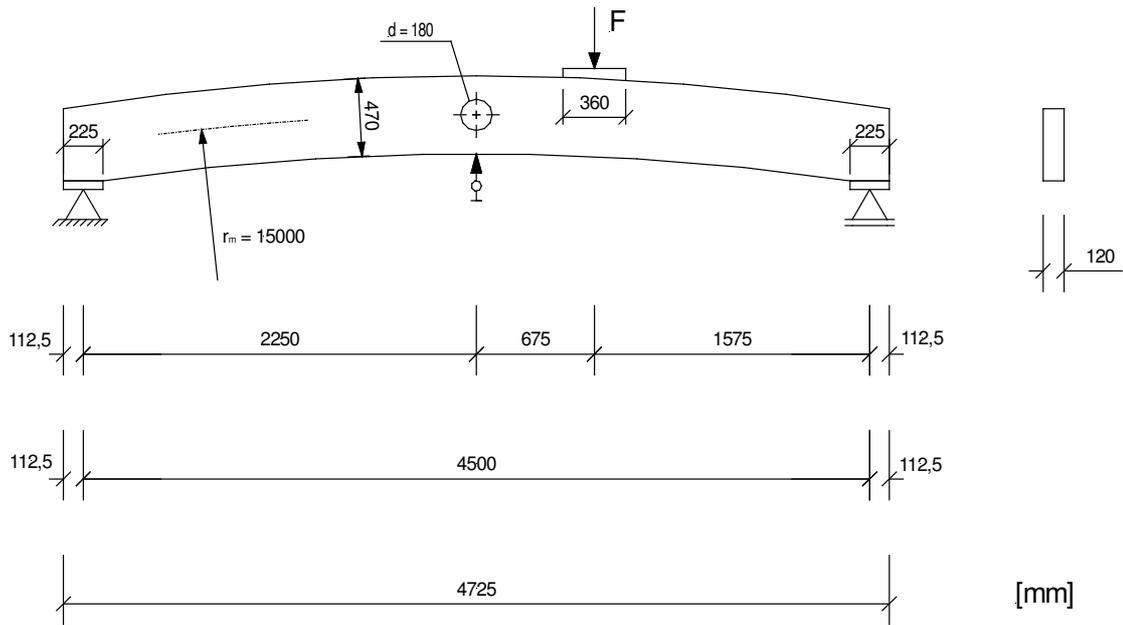


Bild 11: Versuchsanordnung der Testseriengruppe G450_5h_0.4

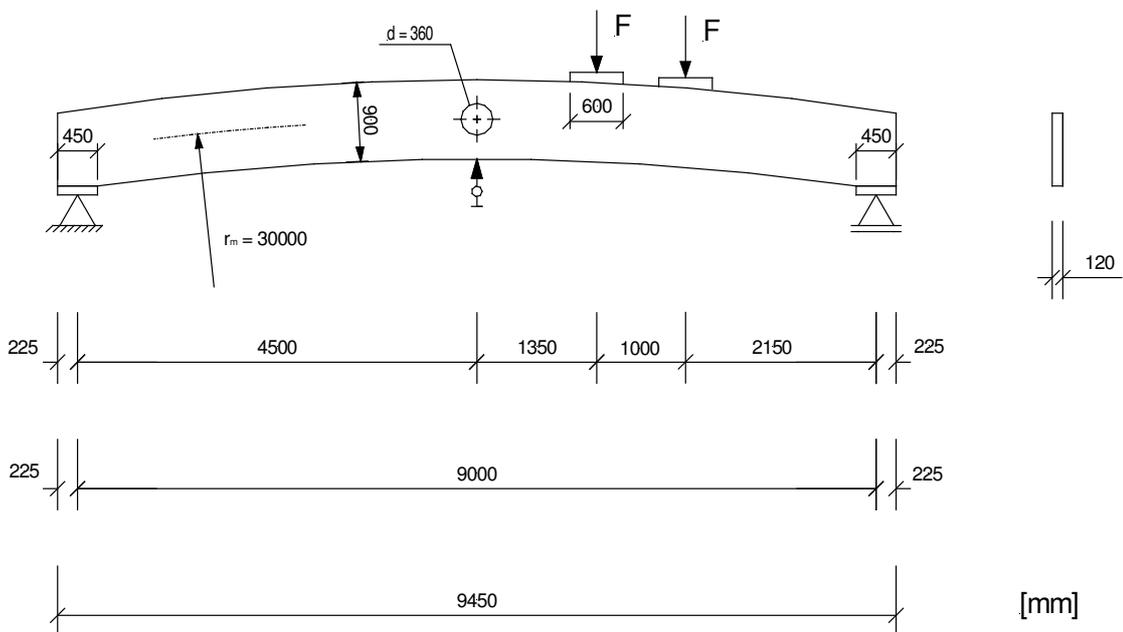
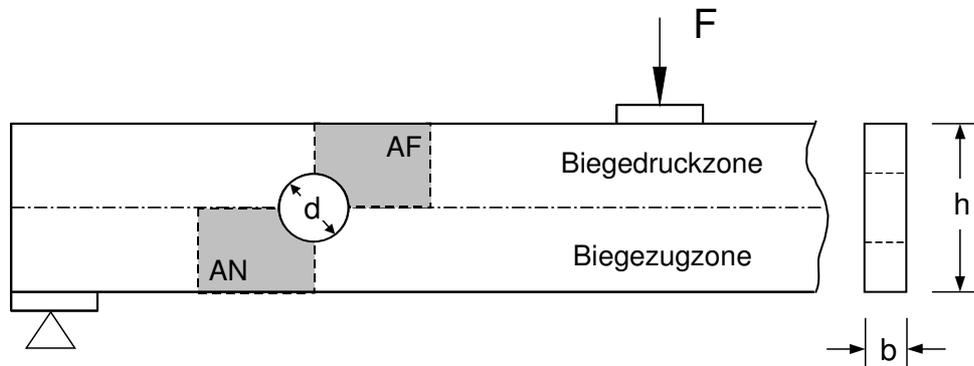
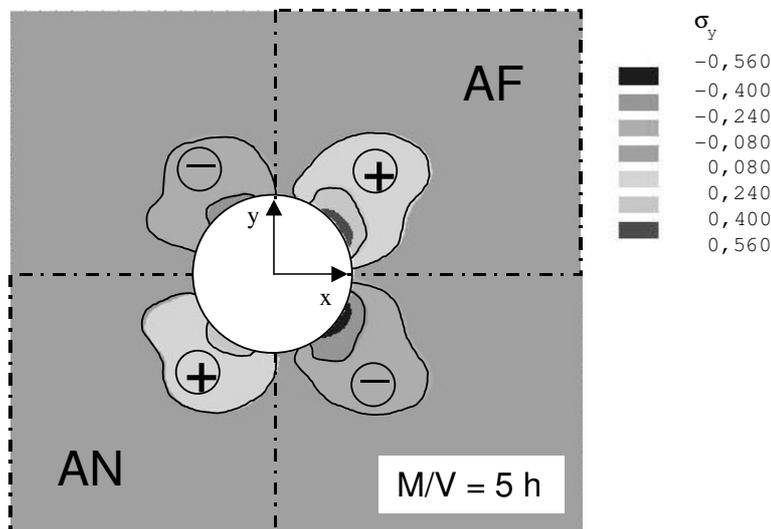


Bild 12: Versuchsanordnung der Testseriengruppe G900_5h_0.4



a)



b)

Bild 13: a) Schematischer Versuchsaufbau der Testseriengruppen mit kombiniertem Schnittkraftverhältnis $M/V \neq 0$ am Durchbruch; mit angegeben sind hoch beanspruchten Querzugbereiche AN und AF am Durchbruch
b) Spannungsverteilung σ_y rechtwinklig zur Faserrichtung in der Durchbruchsumgebung bei einem kombiniertem Schnittkraftverhältnis M/V (Parameter: $h = 500$ mm; $d/h = 0,3$; $b = 100$ mm; $V = 10$ kN; $M/V = 5h$)

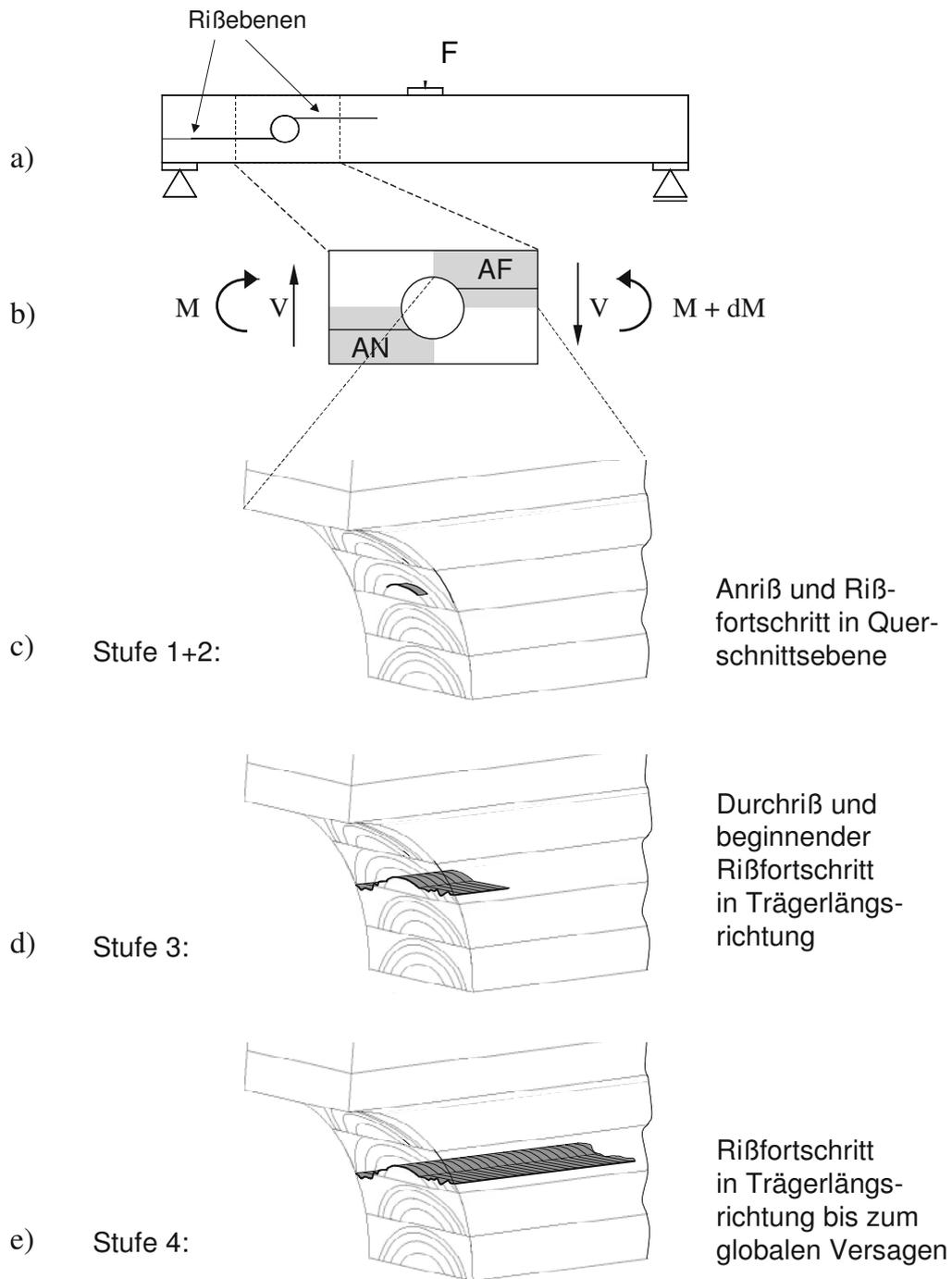


Bild 14a-e: Schematische Darstellung der Schädigungsentwicklung am durchbrochenen Biegeträger

- a) Biegeträger (nach Erreichen der Traglast) mit makroskopischen Rissen ausgehend vom runden Durchbruch
- b) Definition der beiden hochbeanspruchten Querzugbereiche AN und AF am Durchbruch
- c-e) Schädigungsstufen 1 - 4 am runden Durchbruch

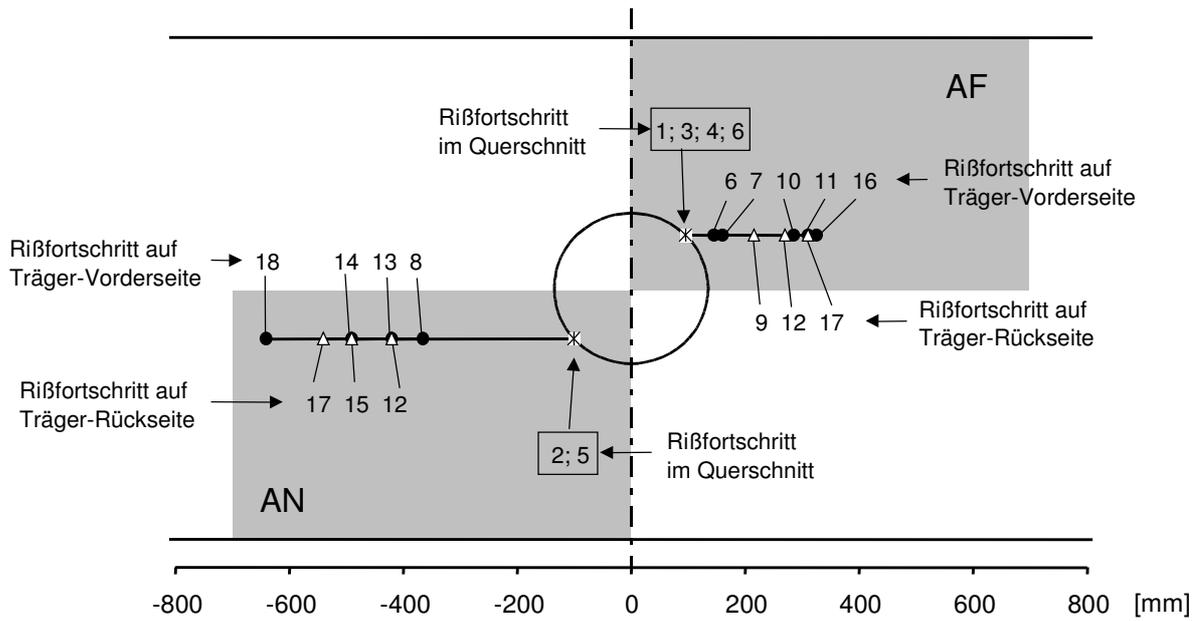


Bild 15: Rißfortschritt in Trägerlängsrichtung am Beispiel des Trägers 3 der Testserie 900_1.5h_0.3

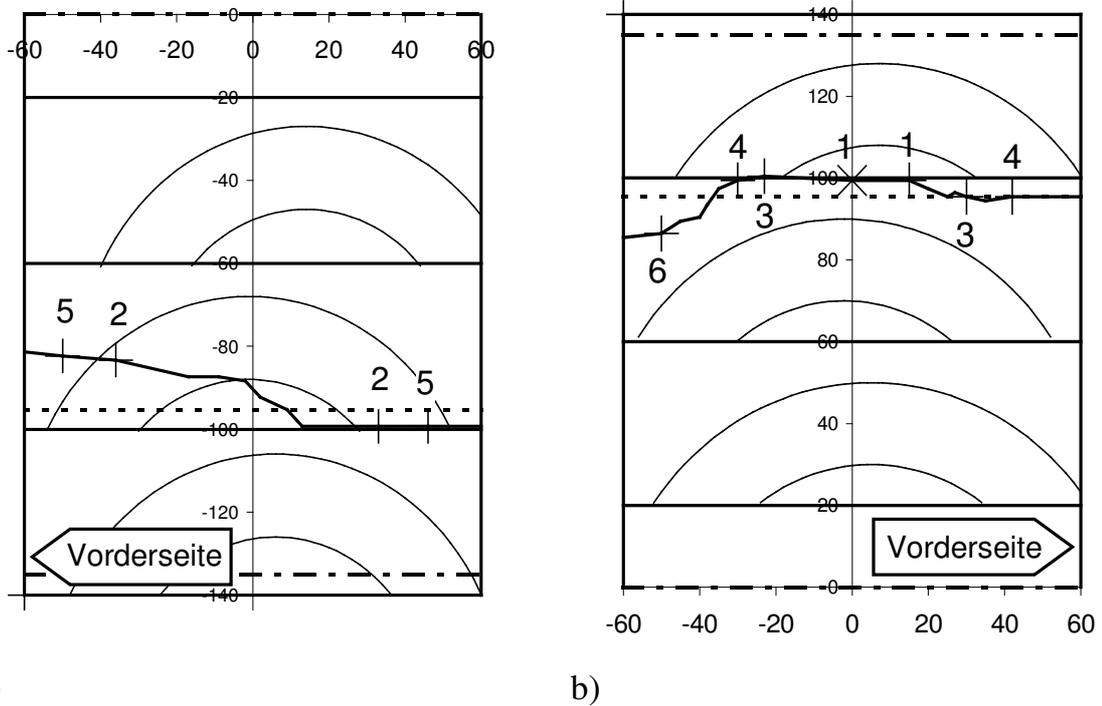
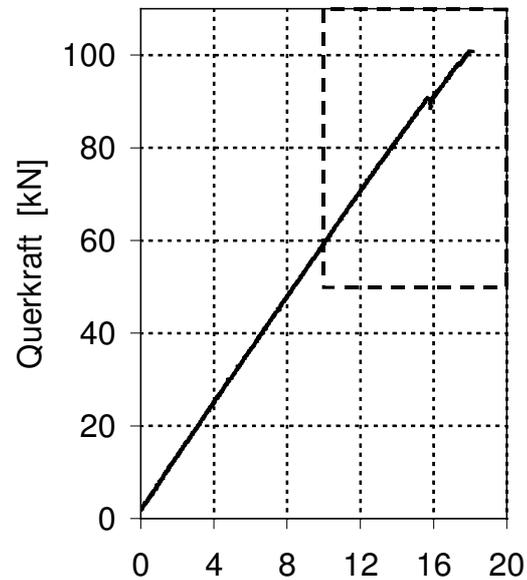
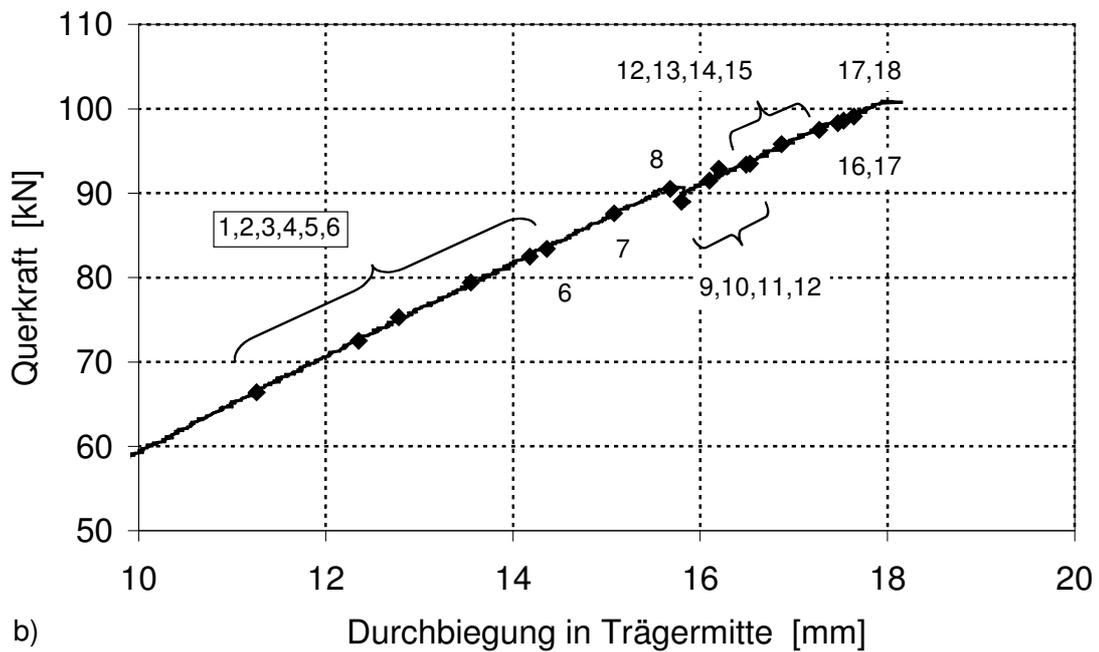


Bild 16a, b: Rißfortschritt im Querschnittinneren und auf den Trägerseitenflächen am Durchbruch am Beispiel des Trägers 3 der Testserie 900_1.5h_0.3
a) Durchbruchseite AN b) Durchbruchseite AF



a) Durchbiegung in Trägermitte [mm]



b)

Bild 17a, b: Querkraft-Durchbiegungskurve am Beispiel des Trägers 3 der Testserie 900_1.5h_0.3

a) vollständige Kurve

b) Detailausschnitt mit Markierung der Rißfortschritte

Tabelle 4: Zusammenstellung der wichtigsten Versuchsergebnisse der Träger der Testseriengruppe 450_1.5h_d/h; (Rohdichten, Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten, Versagensart, maximale relative Rißlänge)

Testserie	d/h	Nummer	Lam.-dicke	Rohdichte ρ_{12}	Anrißblast			Durchrißblast			Höchstlast	Versagensart 1)	L _{rel,max} Durchbruchseite		auswertbar 2)
					Durchbruchseite AN	AF	min. Anrißlast	Durchbruchseite AN	AF	min. Durchrißlast			AN	AF	
-	-	-	mm	kg/m ³	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	-	-	-	-
450_1.5h_0.2	0.2	1	40	506	85.5	82.5	82.5	85.5	85.5	85.5	85.5	Durchbruchsversagen B	0.0	0.0	ja
		2	40	552	77.0	91.1	77.0	91.1	91.1	91.1	91.1	Durchbruchsversagen B	0.0	0.0	ja
		3	40	485	70.9	51.0	51.0	74.6	74.6	74.6	74.6	Durchbruchsversagen B	0.0	0.0	ja
		4	40	518	60.0	53.5	53.5	85.4	77.6	77.6	85.4	Durchbruchsversagen A	0.0	0.5	ja
		5	32	489	50.2	53.6	50.2	55.1	57.2	55.1	73.8	Durchbruchsversagen A	2.1	0.2	ja
450_1.5h_0.3	0.3	1	32	488	56.0	41.0	41.0	59.0	52.5	52.5	59.3	Durchbruchsversagen A	1.7	1.9	ja
		2	40	509	45.2	48.3	45.2	75.0	75.0	75.0	75.0	Durchbruchsversagen B	0.0	0.0	ja
		3	40	527	38.1	69.4	38.1	77.2	69.4	69.4	77.2	Durchbruchsversagen A	0.0	1.3	ja
		4	40	529	62.6	62.6	62.6	62.6	62.6	62.6	62.6	Durchbruchsversagen B	0.0	0.0	ja
		5	40	497	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	Durchbruchsversagen B	0.0	0.0	ja
		6	32	490	49.9	30.9	30.9	66.5	66.5	66.5	66.5	Durchbruchsversagen B	0.0	0.0	ja
450_1.5h_0.4	0.4	1	40	511	30.3	34.0	30.3	41.8	38.3	38.3	44.5	Durchbruchsversagen A	1.6	2.7	ja
		2	40	466	27.0	37.0	27.0	45.0	50.0	45.0	53.4	Durchbruchsversagen A	1.9	3.0	ja
		3	40	463	38.0	48.3	38.0	50.6	48.3	48.3	50.6	Durchbruchsversagen A	0.0	6.7	ja
		4	40	505	56.7	43.3	43.3	58.7	58.7	58.7	58.7	Durchbruchsversagen B	0.0	0.0	ja

- 1) Erläuterung zu den Versagensarten
 Durchbruchsversagen A: Durchbruchsversagen dem eine Rißenentwicklung mit Durchriß an einer oder beiden Durchbruchseiten voranging
 Durchbruchsversagen B: Durchbruchsversagen, wobei vor dem globalen Versagen kein Durchriß an einer der beiden Durchbruchseiten auftrat
 Durchbruchs- und Biegeversagen: Biegezugversagen im mittleren Trägerbereich und Durchriß am Durchbruch trat gleichzeitig auf
 Biegeversagen: Träger versagte infolge Biegung im mittleren Trägerbereich
- 2) d.h. für die weitere Durchbruchsauswertung verwendet

Tabelle 5: Zusammenstellung der wichtigsten Versuchsergebnisse der Träger der Testseriengruppe 900_1.5h_d/h; (Rohdichten, Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten, Versagensart, maximale relative Rißlänge)

Test- serie	d/h	Num- mer	Lam.- dicke	Roh- dichte ρ_{12}	Anrißblast			Durchrißblast			Höchst- last	Versagensart 1)	L _{rel,max} Durchbruchsseite		aus- wert- bar 2)
					Durchbruchsseite AN	AF	min. Anriß- last	Durchbruchsseite AN	AF	min. Durchriß- last			AN	AF	
-	-	-	mm	kg/m ³	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	-	-	-	
900_1.5h_0.2	0.2	1	40	499	88.0	62.5	62.5	112.5	88.0	88.0	119.2	Durchbruchsversagen A	1.1	2.6	ja
		2	40	475	79.5	66.6	66.6	86.1	103.7	86.1	110.0	Durchbruchsversagen A	1.7	1.5	ja
		3	40	464	53.0	74.3	53.0	90.0	113.4	90.0	114.2	Durchbruchsversagen A	1.4	0.7	ja
		4	32	494	109.5	117.0	109.5	144.8	117.0	117.0	144.8	Durchbruchsversagen A	0.0	1.3	ja
		5	40	507	102.5	54.3	54.3	152.5	150.7	150.7	152.5	Durchbruchsversagen A	0.0	1.8	ja
900_1.5h_0.3	0.3	1	40	462	83.7	78.8	78.8	96.0	98.1	96.0	115.8	Durchbruchsversagen A	0.8	1.5	ja
		2	40	503	58.6	55.1	55.1	116.0	112.0	112.0	116.0	Durchbruchsversagen A	0.0	3.1	ja
		3	40	523	72.5	66.4	66.4	93.4	90.5	90.5	100.9	Durchbruchsversagen A	1.8	0.9	ja
		4	40	474	53.6	26.4	26.4	81.0	91.4	81.0	102.6	Durchbruchsversagen A	2.0	2.3	ja
		5	40	496	90.9	76.9	76.9	90.9	90.9	90.9	104.9	Durchbruchsversagen A	2.3	2.7	ja
		6	32	459	88.0	108.2	88.0	108.2	108.2	108.2	112.1	Durchbruchsversagen A	2.2	3.2	ja
900_1.5h_0.4	0.4	1	40	489	Pilotversuch, Rißentwicklung wurde nicht aufgezeichnet						81.9	Durchbruchsversagen A	keine Angaben		nein
		2	40	483	68.3	52.0	52.0	68.3	67.5	67.5	72.4	Durchbruchsversagen A	2.2	2.5	ja
		3	40	480	87.2	84.0	84.0	87.2	84.0	84.0	117.3	Durchbruchsversagen A	2.7	3.4	ja
		4	32	473	80.0	60.0	60.0	80.0	60.0	60.0	85.4	Durchbruchsversagen A	1.9	1.7	ja
		5	40	450	41.7	38.3	38.3	71.3	69.0	69.0	79.3	Durchbruchsversagen A	1.4	1.7	ja
		6	40	461	64.6	53.6	53.6	75.7	65.3	65.3	88.8	Durchbruchsversagen A	2.5	2.1	ja

1) Erläuterung zu den Versagensarten

Durchbruchsversagen A: Durchbruchsversagen dem eine Rißentwicklung mit Durchriß an einer oder beiden Durchbruchsseiten voranging

Durchbruchsversagen B: Durchbruchsversagen, wobei vor dem globalen Versagen kein Durchriß an einer der beiden Durchbruchsseiten auftrat

Durchbruchs- und Biegeversagen: Biegezugversagen im mittleren Trägerbereich und Durchriß am Durchbruch trat gleichzeitig auf

Biegeversagen: Träger versagte infolge Biegung im mittleren Trägerbereich

2) d.h. für die weitere Durchbruchsauswertung verwendet

Tabelle 6: Zusammenstellung der wichtigsten Versuchsergebnisse der Träger der Testseriengruppe 450_5h_d/h; (Rohdichten, Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten, Versagensart, maximale relative Rißlänge)

Testserie	d/h	Nummer	Lam.-dicke	Rohdichte ρ_{12}	Anrißblast			Durchrißblast			Höchstlast	Versagensart 1)	L _{rel,max} Durchbruchseite		auswertbar 2)
					Durchbruchseite		min. Anrißlast	Durchbruchseite		min. Durchrißlast			AN	AF	
					AN	AF		AN	AF						
-	-	-	mm	kg/m ³	kN	kN	kN	kN	kN	kN	-	-	-		
450_5h_0.3	0.3	1	32	471	42.0	50.6	42.0	58.5	58.5	58.5	58.5	Durchbruchsversagen B	0.0	0.0	ja
		2	32	453	-	-	-	-	-	-	43.2	Biegeversagen	-	-	nein
		3	32	485	70.2	59.8	59.8	70.2	70.0	70.0	70.2	Durchbruchsversagen A	0.0	1.1	ja
		4	39	499	56.1	12.7	12.7	68.1	52.4	52.4	68.1	Durchbruchsversagen A	0.0	0.4	ja
		5	39	486	53.6	36.9	36.9	54.8	54.8	54.8	54.8	Durchbruchs- und Biegeversagen	0.0	0.0	ja
		6	39	487	47.7	22.1	22.1	56.4	54.1	54.1	65.6	Durchbruchsversagen A	0.7	2.0	ja
450_5h_0.4	0.4	1	41	423	-	-	-	-	-	-	42.0	Biegeversagen	-	-	nein
		2	41	415	-	-	-	-	-	-	44.5	Biegeversagen	-	-	nein
		3	41	423	61.0	45.8	45.8	61.0	50.0	50.0	61.0	Durchbruchsversagen A	0.0	0.5	ja
		4	41	415	-	-	-	-	-	-	44.0	Biegeversagen	-	-	nein
		5	41	429	57.8	63.5	57.8	63.5	63.5	63.5	63.5	Durchbruchs- und Biegeversagen	0.0	0.0	ja
		6	33	382	40.1	43.0	40.1	43.8	43.8	43.8	44.0	Durchbruchsversagen A	1.8	0.7	ja
		7	33	389	48.0	35.8	35.8	48.0	46.7	46.7	48.0	Durchbruchsversagen A	0.0	1.3	ja
		8	33	415	50.7	45.0	45.0	57.5	46.7	46.7	57.5	Durchbruchsversagen A	0.0	0.5	ja
		9	33	407	48.0	29.8	29.8	48.0	42.0	42.0	48.0	Durchbruchsversagen A	0.0	1.6	ja

- 1) Erläuterung zu den Versagensarten
 Durchbruchsversagen A: Durchbruchsversagen dem eine Rißentwicklung mit Durchriß an einer oder beiden Durchbruchseiten voranging
 Durchbruchsversagen B: Durchbruchsversagen, wobei vor dem globalen Versagen kein Durchriß an einer der beiden Durchbruchseiten auftrat
 Durchbruchs- und Biegeversagen: Biegezugversagen im mittleren Trägerbereich und Durchriß am Durchbruch trat gleichzeitig auf
 Biegeversagen: Träger versagte infolge Biegung im mittleren Trägerbereich
- 2) d.h. für die weitere Durchbruchsauswertung verwendet

Tabelle 7: Zusammenstellung der wichtigsten Versuchsergebnisse der Träger der Testseriengruppe 900_5h_d/h; (Rohdichten, Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten, Versagensart, maximale relative Rißlänge)

Test-serie	d/h	Num-mer	Lam.-dicke	Roh-dichte ρ_{12}	Anrißblast			Durchrißblast			Höchst-last	Versagensart 1)	L _{rel,max} Durchbruchsseite		aus-wert-bar 2)
					Durchbruchsseite AN	AF	min. Anriß-last	Durchbruchsseite AN	AF	min. Durchriß-last			AN	AF	
-	-	-	mm	kg/m ³	kN	kN	kN	kN	kN	kN	-	-	-	-	
900_5h_0.2	0.2	1	39	480	-	62.7	62.7	-	107.1	107.1	107.1	Durchbruchs- und Biegeversagen	0.0	0.0	ja
		2	41	450	-	-	-	-	-	-	101.4	Biegeversagen	-	-	ja
		3	41	418	-	-	-	-	-	-	74.7	Biegeversagen	-	-	nein
		4	34	428	-	89.5	89.5	-	126.4	126.4	126.4	Durchbruchs- und Biegeversagen	0.0	0.0	ja
		5	34	461	99.0	47.0	47.0	99.0	90.6	90.6	99.0	Durchbruchs- und Biegeversagen	0.0	0.3	ja
900_5h_0.3	0.3	1	40	463	68.5	35.5	35.5	74.5	48.0	48.0	95.6	Durchbruchsversagen A	0.8	1.1	ja
		2	40	444	64.1	46.3	46.3	64.1	50.9	50.9	74.1	Durchbruchsversagen A	1.1	0.5	ja
		3	40	462	61.8	38.0	38.0	61.8	50.0	50.0	93.8	Durchbruchsversagen A	1.9	1.7	ja
		4	40	559	72.9	39.5	39.5	91.6	69.2	69.2	100.1	Durchbruchsversagen A	0.9	1.1	ja
		5	40	459	-	56.0	56.0	-	-	-	57.5	Biegeversagen	-	-	ja
900_5h_0.4	0.4	1	39	463	77.9	60.8	60.8	82.7	62.6	62.6	82.7	Durchbruchsversagen A	0.0	1.6	ja
		2	39	517	64.0	62.0	62.0	77.2	77.2	77.2	77.2	Durchbruchsversagen B	0.0	0.0	ja
		3	41	436	71.5	42.5	42.5	71.5	68.5	68.5	82.7	Durchbruchsversagen A	1.1	1.2	ja
		4	41	412	43.0	60.0	43.0	-	-	-	62.5	Biegeversagen	-	-	ja
		5	34	417	57.4	25.0	25.0	77.0	37.0	37.0	77.0	Durchbruchsversagen A	0.0	0.6	ja

1) Erläuterung zu den Versagensarten

Durchbruchsversagen A: Durchbruchsversagen dem eine Rißentwicklung mit Durchriß an einer oder beiden Durchbruchsseiten voranging

Durchbruchsversagen B: Durchbruchsversagen, wobei vor dem globalen Versagen kein Durchriß an einer der beiden Durchbruchsseiten auftrat

Durchbruchs- und Biegeversagen: Biegezugversagen im mittleren Trägerbereich und Durchriß am Durchbruch trat gleichzeitig auf

Biegeversagen: Träger versagte infolge Biegung im mittleren Trägerbereich

2) d.h. für die weitere Durchbruchsauswertung verwendet

Tabelle 8: Zusammenstellung der wichtigsten Versuchsergebnisse der Träger der Testseriengruppe G450_5h_d/h; (Rohdichten, Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten, Versagensart, maximale relative Rißlänge)

Test-serie	d/h	Num-mer	Lam.-dicke	Roh-dichte ρ_{12}	Anrißblast			Durchrißblast			Höchst-last	Versagensart 1)	$L_{rel,max}$ Durchbruchseite		aus-wert-bar 2)
					Durchbruchseite AN	AF	min. Anriß-last	Durchbruchseite AN	AF	min. Durchriß-last			AN	AF	
-	-	-	mm	kg/m ³	kN	kN	kN	kN	kN	kN	-	-	-	-	
G450_5h_0.4	0.4	1	33	496	17.5	14.7	14.7	46.9	44.5	44.5	46.9	Durchbruchsversagen A	0.0	0.5	ja
		2	33	471	21.6	18.7	18.7	45.5	38.4	38.4	45.5	Durchbruchsversagen A	0.0	0.6	ja
		3	33	489	35.1	12.7	12.7	42.0	30.9	30.9	42.0	Durchbruchsversagen A	0.0	0.5	ja

1) Erläuterung zu den Versagensarten

Durchbruchsversagen A: Durchbruchsversagen dem eine Rißentwicklung mit Durchriß an einer oder beiden Durchbruchseiten voranging

Durchbruchsversagen B: Durchbruchsversagen, wobei vor dem globalen Versagen kein Durchriß an einer der beiden Durchbruchseiten auftrat

Durchbruchs- und Biegeversagen: Biegezugversagen im mittleren Trägerbereich und Durchriß am Durchbruch trat gleichzeitig auf

Biegeversagen: Träger versagte infolge Biegung im mittleren Trägerbereich

2) d.h. für die weitere Durchbruchsauswertung verwendet

Tabelle 9: Zusammenstellung der wichtigsten Versuchsergebnisse der Träger der Testseriengruppe G900_5h_d/h; (Rohdichten, Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten, Versagensart, maximale relative Rißlänge)

Test-serie	d/h	Num-mer	Lam.-dicke	Roh-dichte ρ_{12}	Anrißblast			Durchrißblast			Höchst-last	Versagensart 1)	$L_{rel,max}$ Durchbruchseite		aus-wert-bar 2)
					Durchbruchseite AN	AF	min. Anriß-last	Durchbruchseite AN	AF	min. Durchriß-last			AN	AF	
-	-	-	mm	kg/m ³	kN	kN	kN	kN	kN	kN	-	-	-	-	
G900_5h_0.4	0.4	1	33	507	71.9	18.0	18.0	71.9	36.0	36.0	71.9	Durchbruchsversagen A	0.0	2.3	ja
		2	33	442	58.8	43.7	43.7	58.8	43.7	43.7	58.8	Durchbruchsversagen A	0.0	0.9	ja
		3	33	466	-	38.8	38.8	-	69.2	69.2	69.2	Durchbruchsversagen B	0.0	0.0	ja

1) Erläuterung zu den Versagensarten

Durchbruchsversagen A: Durchbruchsversagen dem eine Rißentwicklung mit Durchriß an einer oder beiden Durchbruchseiten voranging

Durchbruchsversagen B: Durchbruchsversagen, wobei vor dem globalen Versagen kein Durchriß an einer der beiden Durchbruchseiten auftrat

Durchbruchs- und Biegeversagen: Biegezugversagen im mittleren Trägerbereich und Durchriß am Durchbruch trat gleichzeitig auf

Biegeversagen: Träger versagte infolge Biegung im mittleren Trägerbereich

2) d.h. für die weitere Durchbruchsauswertung verwendet

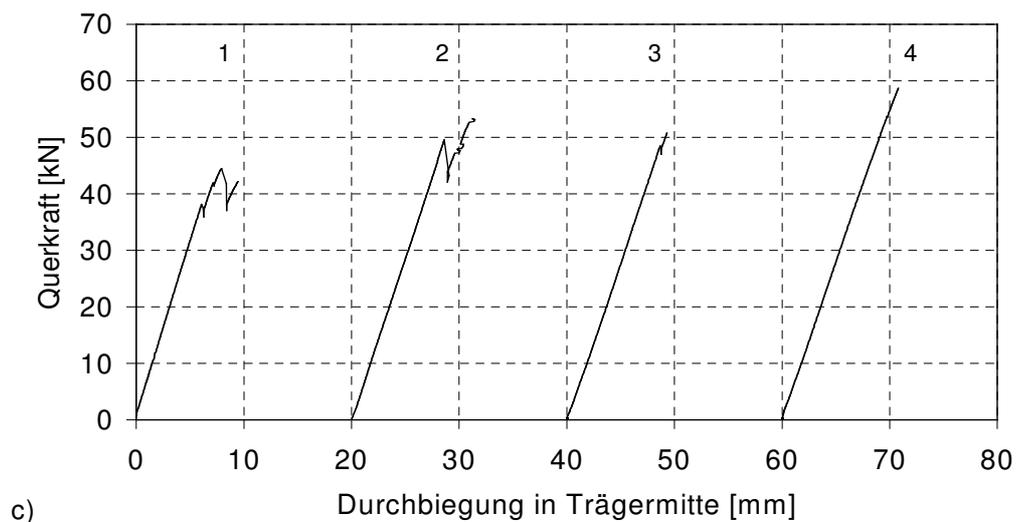
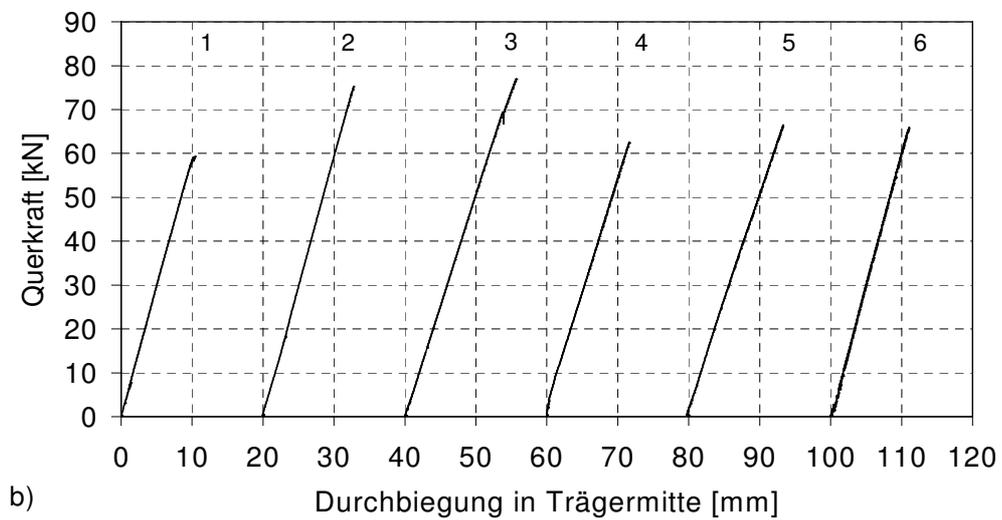
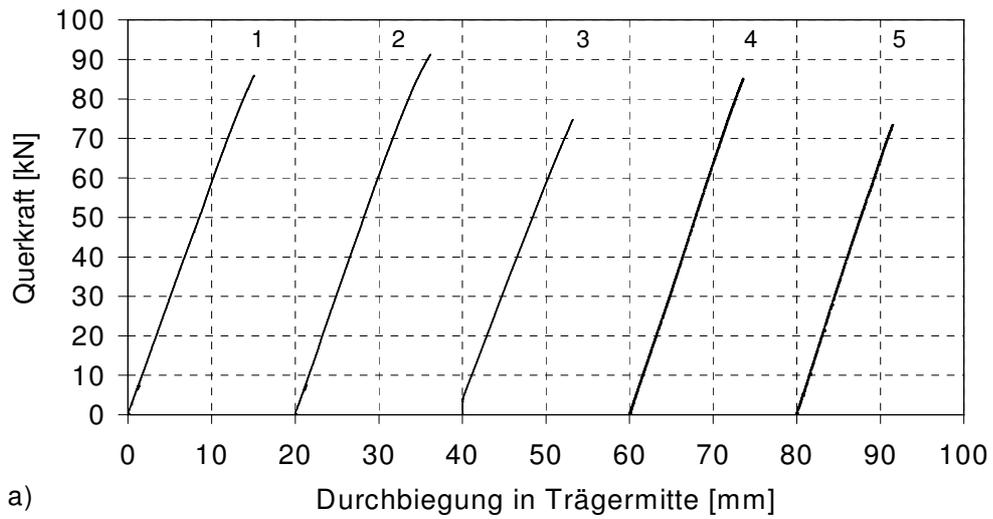


Bild 18a-c: Querkräft-Durchbiegungskurve der Testseriengruppe 450_1.5h_d/h
a) Testserie 450_1.5h_0.2 b) Testserie 450_1.5h_0.3 c) Testserie 450_1.5h_0.4

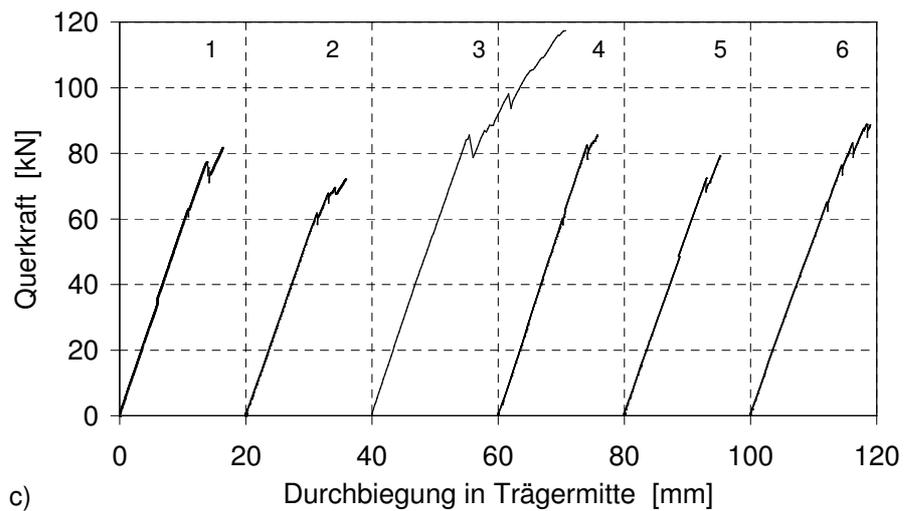
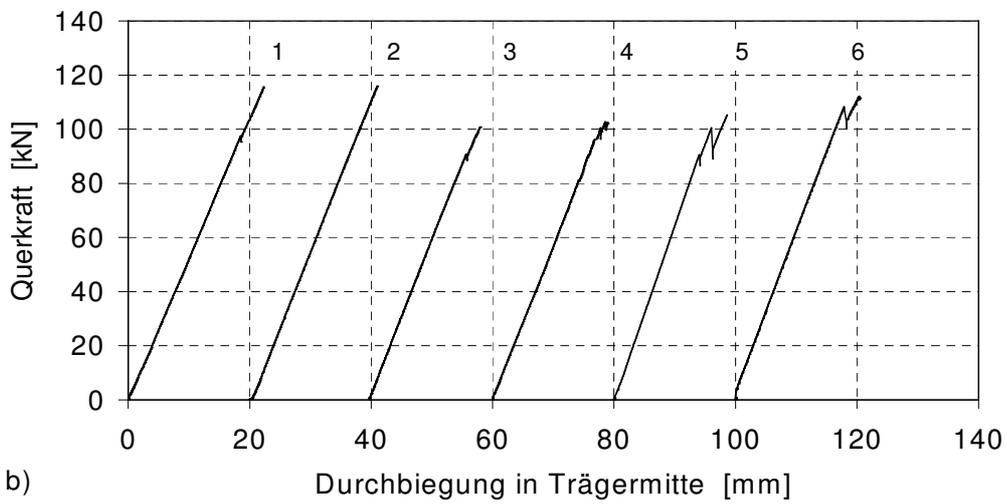
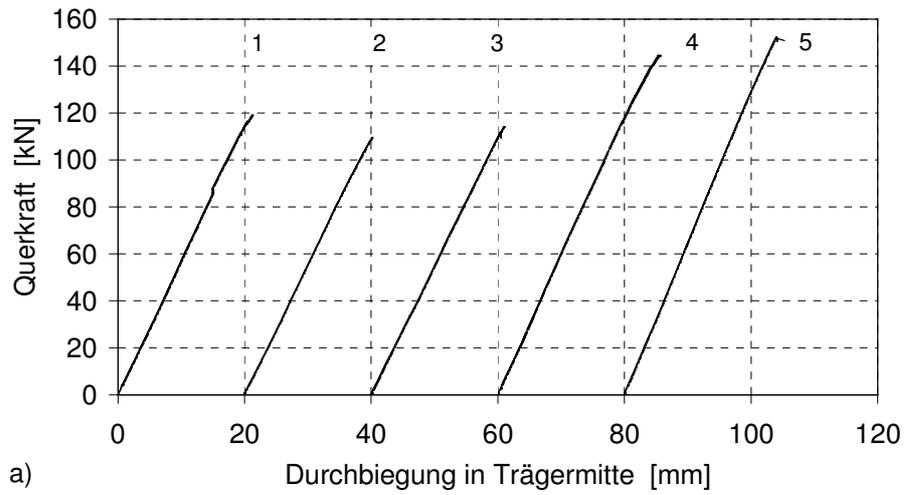


Bild 19a-c: Querkraft-Durchbiegungskurve der Testseriengruppe 900_1.5h_d/h
a) Testserie 900_1.5h_0.2 b) Testserie 900_1.5h_0.3 c) Testserie 900_1.5h_0.4

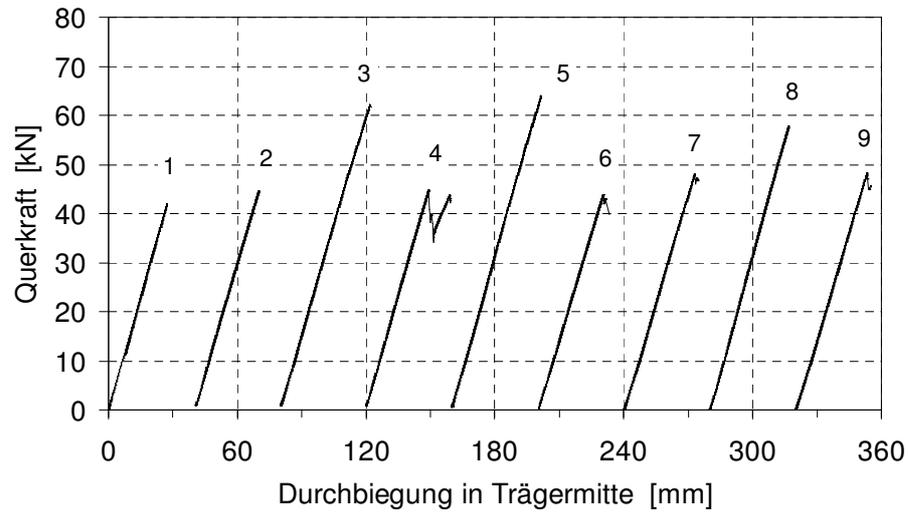
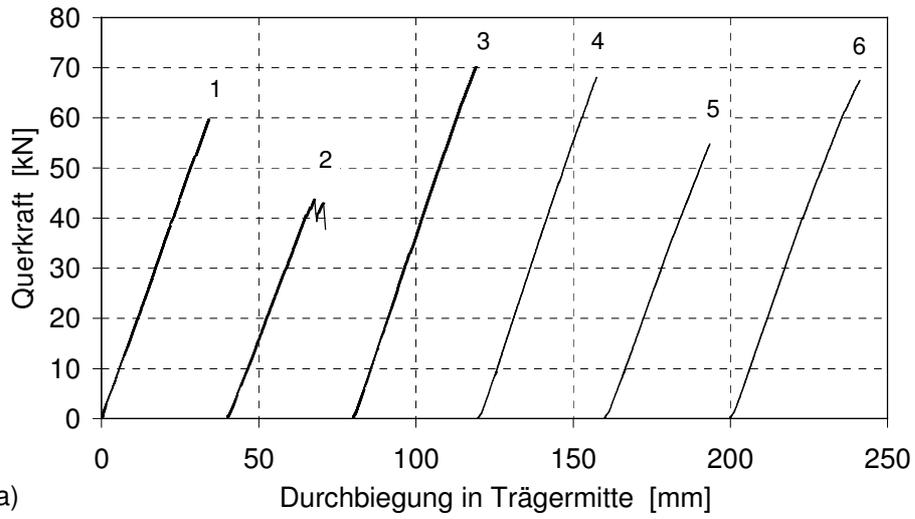


Bild 20a, b: Querkraft-Durchbiegungskurve der Testseriengruppe 450_5h_d/h
a) Testserie 450_5h_0.3 b) Testserie 450_5h_0.4

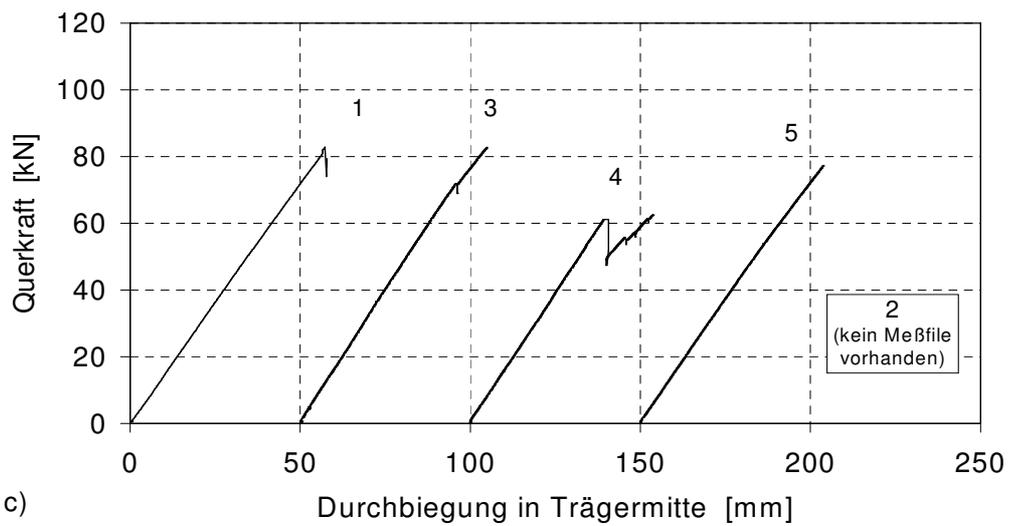
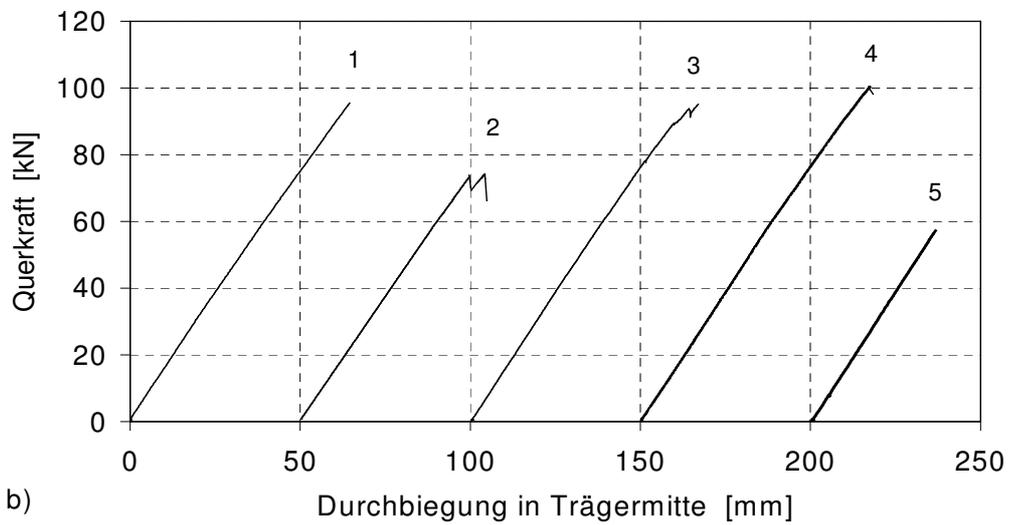
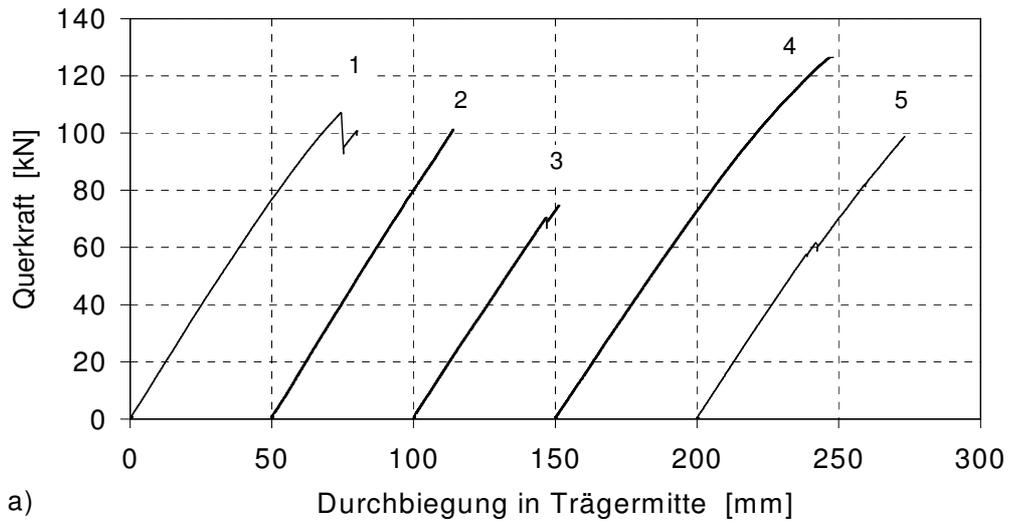
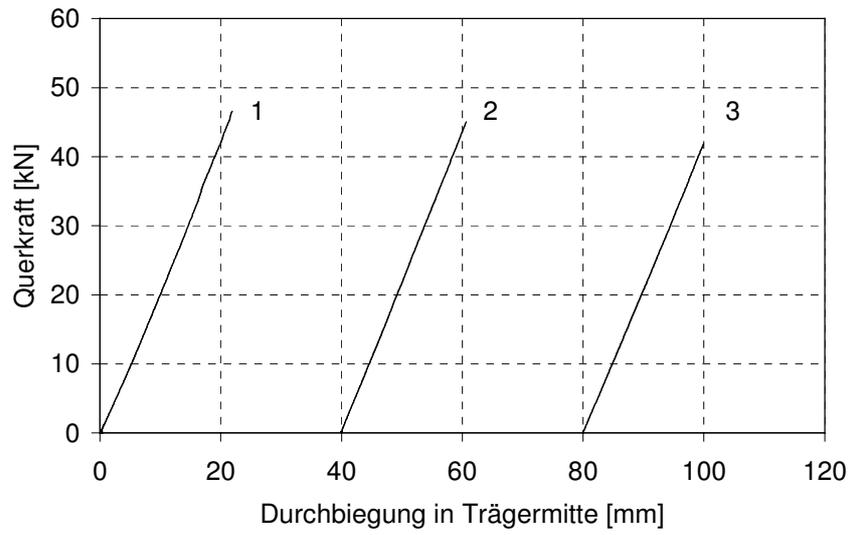
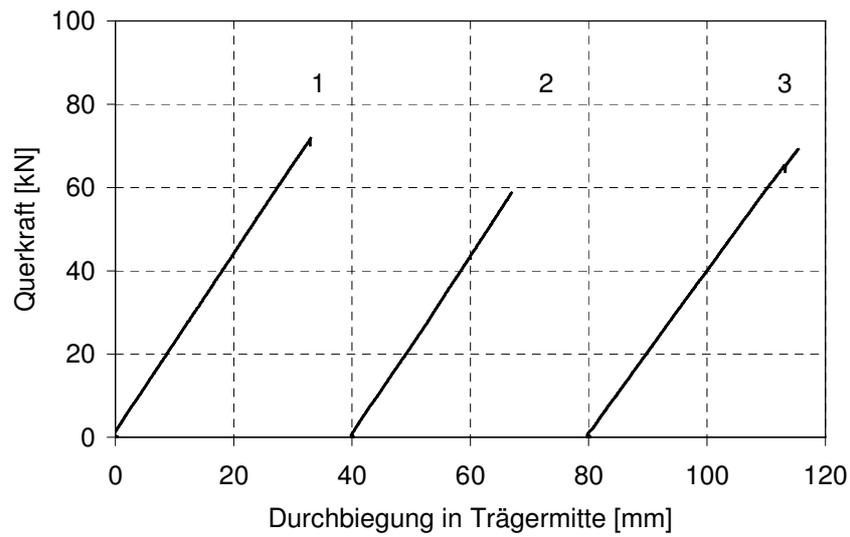


Bild 21a-c: Querkraft-Durchbiegungskurve der Testseriengruppe 900_5h_d/h
a) Testserie 900_5h_0.2 b) Testserie 900_5h_0.3 c) Testserie 900_5h_0.4



a)



b)

Bild 22a, b: Querkraft-Durchbiegungskurve der Testserien
a) G450_5h_0.4 b) G900_5h_0.4

Tabelle 10: Zusammenstellung der relativen und absoluten Rißlängen am Durchbruch (Mittelwerte der Testserien; zur Auswertung wurden alle Träger außer diejenigen die infolge Biegung versagten verwendet)

Testserien- gruppe	Testserie	relative Durch- bruchs- größe d/h	Durch- bruchs- durch- messer d	maximale relative Rißlänge am Durchbruch $L_{rel,max,D}$	maximale absolute Rißlänge am Durchbruch $L_{abs,max,D}$
-	-	-	mm	-	mm
450_1.5h_d/h	450_1.5h_0.2	0.2	90	0.5	47
	450_1.5h_0.3	0.3	135	0.5	72
	450_1.5h_0.4	0.4	180	3.1	558
900_1.5h_d/h	900_1.5h_0.2	0.2	180	1.8	317
	900_1.5h_0.3	0.3	270	2.4	654
	900_1.5h_0.4	0.4	360	2.4	858
450_5h_d/h	450_5h_0.3	0.3	135	0.7	95
	450_5h_0.4	0.4	180	1.0	171
900_5h_d/h	900_5h_0.2	0.2	180	0.1	16
	900_5h_0.3	0.3	270	1.6	424
	900_5h_0.4	0.4	360	0.8	305
G450_5h_d/h	G450_5h_0.4	0.4	180	0.5	96
G900_5h_d/h	G900_5h_0.4	0.4	360	1.1	384

Tabelle 11: Zusammenstellung der Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten der für die Auswertung verwendeten Träger der Testseriengruppe 450_1.5h_d/h

Test- serie	d/h	Num- mer	Lam- dicke	Roh- dicke ρ_{12}	Anrißblast			Durchrißblast			Höchst- last	Durch- rißblast/ Höchst- last
					Durchbruchseite		min. Anriß- last	Durchbruchseite		min. Durchriß- last		
					AN	AF		AN	AF			
-	-	-	mm	kg/m ³	kN	kN	kN	kN	kN	kN	-	
450_1.5h_0.2	0.2	1	40	506	85.5	82.5	82.5	85.5	85.5	85.5	85.5	1.00
		2	40	552	77.0	91.1	77.0	91.1	91.1	91.1	91.1	1.00
		3	40	485	70.9	51.0	51.0	74.6	74.6	74.6	74.6	1.00
		4	40	518	60.0	53.5	53.5	85.4	77.6	77.6	85.4	0.91
		5	32	489	50.2	53.6	50.2	55.1	57.2	55.1	73.8	0.75
Mittelwert			[kN]	510	68.7	66.3	62.8	78.3	77.2	76.8	82.1	0.93
Standartabw.			[kN]	27	13.9	19.0	15.6	14.3	12.9	13.8	7.6	0.11
Variationskoeff.			[%]	5.3	20.2	28.6	24.9	18.3	16.8	17.9	9.2	11.9
450_1.5h_0.3	0.3	1	32	488	56.0	41.0	41.0	59.0	52.5	52.5	59.3	0.89
		2	40	509	45.2	48.3	45.2	75.0	75.0	75.0	75.0	1.00
		3	40	527	38.1	69.4	38.1	77.2	69.4	69.4	77.2	0.90
		4	40	529	62.6	62.6	62.6	62.6	62.6	62.6	62.6	1.00
		5	40	497	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7	1.00
		6	32	490	49.9	30.9	30.9	66.5	66.5	66.5	66.5	1.00
Mittelwert			[kN]	507	53.1	53.2	47.4	67.8	65.4	65.4	67.9	0.96
Standartabw.			[kN]	17	10.8	15.5	14.2	7.0	7.6	7.6	7.0	0.06
Variationskoeff.			[%]	3.4	20.3	29.2	30.0	10.4	11.5	11.5	10.3	5.8
450_1.5h_0.4	0.4	1	40	511	30.3	34.0	30.3	41.8	38.3	38.3	44.5	0.86
		2	40	466	27.0	37.0	27.0	45.0	50.0	45.0	53.4	0.84
		3	40	463	38.0	48.3	38.0	50.6	48.3	48.3	50.6	0.95
		4	40	505	56.7	43.3	43.3	58.7	58.7	58.7	58.7	1.00
Mittelwert			[kN]	486	38.0	40.7	34.6	49.0	48.8	47.6	51.8	0.91
Standartabw.			[kN]	25	13.3	6.4	7.4	7.4	8.4	8.5	5.9	0.08
Variationskoeff.			[%]	5.2	35.0	15.8	21.3	15.1	17.2	17.9	11.4	8.2

Tabelle 12: Zusammenstellung der Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten der für die Auswertung verwendeten Träger der Testseriengruppe 900_1.5h_d/h

Test- serie	d/h	Num- mer	Lam- dicke	Roh- dicke ρ_{12}	Anrißblast			Durchrißblast			Höchst- last	Durch- rißblast/ Höchst- last
					Durchbruchsseite		min. Anriß- last	Durchbruchsseite		min. Durchriß- last		
					AN	AF		AN	AF			
-	-	-	mm	kg/m ³	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	-
900_1.5h_0.2	0.2	1	40	499	88.0	62.5	62.5	112.5	88.0	88.0	119.2	0.74
		2	40	475	79.5	66.6	66.6	86.1	103.7	86.1	110.0	0.78
		3	40	464	53.0	74.3	53.0	90.0	113.4	90.0	114.2	0.79
		4	32	494	109.5	117.0	109.5	144.8	117.0	117.0	144.8	0.81
		5	40	507	102.5	54.3	54.3	152.5	150.7	150.7	152.5	0.99
Mittelwert			[kN]	488	86.5	74.9	69.2	117.2	114.6	106.4	128.1	0.82
Standartabw.			[kN]	18	22.1	24.6	23.2	30.6	23.1	27.8	19.2	0.10
Variationskoeff.			[%]	3.6	25.6	32.8	33.6	26.1	20.2	26.2	15.0	11.8
900_1.5h_0.3	0.3	1	40	462	83.7	78.8	78.8	96.0	98.1	96.0	115.8	0.83
		2	40	503	58.6	55.1	55.1	116.0	112.0	112.0	116.0	0.97
		3	40	523	72.5	66.4	66.4	93.4	90.5	90.5	100.9	0.90
		4	40	474	53.6	26.4	26.4	81.0	91.4	81.0	102.6	0.79
		5	40	496	90.9	76.9	76.9	90.9	90.9	90.9	104.9	0.87
		6	32	459	88.0	108.2	88.0	108.2	108.2	108.2	112.1	0.97
Mittelwert			[kN]	486	74.6	68.6	65.3	97.6	98.5	96.4	108.7	0.89
Standartabw.			[kN]	25	15.7	27.2	22.1	12.6	9.5	11.7	6.7	0.07
Variationskoeff.			[%]	5.2	21.0	39.7	33.9	12.9	9.6	12.1	6.2	8.1
900_1.5h_0.4	0.4	2	40	483	68.3	52.0	52.0	68.3	67.5	67.5	72.4	0.93
		3	40	480	87.2	84.0	84.0	87.2	84.0	84.0	117.3	0.72
		4	32	473	80.0	60.0	60.0	80.0	60.0	60.0	85.4	0.70
		5	40	450	41.7	38.3	38.3	71.3	69.0	69.0	79.3	0.87
		6	40	461	64.6	53.6	53.6	75.7	65.3	65.3	88.8	0.74
Mittelwert			[kN]	469	68.4	57.6	57.6	76.5	69.2	69.2	88.6	0.79
Standartabw.			[kN]	14	17.4	16.8	16.8	7.4	9.0	9.0	17.2	0.10
Variationskoeff.			[%]	2.9	25.5	29.1	29.1	9.7	13.0	13.0	19.4	13.1

Tabelle 13: Zusammenstellung der Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten der für die Auswertung verwendeten Träger der Testseriengruppe 450_5h_d/h

Test- serie	d/h	Num- mer	Lam- dicke	Roh- dicke ρ_{12}	Anrißblast			Durchrißblast			Höchst- last	Durch- rißblast/ Höchst- last	
					Durchbruchseite		min. Anriß- last	Durchbruchseite		min. Durchriß- last			
					AN	AF		AN	AF				
-	-	-	mm	kg/m ³	kN	kN	kN	kN	kN	kN	-		
450_5h_0.3	0.3	1	32	471	42.0	50.6	42.0	58.5	58.5	58.5	58.5	1.00	
		3	32	485	70.0	59.8	59.8	70.0	70.0	70.0	70.0	1.00	
		4	39	499	56.1	12.7	12.7	68.1	52.4	52.4	68.1	0.77	
		5	39	486	53.6	36.9	36.9	54.8	54.8	54.8	1)	-	
		6	39	487	47.7	22.1	22.1	56.4	54.1	54.1	65.6	0.82	
Mittelwert				[kN]	486	53.9	36.4	34.7	61.6	58.0	58.0	65.6	0.90
Standartabw.				[kN]	10	10.5	19.5	18.2	7.0	7.1	7.1	5.0	0.12
Variationskoeff.				[%]	2.0	19.6	53.4	52.6	11.4	12.2	12.2	7.7	13.3
450_5h_0.4	0.4	3	41	423	61.0	45.8	45.8	61.0	50.0	50.0	61.0	0.82	
		5	41	429	57.8	63.5	57.8	63.5	63.5	63.5	63.5	1.00	
		6	33	382	40.1	43.0	40.1	43.8	43.8	43.8	44.0	1.00	
		7	33	389	48.0	35.8	35.8	48.0	46.7	46.7	48.0	0.97	
		8	33	415	50.7	45.0	45.0	57.5	46.7	46.7	57.5	0.81	
9	33	407	48.0	29.8	29.8	48.0	42.0	42.0	48.0	0.88			
Mittelwert				[kN]	407	50.9	43.8	42.4	53.6	48.8	48.8	53.7	0.91
Standartabw.				[kN]	19	7.5	11.4	9.6	8.1	7.7	7.7	8.0	0.09
Variationskoeff.				[%]	4.6	14.8	26.1	22.7	15.1	15.8	15.8	15.0	9.6

1) Höchstlast wird nicht für die Auswertung verwendet, da der Träger infolge Biegeversagens oder infolge kombinierten Durchbruchs- und Biegeversagens versagte und der Wert der Höchstlast unter dem Mittelwert der Testserie liegt

Tabelle 14: Zusammenstellung der Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten der für die Auswertung verwendeten Träger der Testseriengruppe 900_5h_d/h

Test- serie	d/h	Num- mer	Lam.- dicke	Roh- dichte ρ_{12}	Anrißblast			Durchrißblast			Höchst- last	Durch- rißblast/ Höchst- last
					Durchbruchseite		min. Anriß- last	Durchbruchseite		min. Durchriß- last		
					AN	AF		AN	AF			
-	-	-	mm	kg/m ³	kN	kN	kN	kN	kN	kN	-	
900_5h_0.2	0.2	1	39	480	-	62.7	62.7	-	107.1	107.1	107.1	1.00
		2	41	450	-	-	-	-	-	101.4	101.4	1.00
		4	34	428	-	89.5	89.5	-	126.4	126.4	126.4	1.00
		5	34	461	99.0	47.0	47.0	99.0	90.6	90.6	1)	-
Mittelwert			[kN]	455	-	66.4	66.4	99.0	108.0	106.4	111.6	1.00
Standartabw.			[kN]	22	-	21.5	21.5	-	17.9	15.0	13.1	0.00
Variationskoeff.			[%]	4.8	-	32.4	32.4	-	16.6	14.1	11.7	0.0
900_5h_0.3	0.3	1	40	463	68.5	35.5	35.5	74.5	48.0	48.0	95.6	0.50
		2	40	444	64.1	46.3	46.3	64.1	50.9	50.9	74.1	0.69
		3	40	462	61.8	38.0	38.0	61.8	50.0	50.0	93.8	0.53
		4	40	559	72.9	39.5	39.5	91.6	69.2	69.2	100.1	0.69
		5	40	459	-	56.0	56.0	-	-	57.5	1)	-
Mittelwert			[kN]	477	66.8	43.1	43.1	73.0	54.5	55.1	90.9	0.60
Standartabw.			[kN]	46	4.9	8.3	8.3	13.6	9.9	8.6	11.5	0.10
Variationskoeff.			[%]	9.7	7.4	19.2	19.2	18.6	18.1	15.7	12.7	16.6
900_5h_0.4	0.4	1	39	463	77.9	60.8	60.8	82.7	62.6	62.6	82.7	0.76
		2	39	517	64.0	62.0	62.0	77.2	77.2	77.2	77.2	1.00
		3	41	436	71.5	42.5	42.5	71.5	68.5	68.5	82.7	0.83
		4	41	412	43.0	60.0	43.0	-	-	62.5	1)	-
		5	34	417	57.4	25.0	25.0	77.0	37.0	37.0	77.0	0.48
Mittelwert			[kN]	449	62.8	50.1	46.7	77.1	61.3	61.6	79.9	0.77
Standartabw.			[kN]	43	13.5	16.1	15.3	4.6	17.3	15.0	3.2	0.22
Variationskoeff.			[%]	9.5	21.5	32.2	32.8	5.9	28.2	24.4	4.0	28.2

1) Höchstlast wird nicht für die Auswertung verwendet, da der Träger infolge Biegeversagens oder infolge kombinierten Durchbruchs- und Biegeversagens versagte und der Wert der Höchstlast unter dem Mittelwert der Testserie liegt

Tabelle 15: Zusammenstellung der Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten der für die Auswertung verwendeten Träger der Testseriengruppe G450_5h_d/h

Test- serie	d/h	Num- mer	Lam.- dicke	Roh- dichte ρ_{12}	Anrißlast			Durchrißlast			Höchst- last	Durch- rißlast/ Höchst- last
					Durchbruchseite		min. Anriß- last	Durchbruchseite		min. Durchriß- last		
					AN	AF		AN	AF			
-	-	-	mm	kg/m ³	kN	kN	kN	kN	kN	kN	-	
G450_ 5h_0.4	0.4	1	34	496	17.5	14.7	14.7	46.9	44.5	44.5	46.9	0.95
		2	34	471	21.6	18.7	18.7	45.5	38.4	38.4	45.5	0.84
		3	34	489	35.1	12.7	12.7	42.0	30.9	30.9	42.0	0.74
Mittelwert			[kN]	485	24.7	15.4	15.4	44.8	37.9	37.9	44.8	0.84
Standartabw.			[kN]	13	9.2	3.1	3.1	2.5	6.8	6.8	2.5	0.11
Variationskoeff.			[%]	2.7	37.2	19.9	19.9	5.6	17.9	17.9	5.6	12.6

Tabelle 16: Zusammenstellung der Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten der für die Auswertung verwendeten Träger der Testseriengruppe G900_5h_d/h

Test- serie	d/h	Num- mer	Lam.- dicke	Roh- dichte ρ_{12}	Anrißlast			Durchrißlast			Höchst- last	Durch- rißlast/ Höchst- last
					Durchbruchseite		min. Anriß- last	Durchbruchseite		min. Durchriß- last		
					AN	AF		AN	AF			
-	-	-	mm	kg/m ³	kN	kN	kN	kN	kN	kN	-	
G900_ 5h_0.4	0.4	1	33	507	71.9	18.0	18.0	71.9	36.0	36.0	71.9	0.50
		2	33		58.8	43.7	43.7	58.8	43.7	43.7	58.8	0.74
		3	33	466	-	38.8	38.8	-	69.2	69.2	69.2	1.00
Mittelwert			[kN]	487	65.4	33.5	33.5	65.4	49.6	49.6	66.6	0.75
Standartabw.			[kN]	29	9.3	13.6	13.6	9.3	17.4	17.4	6.9	0.25
Variationskoeff.			[%]	6.0	14.2	40.7	40.7	14.2	35.0	35.0	10.4	33.4

Tabelle 17: Zusammenstellung der Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten aller Testserien

Testserien- gruppe	Testserie	Anzahl der Prüf- körper	mittlere Roh- dichte ρ_{12}	Anrißlast		Durchrißlast		Höchstlast		Verhältnis	
				Mittel- wert	Var.- koeff.	Mittel- wert	Var.- koeff.	Mittel- wert	Var.- koeff.	Anrißlast/ Höchstlast	Durchrißlast/ Höchstlast
-	-	-	kg/m ³	kN	%	kN	%	kN	%	-	-
450_1.5h_d/h	450_1.5h_0.2	5	510	62.8	24.9	76.8	17.9	82.1	9.2	0.76	0.94
	450_1.5h_0.3	6	507	47.4	30.0	65.4	11.5	67.9	10.3	0.70	0.96
	450_1.5h_0.4	4	486	34.6	21.3	47.6	17.9	51.8	11.4	0.67	0.92
900_1.5h_d/h	900_1.5h_0.2	5	488	69.2	33.6	106.4	26.2	128.1	15.0	0.54	0.83
	900_1.5h_0.3	6	486	65.3	33.9	96.4	12.1	108.7	6.2	0.60	0.89
	900_1.5h_0.4	5	469	57.6	29.1	69.2	13.0	88.6	19.4	0.65	0.78
450_5h_d/h	450_5h_0.3	5	486	34.7	52.6	58.0	12.2	65.6	7.7	0.53	0.88
	450_5h_0.4	6	407	42.4	22.7	48.8	15.8	53.7	15.0	0.79	0.91
900_5h_d/h	900_5h_0.2	4	455	66.4	32.4	106.4	14.1	116.6	11.7	0.57	0.91
	900_5h_0.3	5	477	43.1	19.2	55.1	15.7	90.9	12.7	0.47	0.61
	900_5h_0.4	5	449	46.7	32.8	61.6	24.4	79.9	4.0	0.58	0.77
G450_5h_d/h	G450_5h_0.4	3	485	15.4	19.9	37.9	17.9	44.8	5.6	0.34	0.85
G900_5h_d/h	G900_5h_0.4	3	472	33.5	40.7	49.6	35.0	66.6	10.4	0.50	0.74

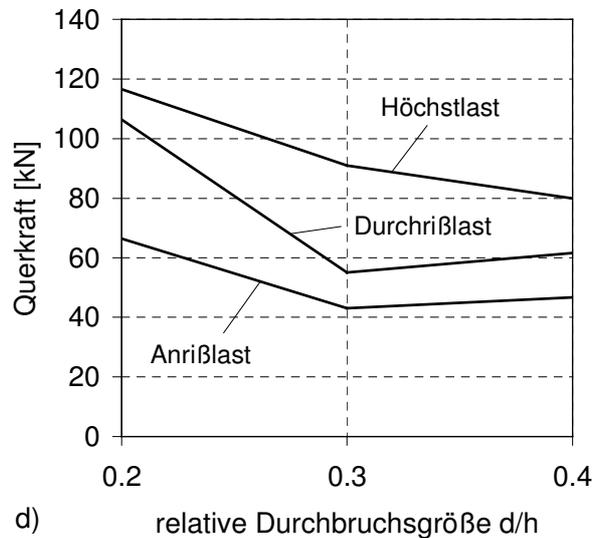
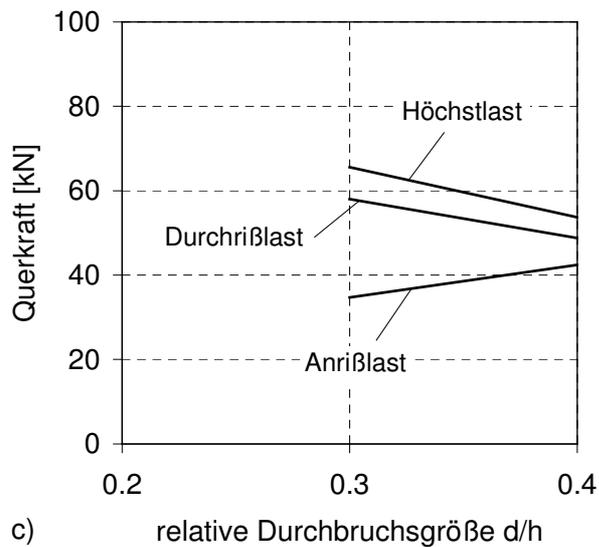
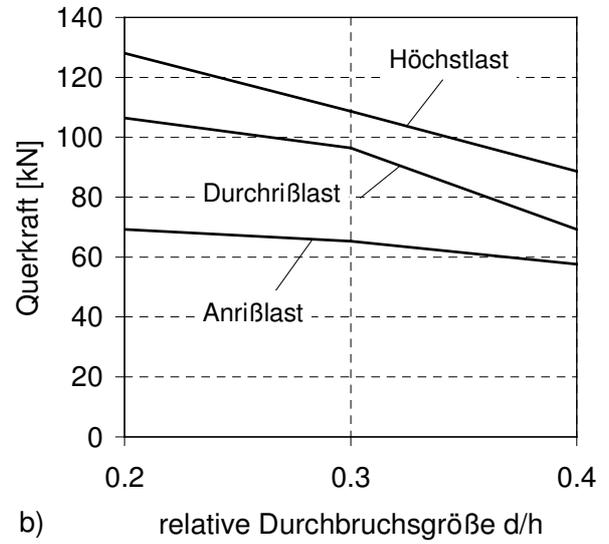
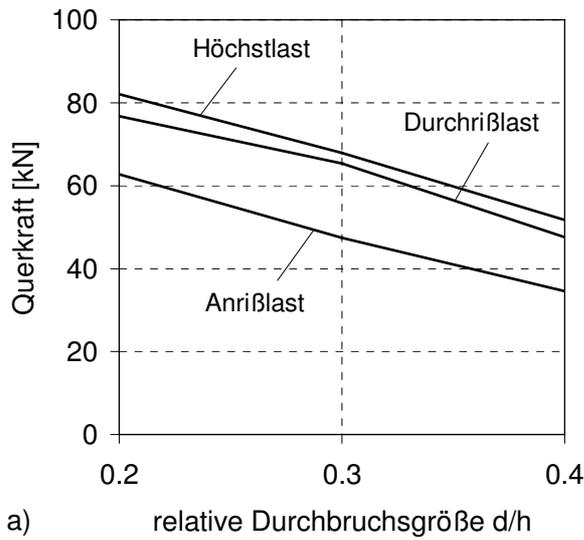


Bild 23a-d: Testserien-Mittelwerte der Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße d/h
 a) für die Testseriengruppe 450_1.5h_d/h
 b) für die Testseriengruppe 900_1.5h_d/h
 c) für die Testseriengruppe 450_5h_d/h
 d) für die Testseriengruppe 900_5h_d/h

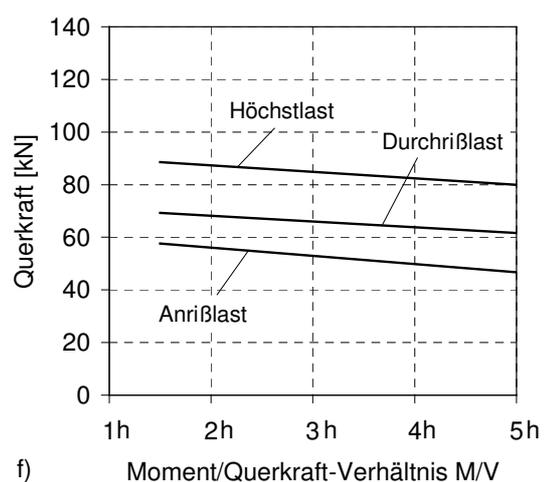
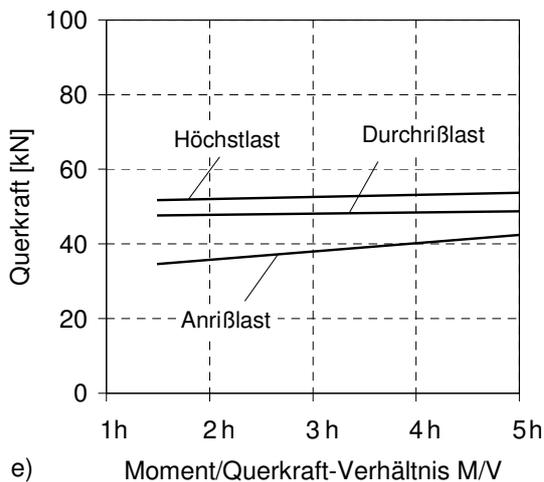
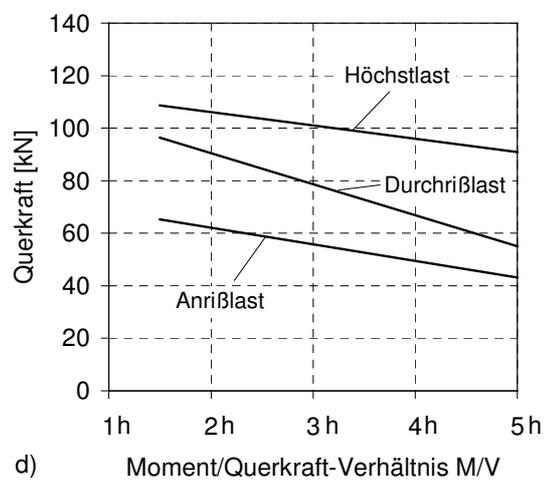
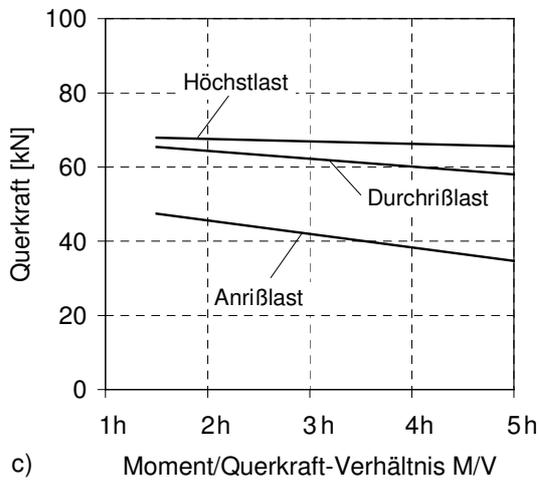
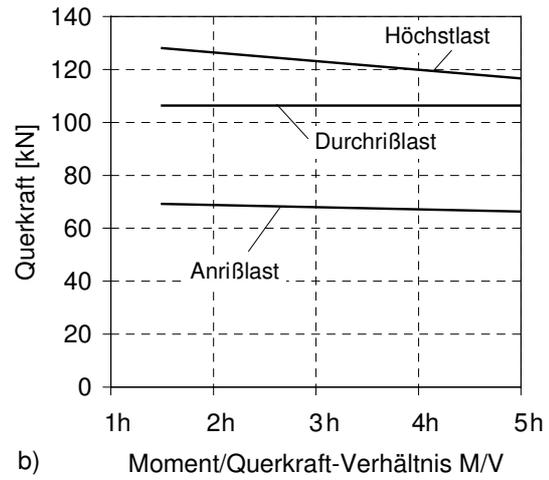
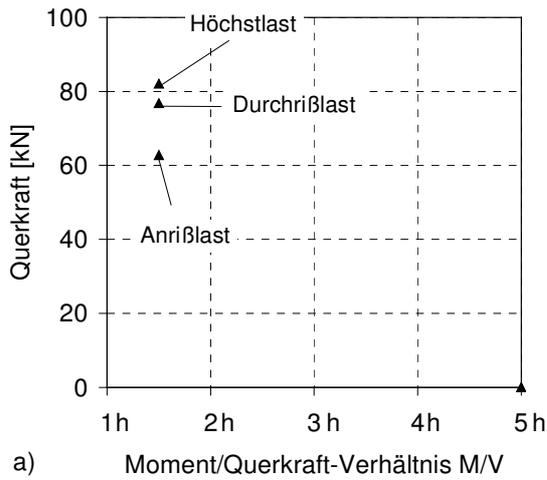


Bild 24a-f: Testserien-Mittelwerte der Anriß-, Durchriß- und Höchstlasten in Abhängigkeit vom Moment/Querkraft-Verhältnis M/V für die Testserien

a) 450_1.5h_0.2 und 450_5h_0.2

b) 900_1.5h_0.2 und 900_5h_0.2

c) 450_1.5h_0.3 und 450_5h_0.3

d) 900_1.5h_0.3 und 900_5h_0.3

e) 450_1.5h_0.4 und 450_5h_0.4

f) 900_1.5h_0.4 und 900_5h_0.4

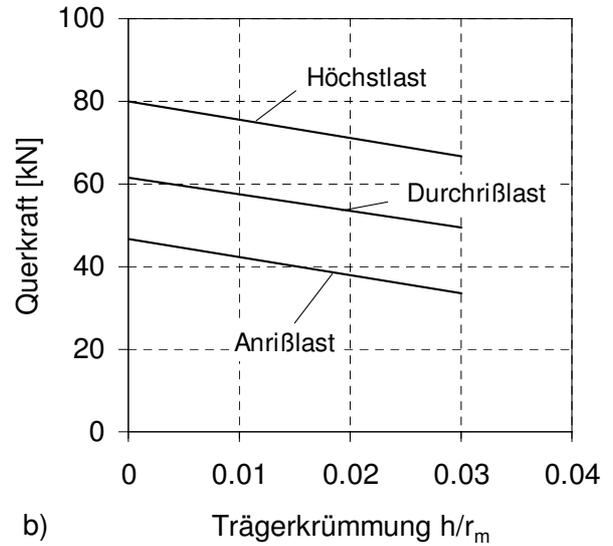
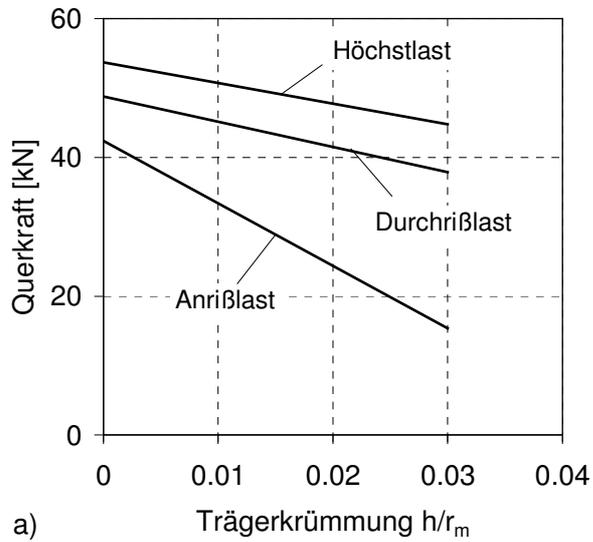


Bild 25a, b: Testserien-Mittelwerte der Anriß-, Durchriß- und Höchstlast in Abhängigkeit von der Trägerkrümmung für die Testserien

a) 450_5h_0.4 und G450_5h_0.4

b) 900_5h_0.4 und G900_5h_0.4

Tabelle 18: Zusammenstellung der Durchrißlasten aller Testserien

Testserien- gruppe	Testserie	relative Durch- bruchs- größe d/h	Anzahl der Prüf- körper	mittlere Roh- dichte ρ_{12}	Mittel- wert \bar{x}	Stabw. s	Var.- koeff. V	Durchrißlast		Ver- hältnis $\frac{X_{5,konst}}{X_{5,ind}}$
								5%-Fraktile (Gaußverteilung) individuell $X_{5,ind}$	mit einheitlichem Var.-koeff. V = 18.0% $X_{5,konst}$	
-	-	-	-	kg/m ³	kN	kN	%	kN	kN	-
450_1.5h_d/h	450_1.5h_0.2	0.2	5	510	76.8	13.8	17.9	54.2	54.1	1.00
	450_1.5h_0.3	0.3	6	507	65.4	7.6	11.5	53.0	46.0	0.87
	450_1.5h_0.4	0.4	4	486	47.6	8.5	17.9	33.6	33.5	1.00
900_1.5h_d/h	900_1.5h_0.2	0.2	5	488	106.4	27.8	26.2	60.6	74.9	1.24
	900_1.5h_0.3	0.3	6	486	96.4	11.7	12.1	77.2	67.9	0.88
	900_1.5h_0.4	0.4	5	473	69.2	9.0	13.0	54.4	48.7	0.90
450_5h_d/h	450_5.0h_0.3	0.3	5	486	58.0	7.1	12.2	46.3	40.8	0.88
	450_5.0h_0.4	0.4	6	407	48.8	7.7	15.8	36.1	34.4	0.95
900_5.0h_d/h	900_5.0h_0.2	0.2	4	455	106.4	15.0	14.1	81.7	74.9	0.92
	900_5.0h_0.3	0.3	5	477	55.1	8.6	15.7	40.9	38.8	0.95
	900_5.0h_0.4	0.4	5	499	61.6	15.0	24.4	36.9	43.4	1.18
G450_5.0h_d/h	G450_5.0h_0.4	0.4	3	485	37.9	6.8	17.9	26.7	26.7	1.00
G900_5.0h_d/h	G900_5.0h_0.4	0.4	3	472	49.6	17.4	35.0	21.1	34.9	1.65

Tabelle 19: Zusammenstellung der Höchstlasten aller Testserien

Testserien- gruppe	Testserie	relative Durch- bruchs- größe d/h	Anzahl der Prüf- körper	mittlere Roh- dichte ρ_{12}	Mittel- wert \bar{x}	Stabw. s	Var.- koeff. V	Höchstlast		Ver- hältnis $\frac{X_{5,konst}}{X_{5,ind}}$
								5%-Fraktile (Gaußverteilung) individuell $X_{5,ind}$	mit einheitlichem Var.-koeff. V = 10.7% $X_{5,konst}$	
-	-	-	-	kg/m ³	kN	kN	%	kN	kN	-
450_1.5h_d/h	450_1.5h_0.2	0.2	5	510	82.1	7.6	9.2	69.6	67.7	0.97
	450_1.5h_0.3	0.3	6	507	67.9	7.0	10.3	56.4	56.0	0.99
	450_1.5h_0.4	0.4	4	486	51.8	5.9	11.4	42.1	42.7	1.01
900_1.5h_d/h	900_1.5h_0.2	0.2	5	488	128.1	19.2	15.0	96.6	105.6	1.09
	900_1.5h_0.3	0.3	6	486	108.7	6.7	6.2	97.6	89.6	0.92
	900_1.5h_0.4	0.4	5	473	88.6	17.2	19.4	60.4	73.0	1.21
450_5h_d/h	450_5.0h_0.3	0.3	4	486	65.6	5.0	7.7	57.3	54.1	0.94
	450_5.0h_0.4	0.4	6	407	53.7	8.0	15.0	40.4	44.2	1.09
900_5.0h_d/h	900_5.0h_0.2	0.2	3	455	116.6	13.1	11.7	90.1	96.1	1.07
	900_5.0h_0.3	0.3	4	477	90.9	11.5	12.7	72.0	74.9	1.04
	900_5.0h_0.4	0.4	4	499	79.9	3.2	4.0	74.6	65.8	0.88
G450_5.0h_d/h	G450_5.0h_0.4	0.4	3	485	44.8	2.5	5.6	40.6	36.9	0.91
G900_5.0h_d/h	G900_5.0h_0.4	0.4	3	472	66.6	6.9	10.4	55.3	54.9	0.99

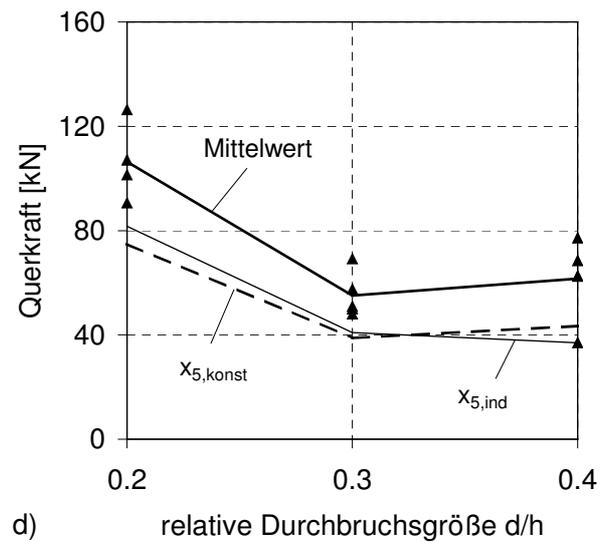
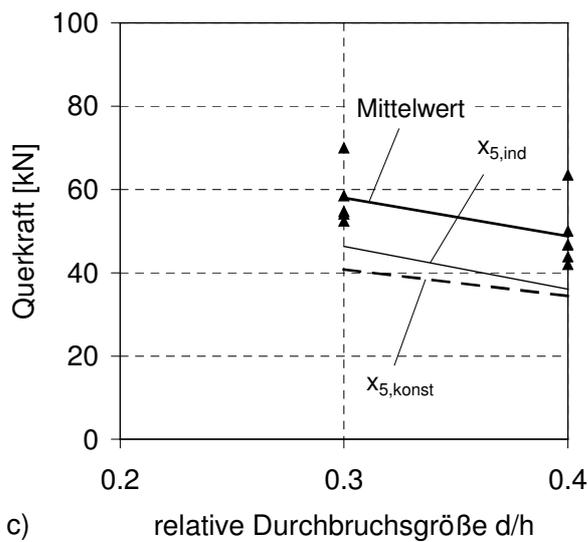
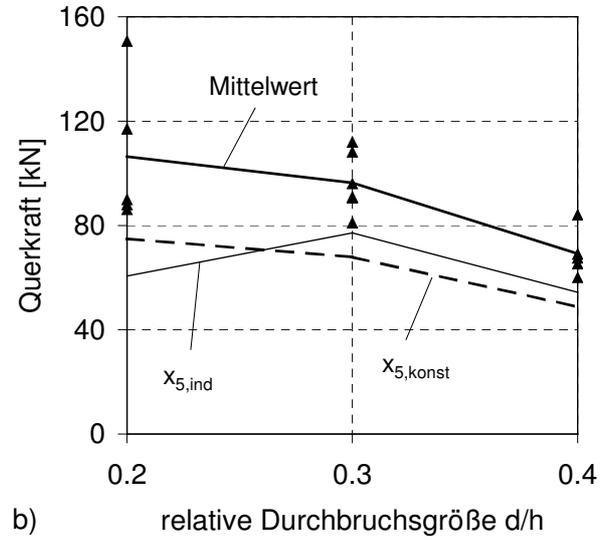
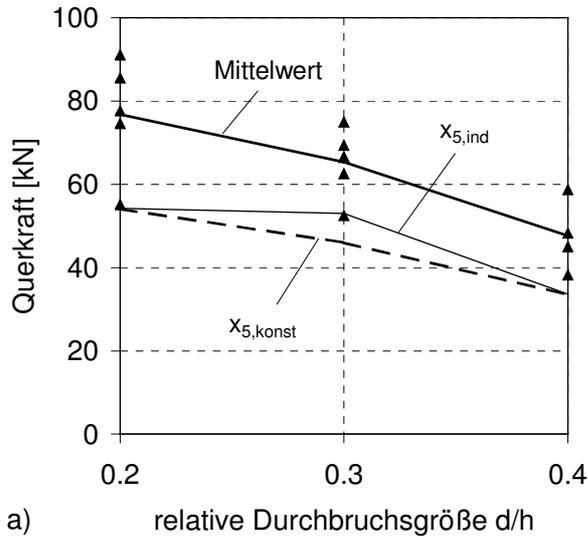


Bild 26a-d: Durchrißlasten in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße d/h ; Einzelergebnisse, Mittel- und 5%-Fraktilewerte
a) für die Testseriengruppe 450_1.5h_d/h
b) für die Testseriengruppe 900_1.5h_d/h
c) für die Testseriengruppe 450_5h_d/h
d) für die Testseriengruppe 900_5h_d/h

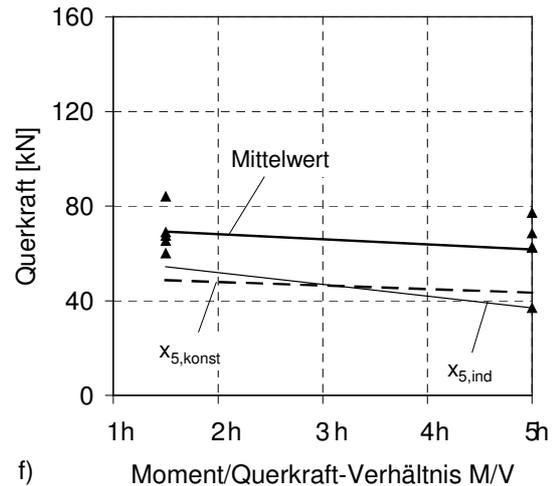
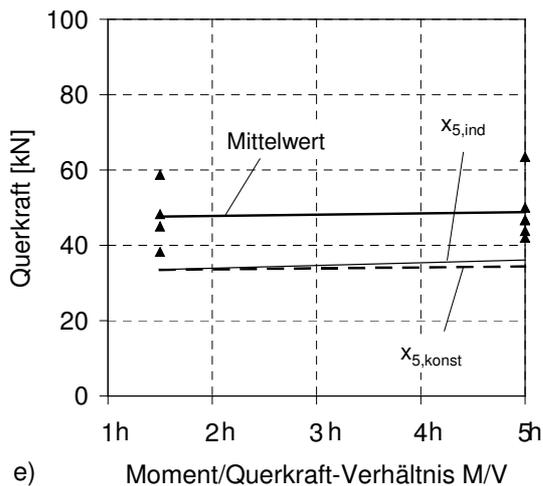
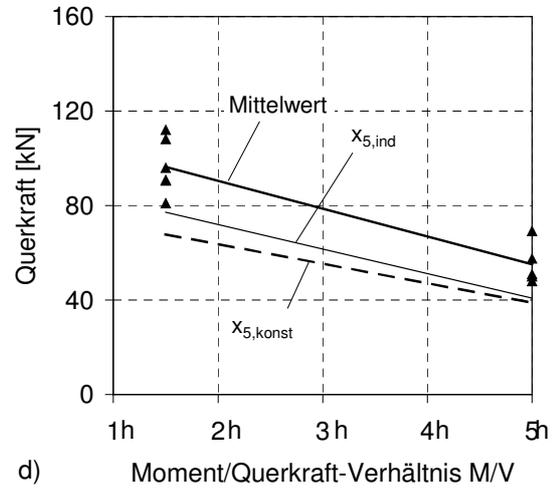
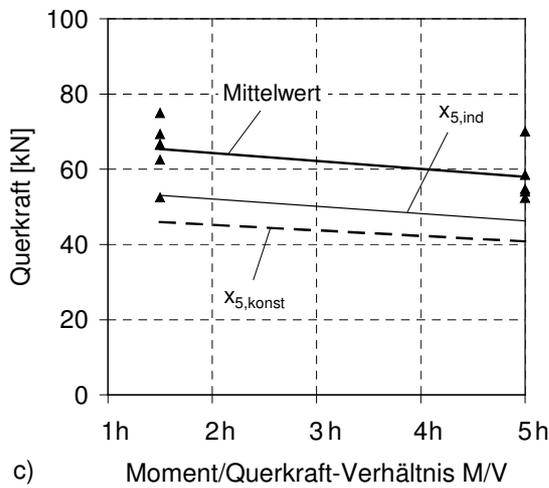
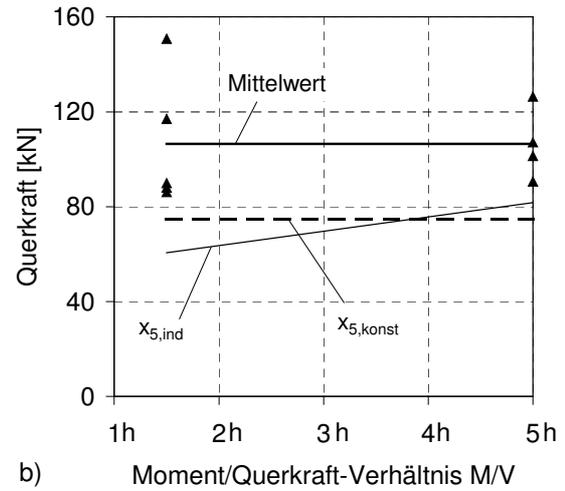
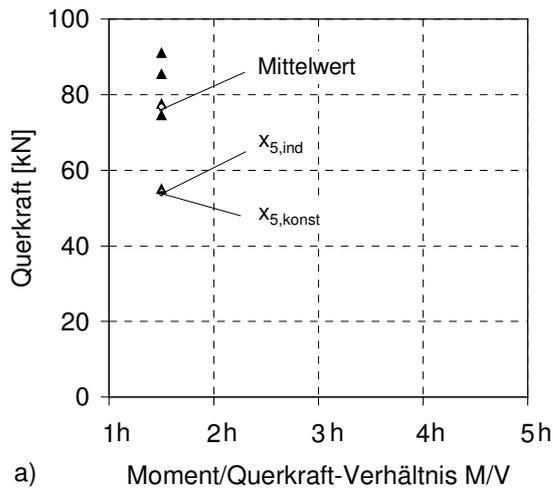
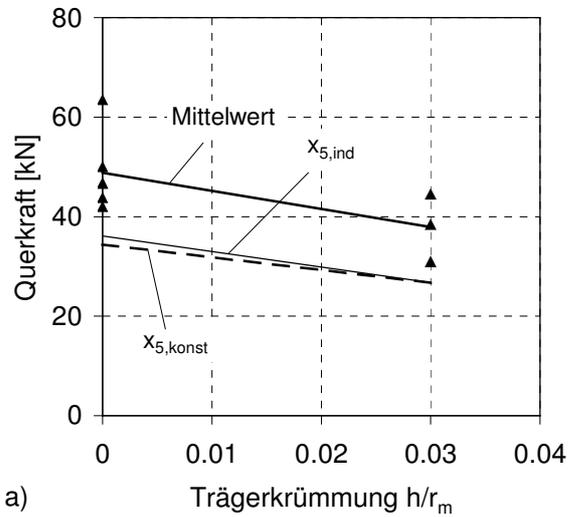
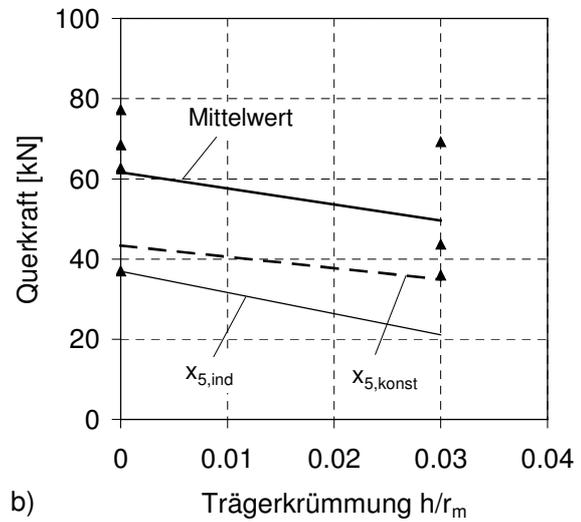


Bild 27a-f: Durchrißlasten in Abhängigkeit vom Moment/Querkraft-Verhältnis M/V; Einzelergebnisse, Mittel- und 5%-Fraktilewerte für die Testserien

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| a) 450_1.5h_0.2 und 450_5h_0.2 | b) 900_1.5h_0.2 und 900_5h_0.2 |
| c) 450_1.5h_0.3 und 450_5h_0.3 | d) 900_1.5h_0.3 und 900_5h_0.3 |
| e) 450_1.5h_0.4 und 450_5h_0.4 | f) 900_1.5h_0.4 und 900_5h_0.4 |



a)



b)

Bild 28a, b: Durchrißlasten in Abhängigkeit von der Trägerkrümmung; Einzelergebnisse, Mittel- und 5%-Fraktilewerte für die Testserien
a) 450_5h_0.4 und G450_5h_0.4 b) 900_5h_0.4 und G900_5h_0.4

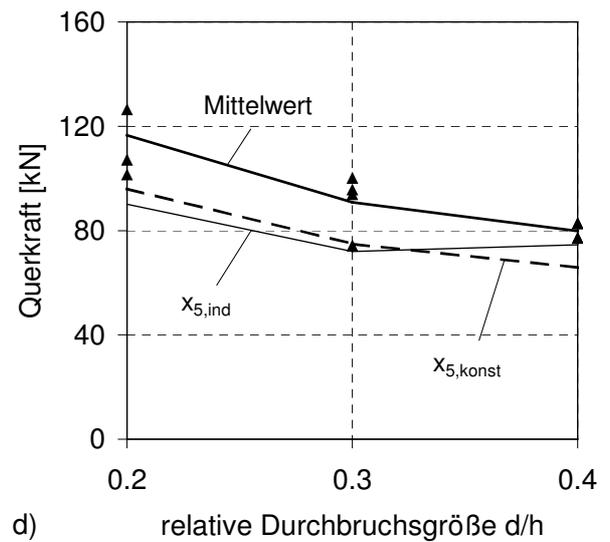
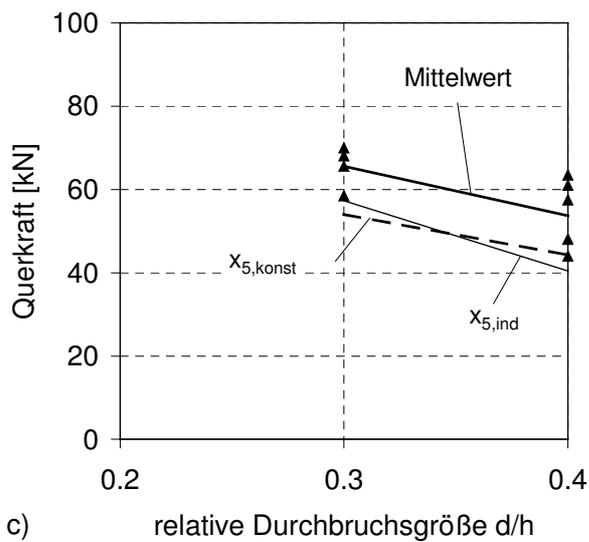
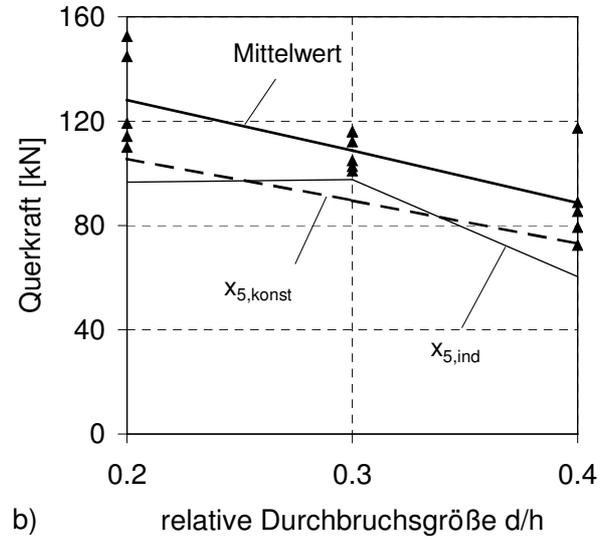
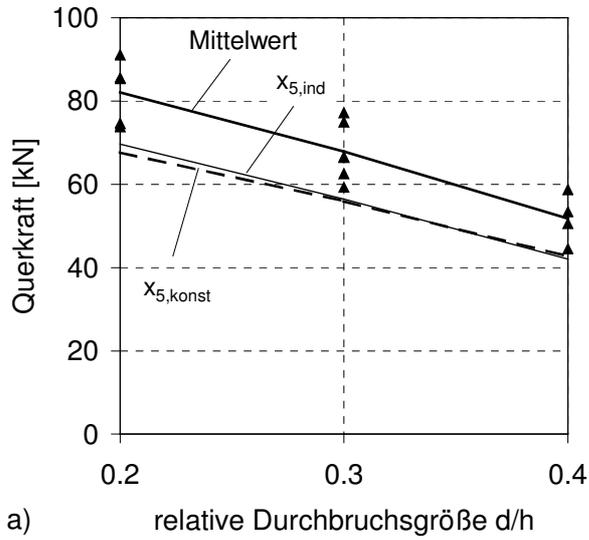


Bild 29a-d: Höchstlasten in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße d/h ; Einzelergebnisse, Mittel- und 5%-Fraktilewerte
a) für die Testseriengruppe 450_1.5h_d/h
b) für die Testseriengruppe 900_1.5h_d/h
c) für die Testseriengruppe 450_5h_d/h
d) für die Testseriengruppe 900_5h_d/h

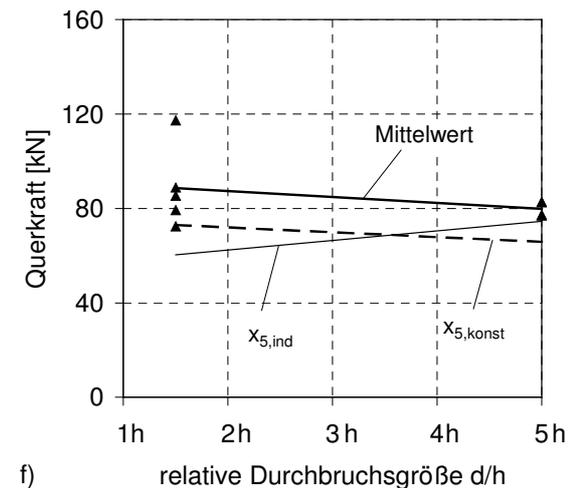
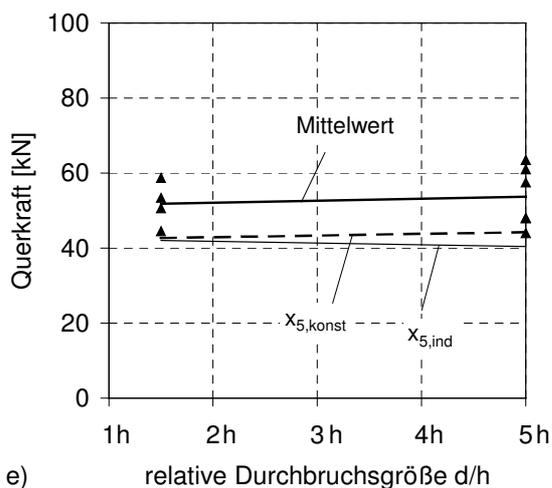
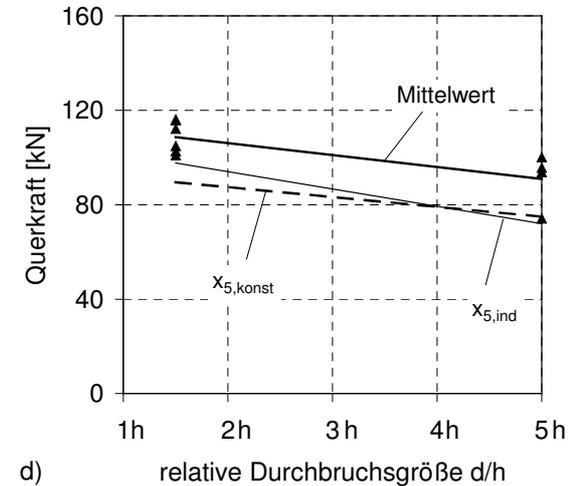
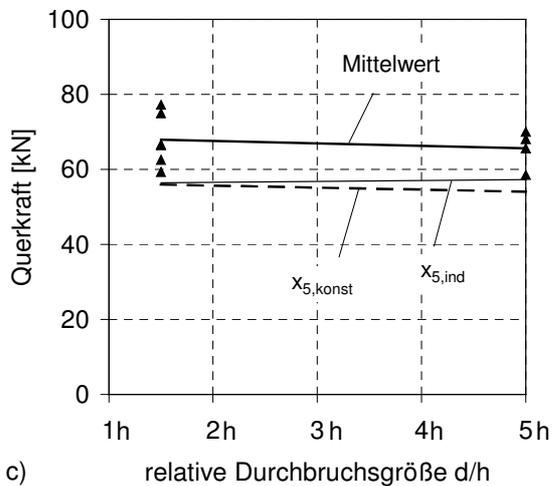
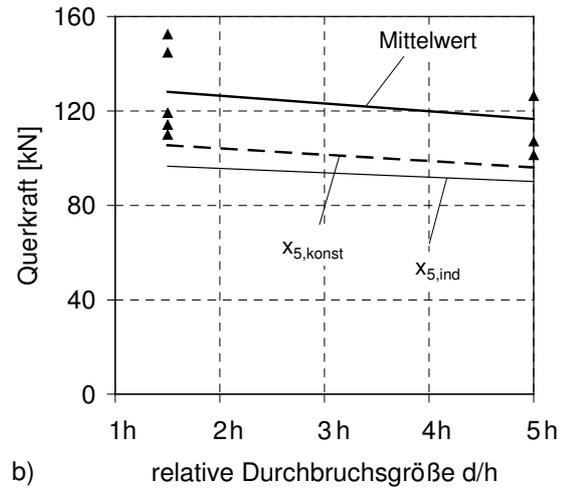
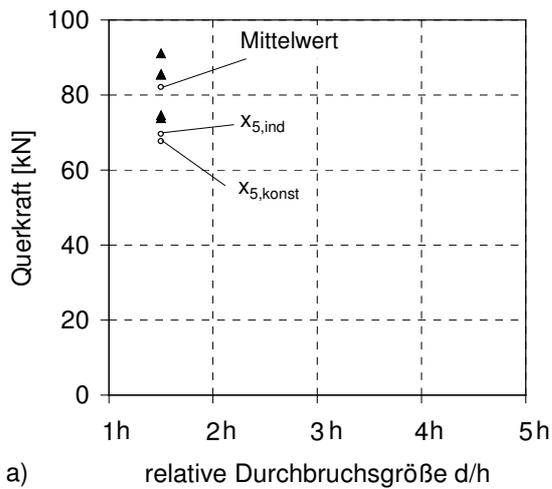


Bild 30a-f: Höchstlasten in Abhängigkeit vom Moment/Querkraft-Verhältnis M/V ; Einzelergebnisse, Mittel- und 5%-Fraktilewerte für die Testserien

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| a) 450_1.5h_0.2 und 450_5h_0.2 | b) 900_1.5h_0.2 und 900_5h_0.2 |
| c) 450_1.5h_0.3 und 450_5h_0.3 | d) 900_1.5h_0.3 und 900_5h_0.3 |
| e) 450_1.5h_0.4 und 450_5h_0.4 | f) 900_1.5h_0.4 und 900_5h_0.4 |

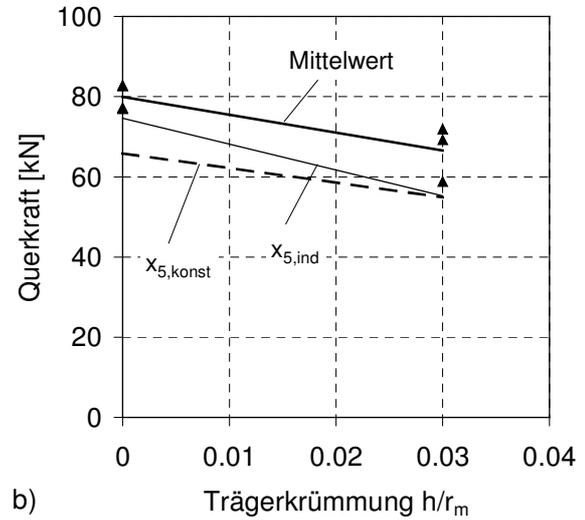
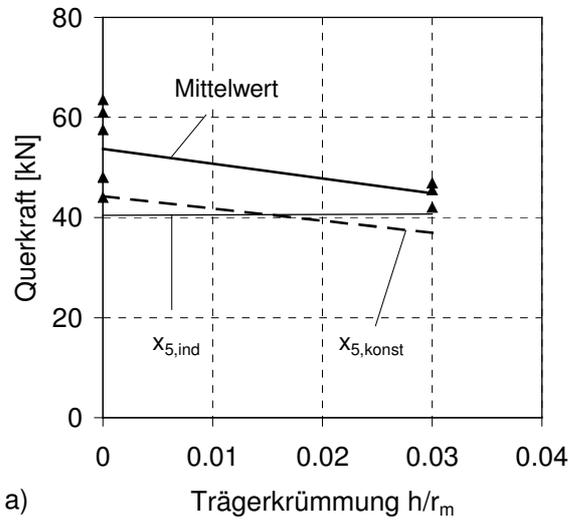


Bild 31a, b: Höchstlasten in Abhängigkeit von der Trägerkrümmung; Einzelergebnisse, Mittel- und 5%-Fraktilenwerte für die Testserien
a) 450_5h_0.4 und G450_5h_0.4 b) 900_5h_0.4 und G900_5h_0.4

Tabelle 20: Größeneinfluß anhand der Versuchsergebnisse

zugehörige Testserien, die sich nur bezüglich der Trägerhöhe unterscheiden		Träger- form	Schnittkraft- verhältnis am Durchbruch M/V	relative Durchbruchs- größe d/h	Verhältnis der	
h = 900 mm	h = 450 mm				Durchrißlasten $\frac{V(h = 900)}{V(h = 450)}$	Höchstlasten $\frac{V(h = 900)}{V(h = 450)}$
900_1.5h_0.2	450_1.5h_0.2	gerade	1.5 h	0,2	1,39	1,56
900_1.5h_0.3	450_1.5h_0.3			0,3	1,47	1,60
900_1.5h_0.4	450_1.5h_0.4			0,4	1,45	1,71
900_5h_0.2	450_5h_0.2	gerade	5 h	0,2	-	-
900_5h_0.3	450_5h_0.3			0,3	0,95	1,39
900_5h_0.4	450_5h_0.4			0,4	1,26	1,49
G900_5h_0.4	G450_5h_0.4	gekrümmt	5 h	0,4	1,31	1,49
Mittelwert					1,31	1,54
Standardabweichung					0,19	0,11
Variationskoeffizient [%]					14,7	7,1

Tabelle 21: Momenteneinfluß (M/V-Einfluß) anhand der Versuchsergebnisse

zugehörige Testserien, die sich nur bezüglich des M/V-Verhältnisses unterscheiden		Träger- form	Träger- höhe h [mm]	relative Durchbruchs- größe d/h	Verhältnis der	
M/V = 1.5 h	M/V = 5 h				Durchrißlasten $\frac{V(M/V = 5h)}{V(M/V = 1.5h)}$	Höchstlasten $\frac{V(M/V = 5h)}{V(M/V = 1.5h)}$
450_1.5h_0.2	450_5h_0.2	gerade	450	0,2	-	-
450_1.5h_0.3	450_5h_0.3			0,3	0,89	0,96
450_1.5h_0.4	450_5h_0.4			0,4	1,03	1,04
900_1.5h_0.2	900_5h_0.2		900	0,2	1,00	0,91
900_1.5h_0.3	900_5h_0.3			0,3	0,57	0,83
900_1.5h_0.4	900_5h_0.4			0,4	0,89	0,90

Tabelle 22: Einfluß der Trägerkrümmung anhand der Versuchsergebnisse

zugehörige Testserien, die sich nur bezüglich der Trägerkrümmung unterscheiden		Träger- höhe h [mm]	Schnittkraft- verhältnis am Durchbruch M/V	relative Durchbruchs- größe d/h	Verhältnis der	
gerade	gekrümmt				Durchrißlasten $\frac{V(gerade)}{V(gekrümmt)}$	Höchstlasten $\frac{V(gerade)}{V(gekrümmt)}$
450_5h_0.4	G450_5h_0.4	450	5 h	0,4	1,29	1,20
900_5h_0.4	G900_5h_0.4	900			1,24	1,20
Mittelwert					1,26	1,20
Standardabweichung					0,03	0,00
Variationskoeffizient [%]					2,6	0,0

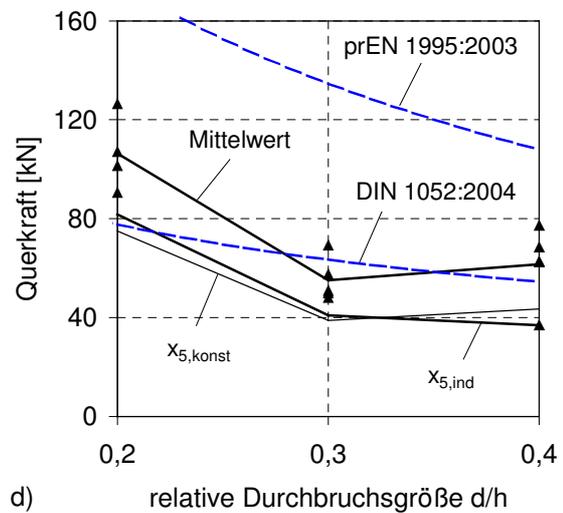
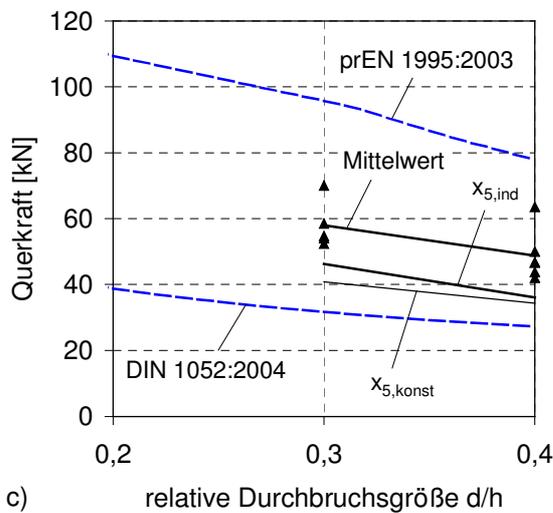
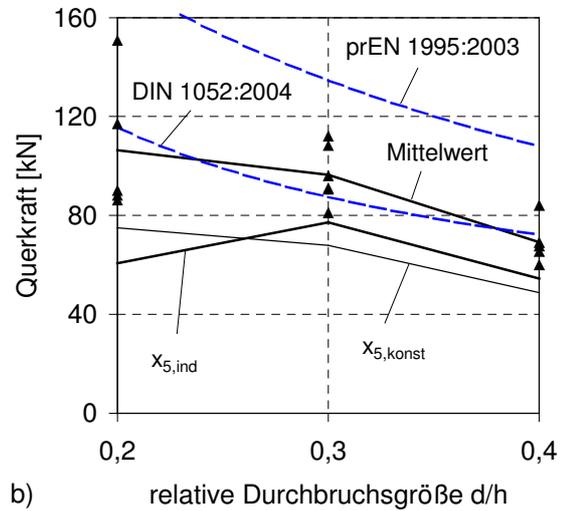
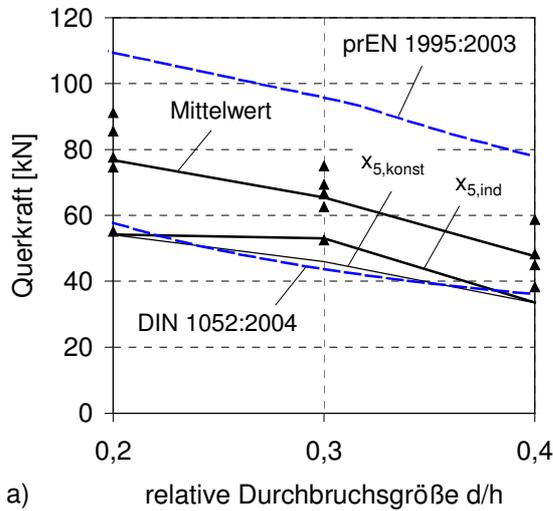


Bild 32a-d: Charakteristische Querkrafttragfähigkeiten gemäß den Bemessungsansätzen DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 und die Versuchsergebnisse der Durchrißlasten (Einzelergebnisse, Mittel- und 5%-Fraktilenwerte) dargestellt in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße d/h

- a) für die Testseriengruppe 450_1.5h_d/h
- b) für die Testseriengruppe 900_1.5h_d/h
- c) für die Testseriengruppe 450_5h_d/h
- d) für die Testseriengruppe 900_5h_d/h

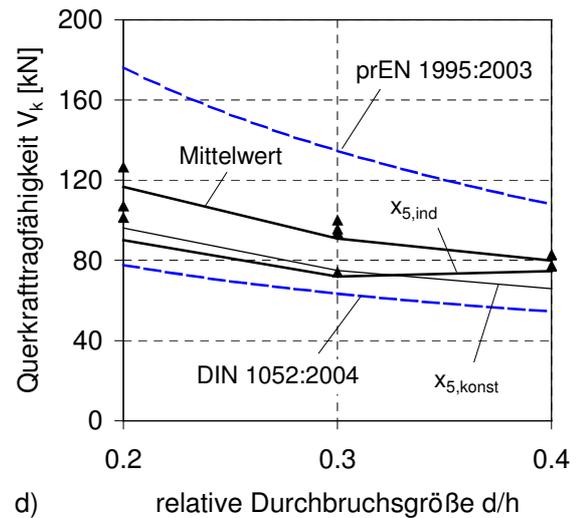
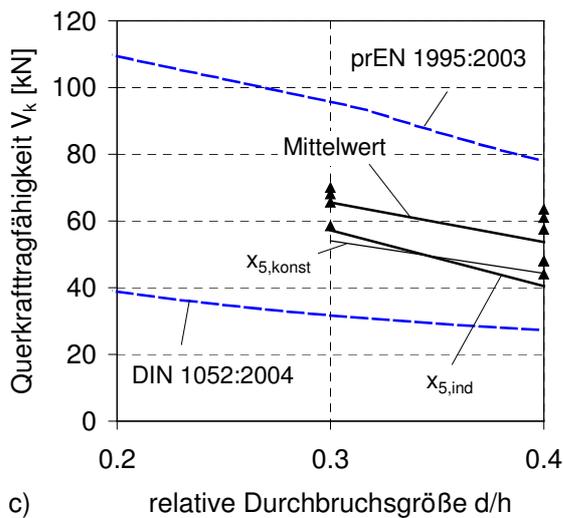
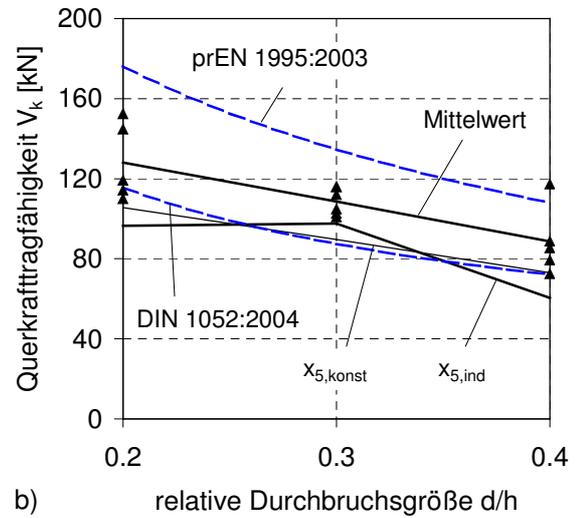
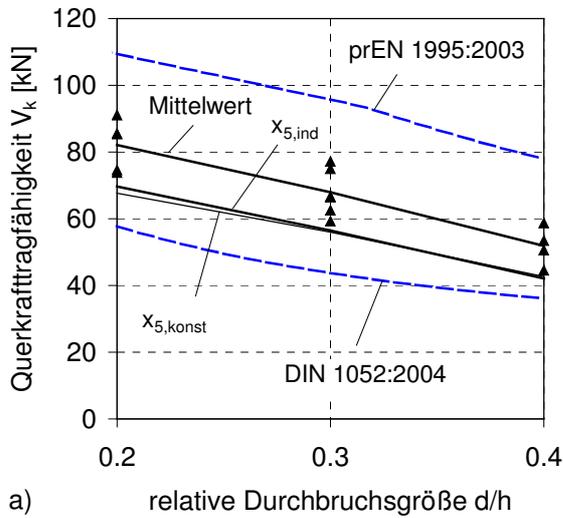
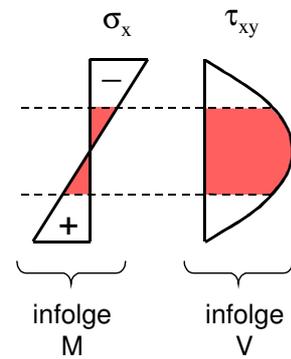
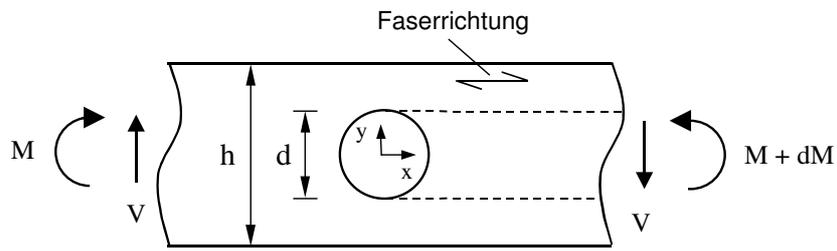


Bild 33a-d: Charakteristische Querkrafttragfähigkeiten gemäß den Bemessungsansätzen DIN 1052:2004 und prEN 1995-1-1:2003 und die Versuchsergebnisse der Höchstlasten (Einzelergebnisse, Mittel- und 5%-Fraktile) dargestellt in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße d/h

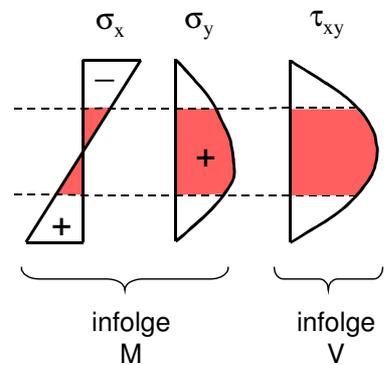
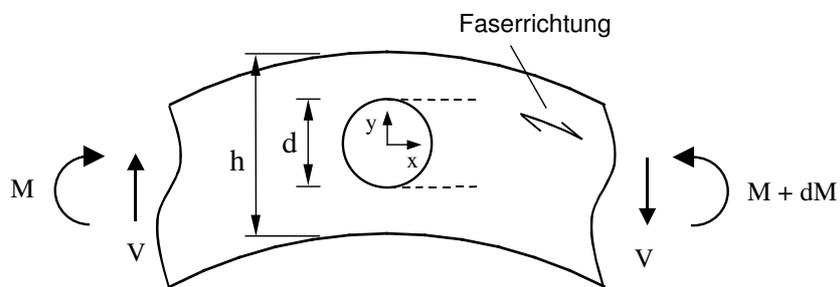
- a) für die Testseriengruppe 450_1.5h_d/h
- b) für die Testseriengruppe 900_1.5h_d/h
- c) für die Testseriengruppe 450_5h_d/h
- d) für die Testseriengruppe 900_5h_d/h

Tabelle 23: Gegenüberstellung der experimentellen Ergebnisse mit den rechnerischen charakteristischen Tragfähigkeiten zufolge der Bemessungsansätze nach prEN 1995:2003, nach DIN 1052:2004 und dem Weibull-basierten Bemessungsansatz

Testserien- gruppe	Testserie	rechn. charakt. Tragfähigkeit					experimenteller Wert = 5%-Fraktilewert $X_{5,konst}$		Verhältnis rechn. charakt. Tragfähigkeit / experimenteller Wert								
		prEN 1995	DIN 1052	Weibull			Durch- riß- last	Höchst- last	rechn. charakt. Tragfähigkeit / exp. Durchrißlast				rechn. charakt. Tragfähigkeit / exp. Höchstlast				
				un- kali- briert	kalibriert an				prEN 1995	DIN 1052	un- kali- briert	kali- briert	prEN 1995	DIN 1052	un- kali- briert	kali- briert	
kN	kN	kN	Durchriß- lasten c = 1,03	Höchst- lasten c = 1,45	kN	kN	-	-									-
-	-	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	-	-	-	-	-	-	-	-	-
450_1.5h_d/h	450_1.5h_0.2	109.44	57.80	52.50	54.08	76.13	54.10	67.70	2.02	1.07	0.97	1.00	1.62	0.85	0.78	1.12	
	450_1.5h_0.3	95.76	43.73	40.80	42.02	59.16	46.00	56.00	2.08	0.95	0.89	0.91	1.71	0.78	0.73	1.06	
	450_1.5h_0.4	77.93	36.10	33.50	34.51	48.58	33.50	42.70	2.33	1.08	1.00	1.03	1.83	0.85	0.78	1.14	
Mittelwert									2.14	1.03	0.95	0.98	1.72	0.83	0.76	1.11	
Standardabweichung									0.16	0.07	0.06	0.06	0.10	0.04	0.03	0.04	
Variationskoeffizient [%]									7.5	6.9	6.2	6.2	6.1	4.8	3.9	3.9	
900_1.5h_d/h	900_1.5h_0.2	176.36	115.61	79.50	81.89	115.28	74.90	105.60	2.35	1.54	1.06	1.09	1.67	1.09	0.75	1.09	
	900_1.5h_0.3	134.70	85.44	61.80	63.65	89.61	67.90	89.60	1.98	1.26	0.91	0.94	1.50	0.95	0.69	1.00	
	900_1.5h_0.4	108.00	72.19	50.70	52.22	73.52	48.70	73.00	2.22	1.48	1.04	1.07	1.48	0.99	0.69	1.01	
Mittelwert									2.19	1.43	1.00	1.03	1.55	1.01	0.71	1.03	
Standardabweichung									0.19	0.15	0.08	0.08	0.10	0.07	0.04	0.05	
Variationskoeffizient [%]									8.6	10.5	8.2	8.2	6.7	7.3	4.9	4.9	
450_5.0h_d/h	450_5.0h_0.2	109.44	38.83	45.30	46.66	65.69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	450_5.0h_0.3	95.76	31.71	33.30	34.30	48.29	40.80	54.10	2.35	0.78	0.82	0.84	1.77	0.59	0.62	0.89	
	450_5.0h_0.4	77.93	27.26	26.10	26.88	37.85	34.40	44.20	2.27	0.79	0.76	0.78	1.76	0.62	0.59	0.86	
Mittelwert									2.31	0.78	0.79	0.81	1.77	0.60	0.60	0.87	
Standardabweichung									0.06	0.01	0.04	0.04	0.00	0.02	0.02	0.03	
Variationskoeffizient [%]									2.5	1.4	5.2	5.2	0.3	3.6	2.9	2.9	
900_5.0h_d/h	900_5.0h_0.2	176.36	77.60	68.60	70.66	99.47	74.90	96.10	2.35	1.04	0.92	0.94	1.84	0.81	0.71	1.04	
	900_5.0h_0.3	134.70	63.41	50.40	51.91	73.08	38.80	74.90	3.47	1.63	1.30	1.34	1.80	0.85	0.67	0.98	
	900_5.0h_0.4	108.00	54.51	39.60	40.79	57.42	43.40	65.80	2.49	1.26	0.91	0.94	1.64	0.83	0.60	0.87	
Mittelwert									2.77	1.31	1.04	1.07	1.76	0.83	0.66	0.96	
Standardabweichung									0.61	0.30	0.22	0.23	0.10	0.02	0.06	0.08	
Variationskoeffizient [%]									22.0	23.1	21.3	21.3	5.9	2.4	8.6	8.6	
G450_5.0h_0.4	G450_5.0h_0.4			22.40	23.07	32.48	26.70	36.90	-	-	0.84	0.86	-	-	0.61	0.88	
G900_5.0h_0.4	G900_5.0h_0.4			33.90	34.92	49.16	34.90	54.90	-	-	0.97	1.00	-	-	0.62	0.90	



a)



b)

Bild 34a, b: Spannungen, die infolge des Durchbruchs umgelagert werden müssen
a) im geraden Träger
b) im gekrümmten Träger

Tabelle 24: Berechnung der maximalen Spannung rechtwinklig zur Faserrichtung am Durchbruch

Gerader Träger	Gekrümmter Träger
$\sigma_{y,max,M} = 0,1 \frac{M}{W} \frac{d}{h}$	$\sigma_{y,max,M} = \frac{M}{W} \left(0,43 \frac{h}{r_m} + 0,1 \frac{d}{h} \right)$
$\sigma_{y,max,V} = \frac{3}{2} \frac{V}{b h} \left(1,23 + 0,82 \frac{d}{h} \right)$	$\sigma_{y,max,V} = \frac{3}{2} \frac{V}{b h} \left(1,23 + 0,82 \frac{d}{h} \right)$
$\sigma_{y,max,M/V} = (\sigma_{y,max,V} + \sigma_{y,max,M}) \chi_{M/V}$	$\sigma_{y,max,M/V} = (\sigma_{y,max,V} + \sigma_{y,max,M}) \chi_{M/V}$
$\chi_{M/V} = \begin{cases} 0,9 & \text{für kombinierte M/V-Beanspruchung} \\ 1 & \text{für reine M-Beanspruchung} \end{cases}$	$\chi_{M/V} = \begin{cases} 0,9 & \text{für kombinierte M/V-Beanspruchung} \\ 1 & \text{für reine M-Beanspruchung} \end{cases}$

Tabelle 25: Fehler zwischen den berechneten maximalen Spannungen aus den abgeleiteten Formeln und den FE-berechneten maximalen Spannungen; angegeben ist der mittlere Fehler \pm Standardabweichung

Beanspruchungsart	gerader Träger ($h/r_m = 0$)	gekrümmter Träger im Bereich $0 < h/r_m \leq 0,1$
infolge reiner Momenten-Beanspruchung	0,9% \pm 1,1%	2,8% \pm 1,4%
infolge reiner Querkraft-Beanspruchung	1,5% \pm 1,1%	1,6% \pm 1,1%
infolge kombinierter Momenten/Querkraft-Beanspruchung	3,0% \pm 2,5%	2,3% \pm 1,7%

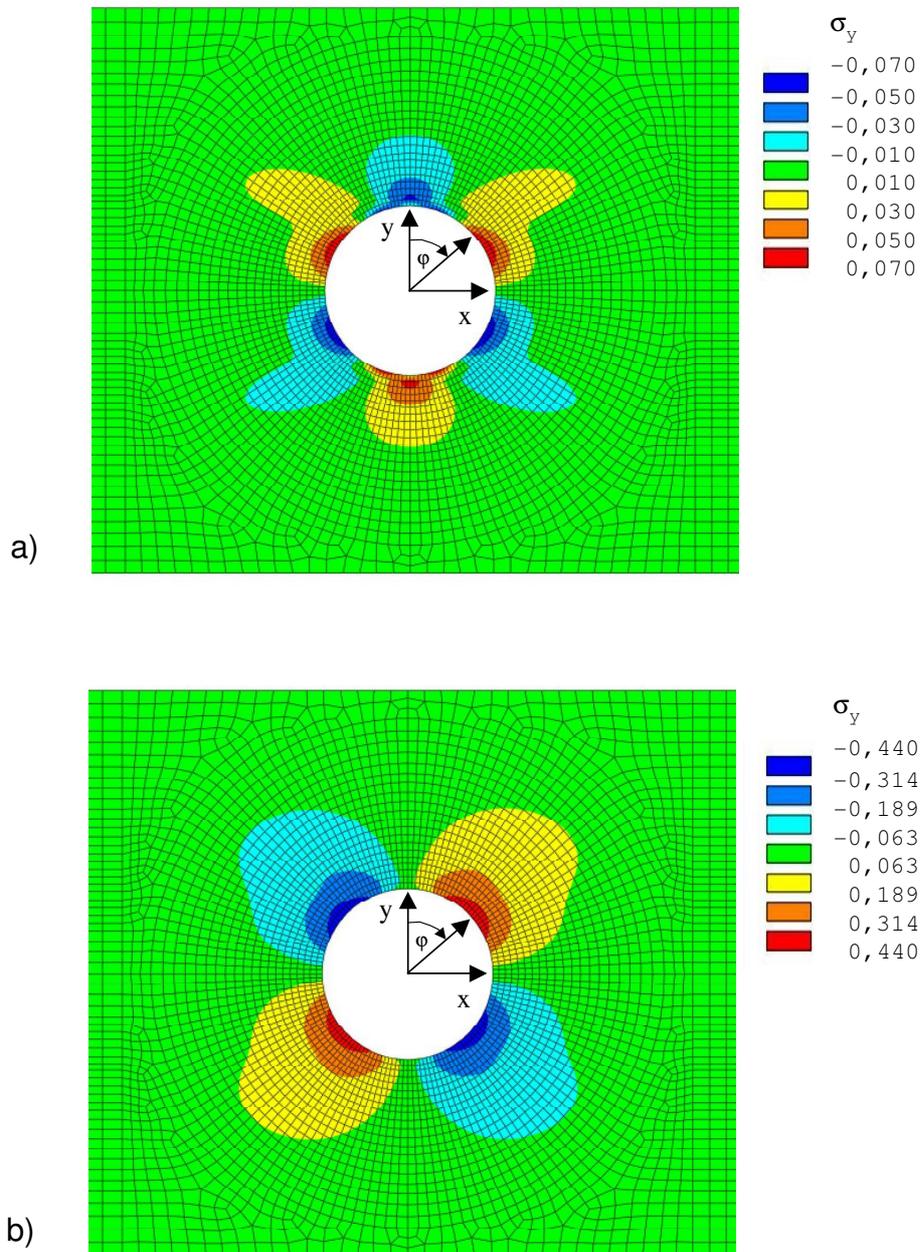


Bild 35a, b: Spannungsverteilung rechtwinklig zur Faserrichtung σ_y in einem geraden Träger;
Parameter für gewähltes Beispiel: $h = 500 \text{ mm}$, $b = 100 \text{ mm}$, $M = 10 \text{ kNm}$
a) zufolge reiner Momentenbeanspruchung
b) zufolge reiner Querkraftbeanspruchung

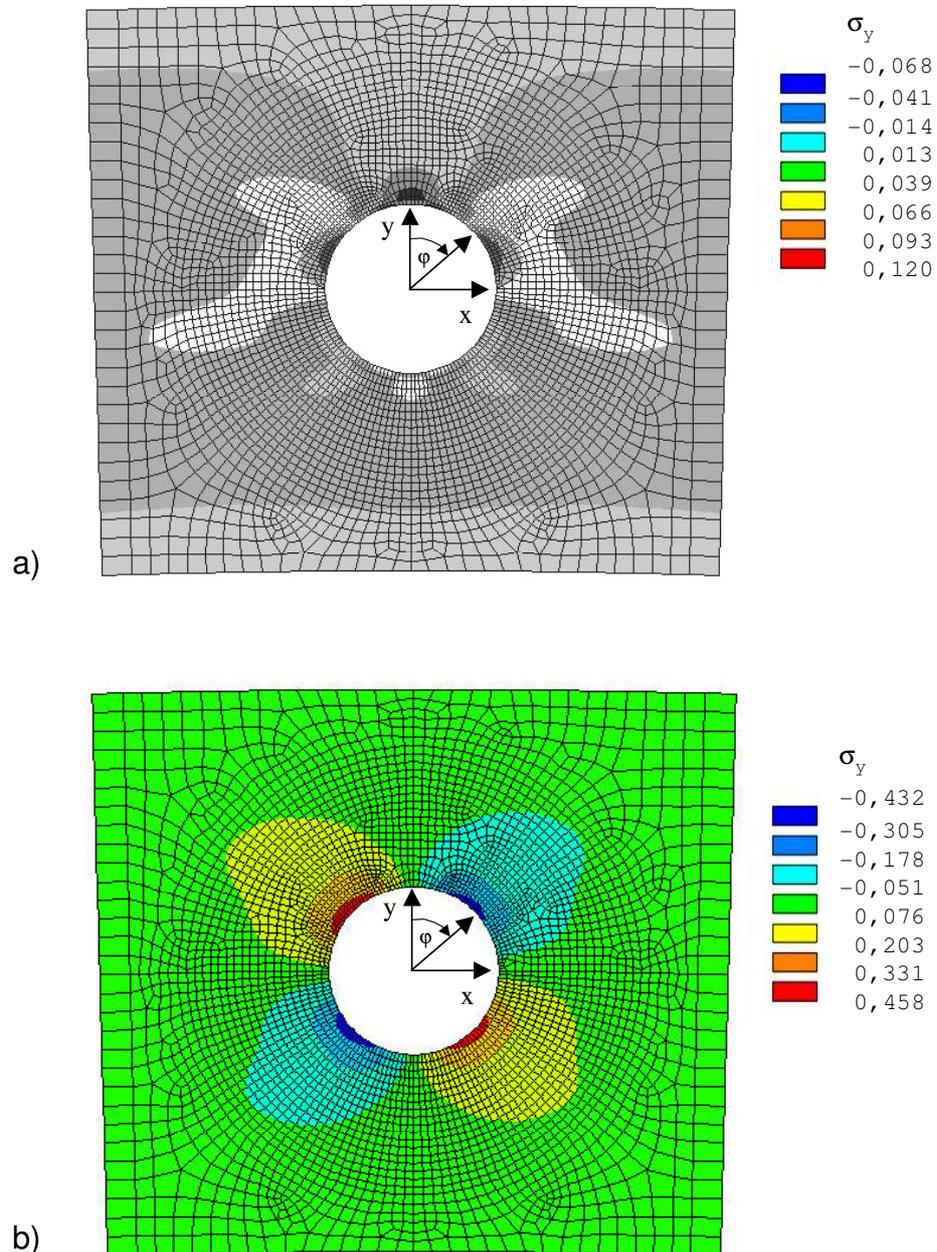


Bild 36a, b: Spannungsverteilung rechtwinklig zur Faserrichtung σ_y in einem gekrümmten Träger (hier: $h/r_m = 0,05$);
Parameter für gewähltes Beispiel: $h = 500$ mm, $b = 100$ mm, $V = 10$ kN
a) zufolge reiner Momentenbeanspruchung
b) zufolge reiner Querkraftbeanspruchung

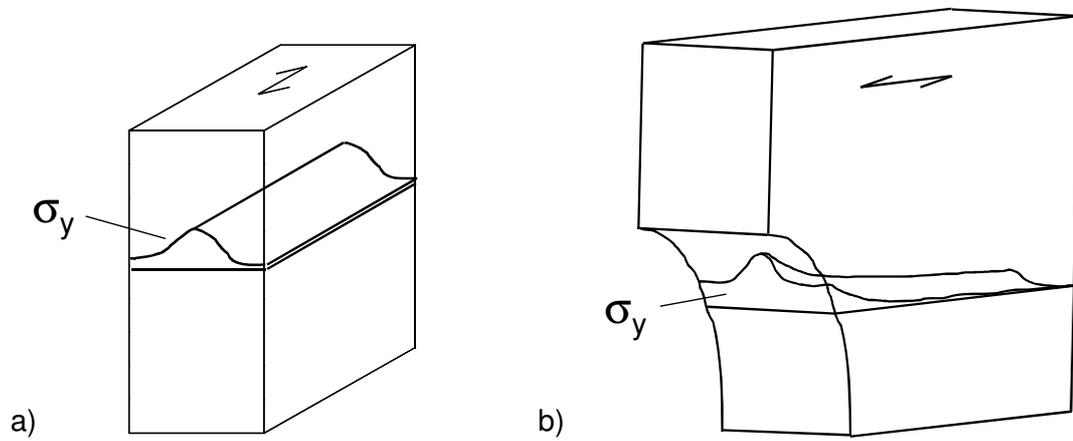


Bild 37a, b: Spannungsverteilung rechtwinklig zur Faserrichtung σ_y
a) im Referenzprüfkörper
b) am Durchbruch entlang des höchstbeanspruchten Pfades

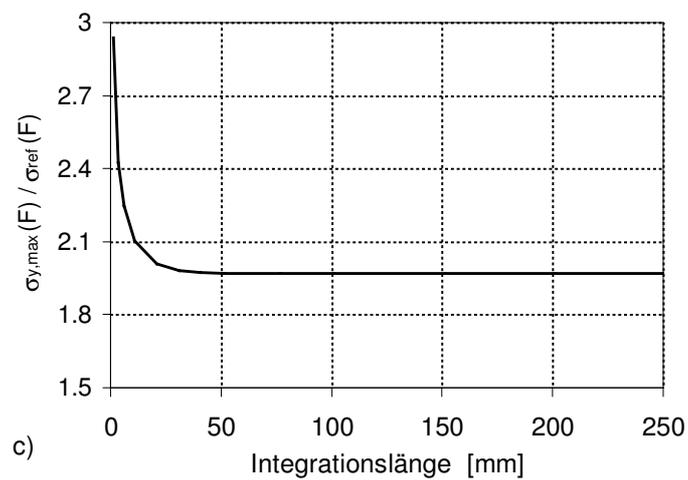
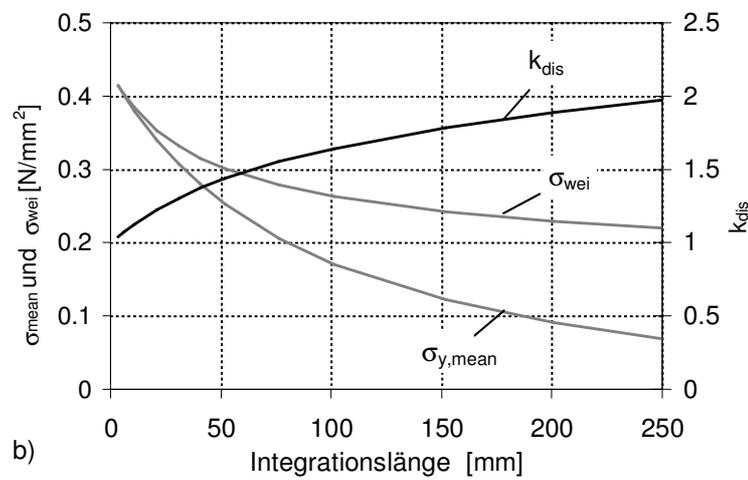
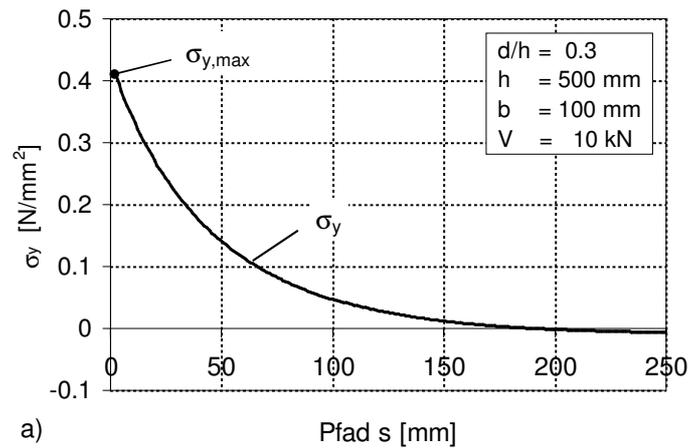


Bild 38a-c: a) Inhomogene Spannungsverteilung σ_y entlang des höchstbeanspruchten Pfades am Durchbruchrand ($h = 500 \text{ mm}$, $b = 100 \text{ mm}$, $d/h = 0,3$, $V = 10 \text{ kN}$)
 b) Mittelwert der inhomogenen Spannungsverteilung $\sigma_{y,\text{mean}}$, Weibull-Spannung σ_{wei} und Formbeiwert k_{dis} in Abhängigkeit von der Integrationslänge (für $m = 5$)
 c) Verhältnis der Spannungen $\sigma_{y,\text{max}}(F) / \sigma_{\text{ref}}(F)$

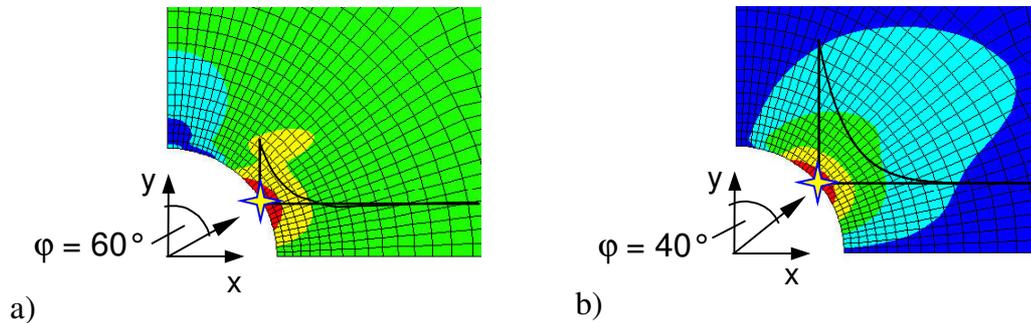


Bild 39a, b: Spannungsverteilung rechtwinklig zur Faserrichtung am runden Durchbruch mit Kennzeichnung des höchstbeanspruchten Pfades
a) für reine Momentenbeanspruchung
b) für reine Querkraftbeanspruchung

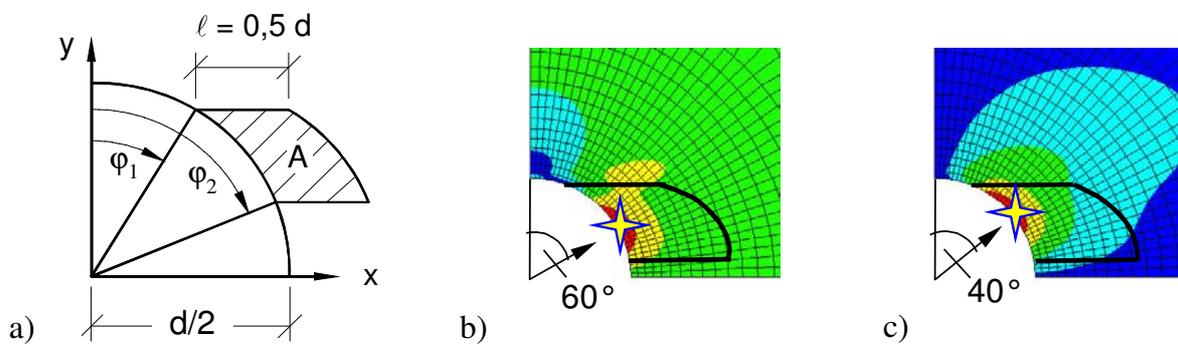


Bild 40 a-c: Integrationsbereich A
a) Definition der geometrischen Größen des Integrationsbereiches
b) der vom Integrationsbereich A eingeschlossene Spannungsbereich für reine Momentenbeanspruchung
c) der vom Integrationsbereich A eingeschlossene Spannungsbereich für reine Querkraftbeanspruchung

Weibull-Theorie basierter Bemessungsansatz für runde Durchbrüche in Biegeträgern aus Brettschichtholz (komprimierte Zusammenfassung)

Nachweis:

$$\frac{\sigma_{t,90,d}}{f_{t,90,d} k_{dis} c \left(\frac{\Omega_{ref}}{\Omega} \right)^{0,2}} \leq 1 \quad \text{mit} \quad \sigma_{t,90,d} = (\sigma_{t,90,V,d} + \sigma_{t,90,M,d}) \lambda_{M/V}$$

wobei

$$\sigma_{t,90,V,d} = \frac{3}{2} \frac{V_d}{bh} \left(1,23 + 0,82 \frac{d}{h} \right)$$

$$\sigma_{t,90,M,d} = \frac{M_d}{W} \left(0,43 \frac{h}{r_m} + 0,1 \frac{d}{h} \right)$$

$$\lambda_{M/V} = \begin{cases} 1 & \text{für reine M-Beanspruchung} \\ 0,9 & \text{für kombinierte M/V-Beanspruchung} \end{cases}$$

$$\Omega = 0,1915 d^2 b$$

Hierin bedeuten:

- $f_{t,90,d}$ Bemessungswert der Zugfestigkeit des Brettschichtholzes rechtwinklig zur Faserrichtung
- k_{dis} Formbeiwert der Spannungsverteilung in Abhängigkeit vom Schnittkraftverhältnis M_d/V_d im Durchbruchmittelpunkt (siehe Tabelle I)
- c Kalibrierfaktor $c = 1,03$
- Ω_{ref} Bezugsvolumen von 10^7 mm^3
- d Durchmesser des runden Durchbruchs
- b Trägerbreite
- W Widerstandsmoment
- V_d Betrag des Bemessungswertes der Querkraft in Durchbruchmitte
- M_d Betrag des Bemessungswertes des Biegemomentes in Durchbruchmitte
- h Trägerhöhe
- r_m mittlerer Krümmungsradius (beim gekrümmten Träger), Bedingung: $h/r_m \leq 0,1$

Tabelle 26: k_{dis} -Werte in Abhängigkeit von der Trägerkrümmung und vom M_d/V_d -Verhältnis

M_d / V_d	h / r_m							
	0.1	0.05	0.03	0.025	0.02	0.01	0.005	0 = gerade
0 - 2 h	1.63	1.70	1.72	1.73	1.74	1.75	1.77	1.79
5 h	1.60	1.70	1.74	1.75	1.75	1.77	1.80	1.83
10 h	1.59	1.70	1.75	1.77	1.79	1.82	1.85	1.88
∞ = reine M-Beanspruchung	1.59	1.73	1.83	1.86	1.89	1.93	1.99	2.04

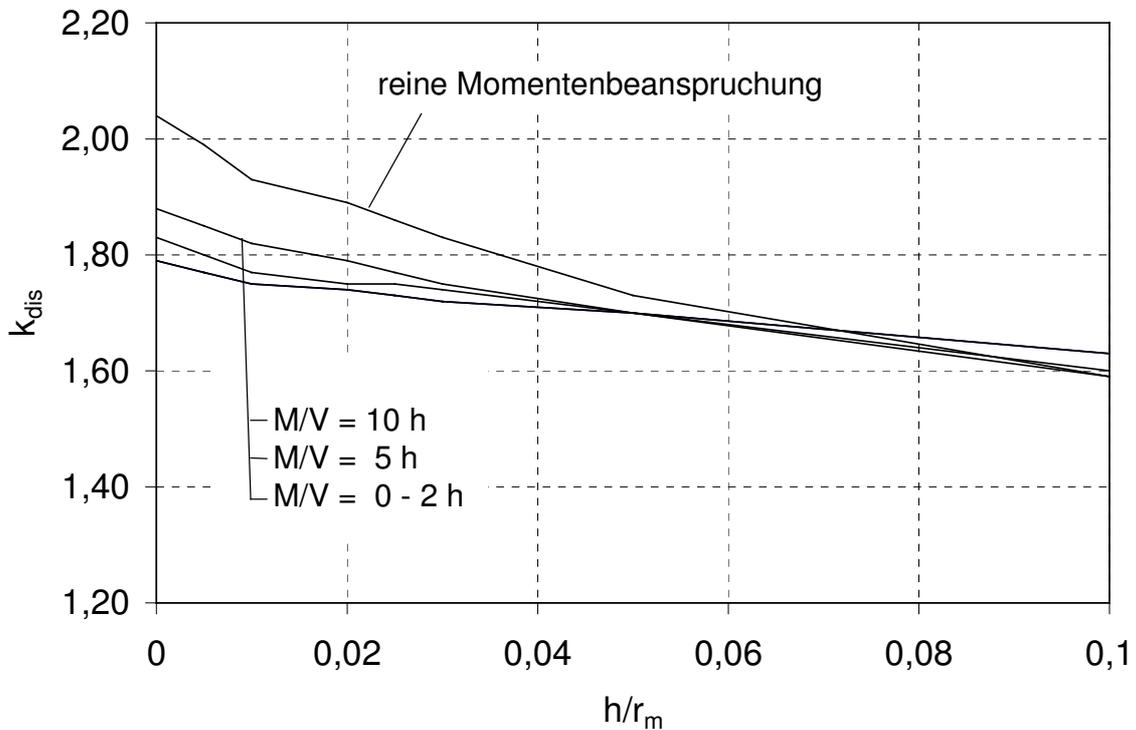


Bild 41: k_{dis} -Werte in Abhängigkeit von der Trägerkrümmung und vom M/V -Verhältnis

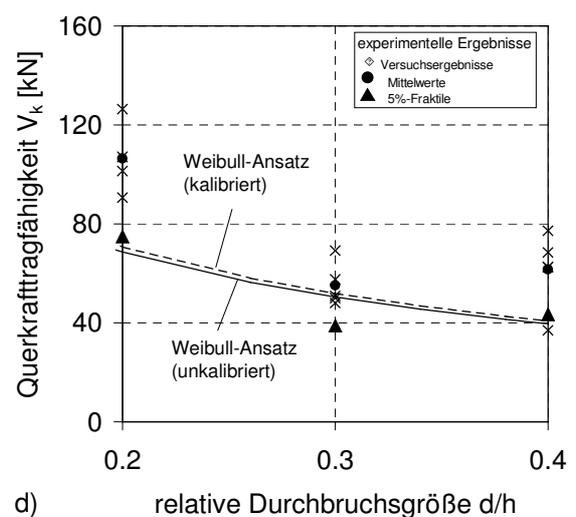
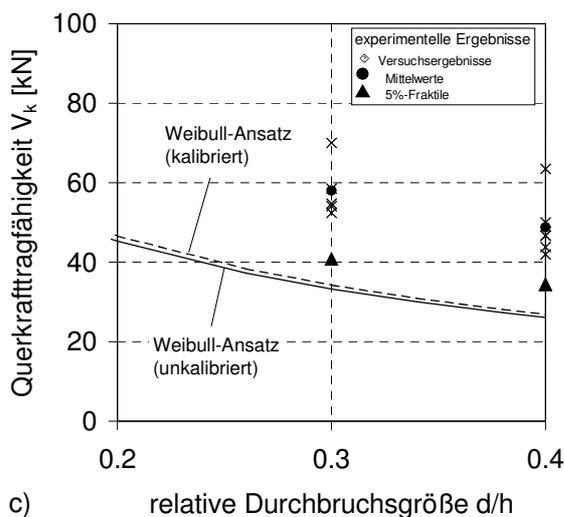
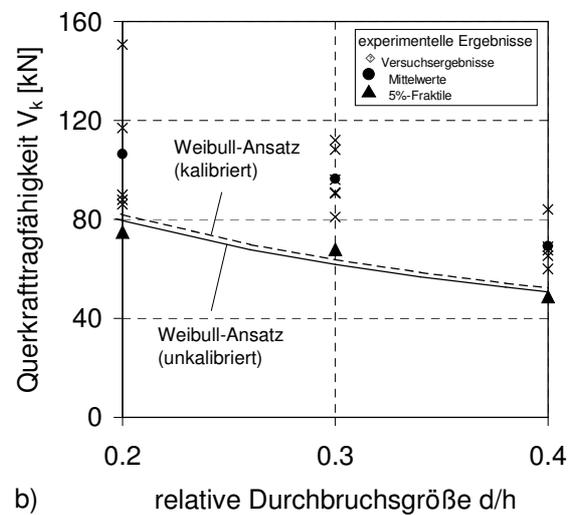
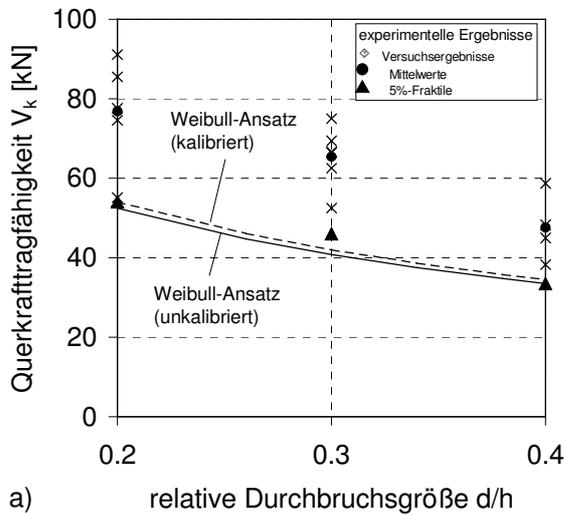


Bild 42a-d: Experimentelle¹⁾ und rechnerische²⁾ charakteristische Querkrafttragfähigkeiten in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße d/h

- a) Testseriengruppe 450_1.5h_d/h b) Testseriengruppe 900_1.5h_d/h
c) Testseriengruppe 450_5h_d/h d) Testseriengruppe 900_5h_d/h

¹⁾ Durchrißlasten ²⁾ gemäß Weibull-basiertem Bemessungsmodell

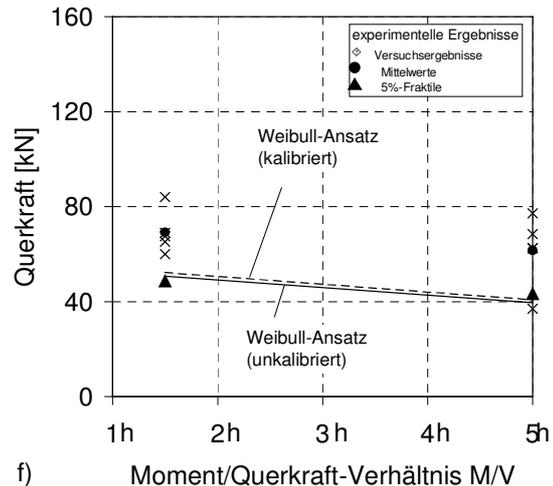
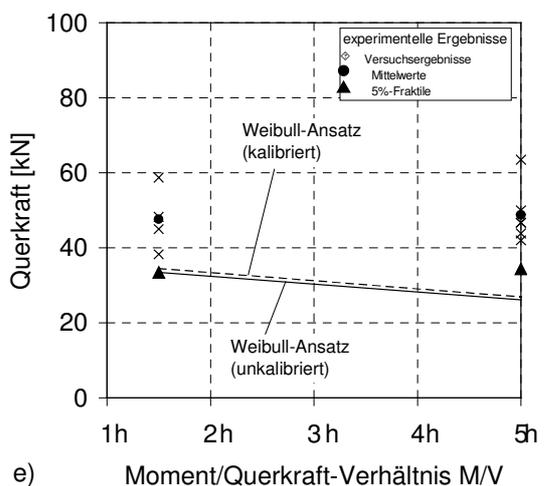
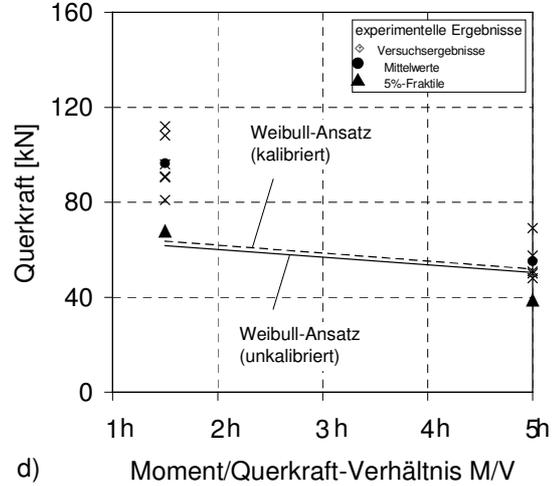
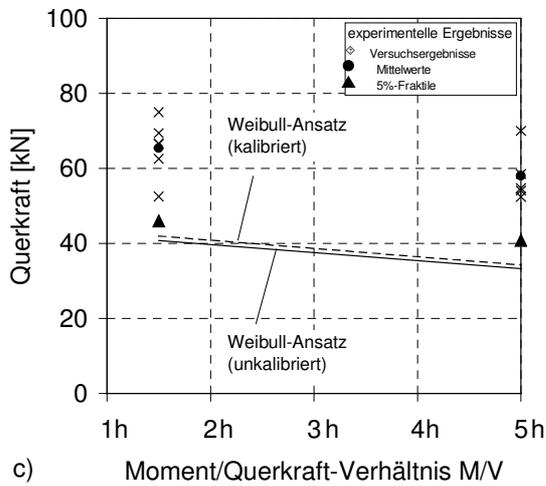
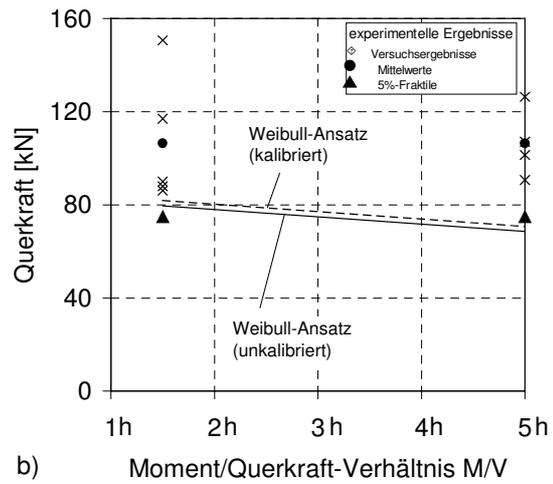
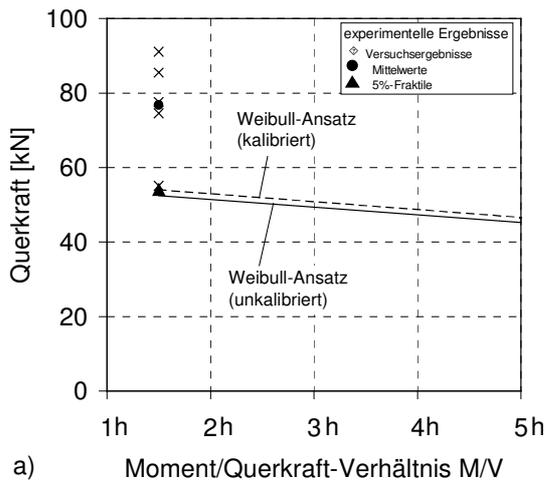


Bild 43a-f: Experimentelle¹⁾ und rechnerische²⁾ charakteristische Querkrafttragfähigkeiten in Abhängigkeit vom Moment/Querkraft-Verhältnis der einzelnen Testserien
 a) 450_1.5h_0.2 und 450_5h_0.2 b) 900_1.5h_0.2 und 900_5h_0.2
 c) 450_1.5h_0.3 und 450_5h_0.3 d) 900_1.5h_0.3 und 900_5h_0.3
 e) 450_1.5h_0.4 und 450_5h_0.4 f) 900_1.5h_0.4 und 900_5h_0.4

¹⁾ Durchrißlasten

²⁾ gemäß Weibull-basiertem Bemessungsmodell

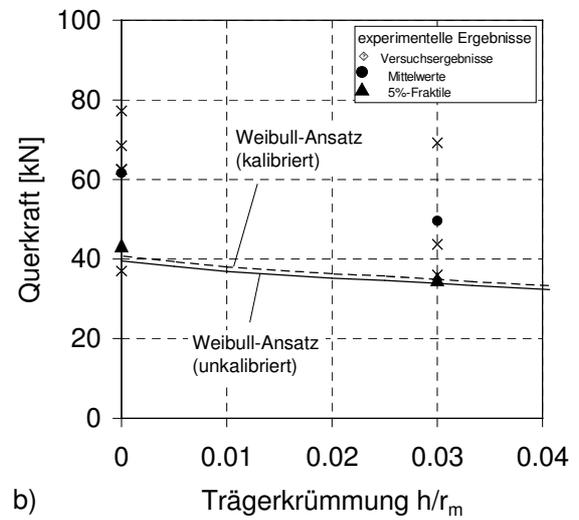
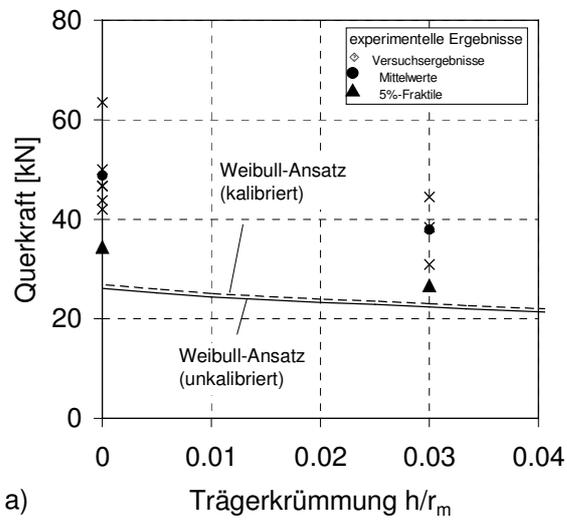


Bild 44a, b: Experimentelle¹⁾ und rechnerische²⁾ charakteristische Querkrafttragfähigkeiten in Abhängigkeit von der Trägerkrümmung der einzelnen Testserien

a) Testserien 450_5h_0.4 und G450_5h_0.4

b) Testserien 900_5h_0.4 und G900_5h_0.4

¹⁾ Durchrißlasten

²⁾ gemäß Weibull-basiertem Bemessungsmodell

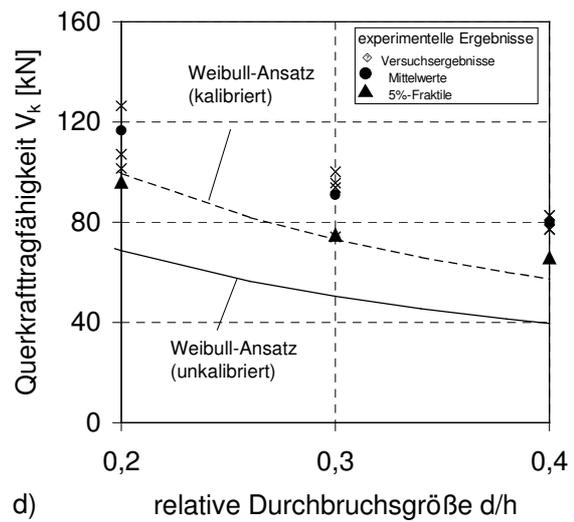
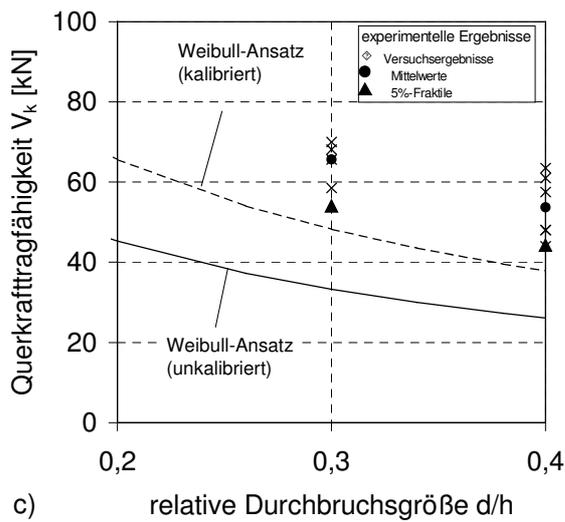
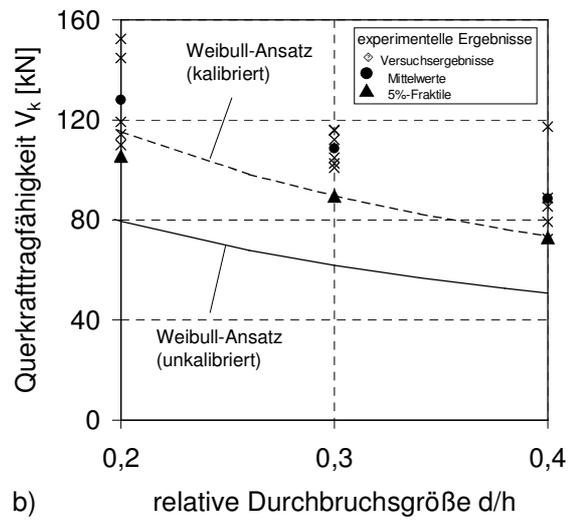
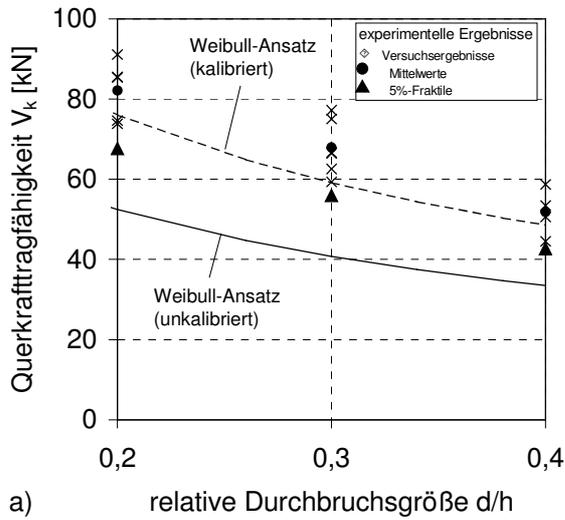


Bild 45a-d: Experimentelle¹⁾ und rechnerische²⁾ charakteristische Querkrafttragfähigkeiten in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße d/h der einzelnen Testseriengruppen

a) Testseriengruppe 450_1.5h_d/h b) Testseriengruppe 900_1.5h_d/h

c) Testseriengruppe 450_5h_d/h d) Testseriengruppe 900_5h_d/h

¹⁾ Höchstlasten

²⁾ gemäß Weibull-basiertem Bemessungsmodell

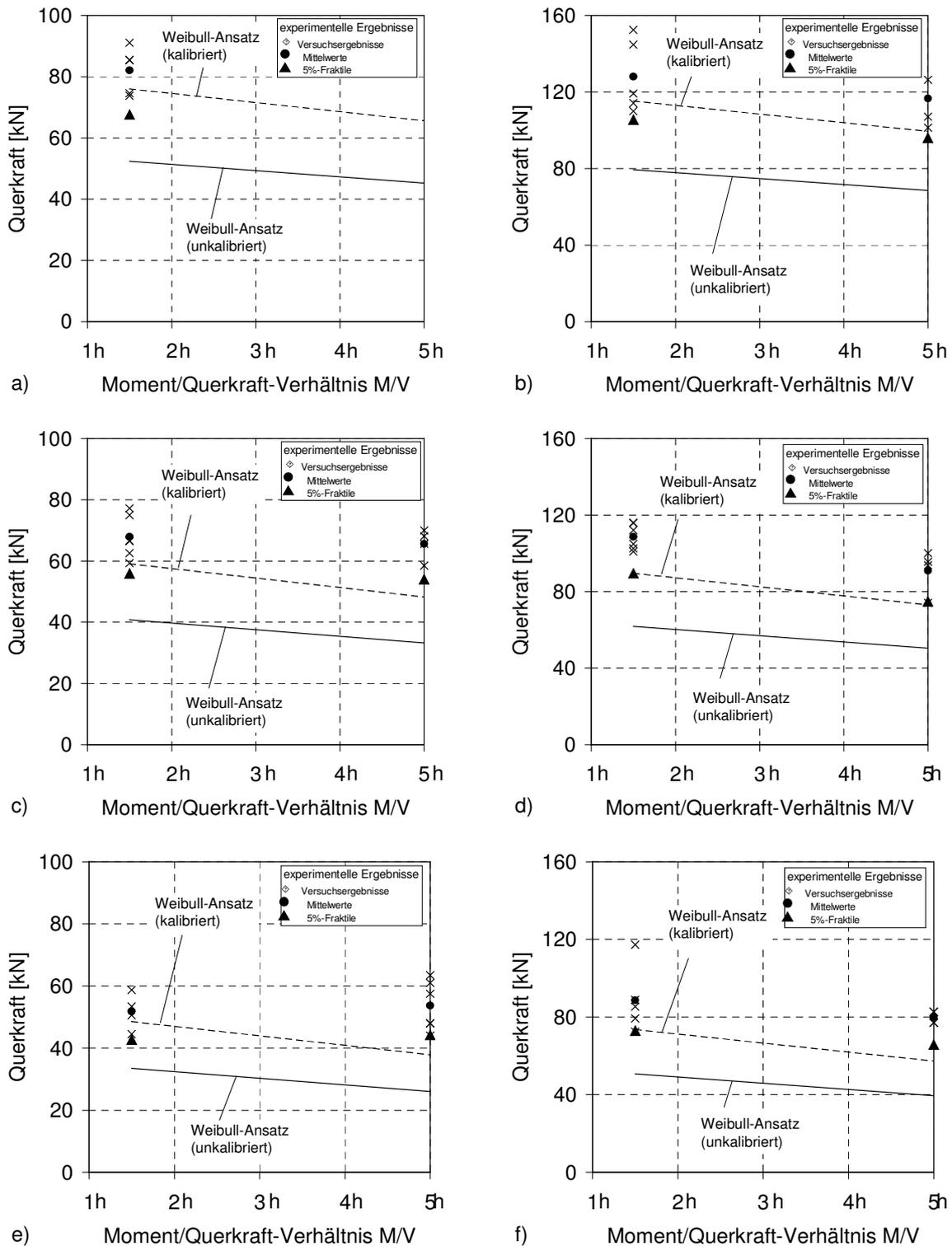


Bild 46a-f: Experimentelle¹⁾ und rechnerische²⁾ charakteristische Querkrafttragfähigkeiten in Abhängigkeit vom Moment/Querkraft-Verhältnis der einzelnen Testserien

- a) 450_1.5h_0.2 und 450_5h_0.2
- b) 900_1.5h_0.2 und 900_5h_0.2
- c) 450_1.5h_0.3 und 450_5h_0.3
- d) 900_1.5h_0.3 und 900_5h_0.3
- e) 450_1.5h_0.4 und 450_5h_0.4
- f) 900_1.5h_0.4 und 900_5h_0.4

¹⁾ Höchstlasten

²⁾ gemäß Weibull-basiertem Bemessungsmodell

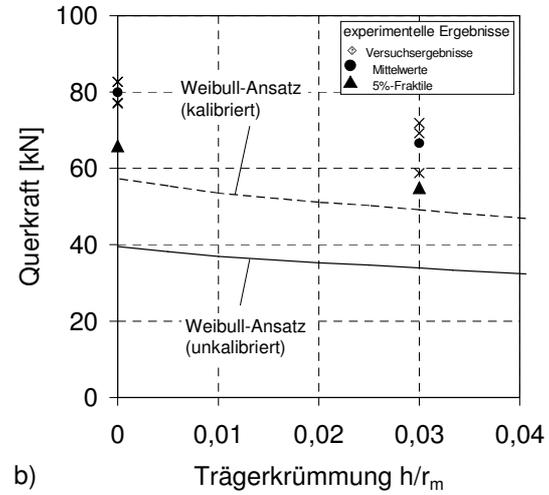
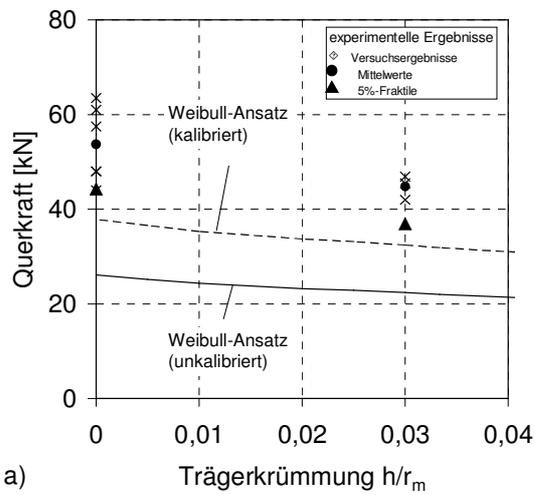


Bild 47a, b: Experimentelle¹⁾ und rechnerische²⁾ charakteristische Querkrafttragfähigkeiten in Abhängigkeit von der Trägerkrümmung der einzelnen Testserien
a) Testserien 450_5h_0.4 und G450_5h_0.4
b) Testserien 900_5h_0.4 und G900_5h_0.4

¹⁾ Höchstlasten

²⁾ gemäß Weibull-basiertem Bemessungsmodell

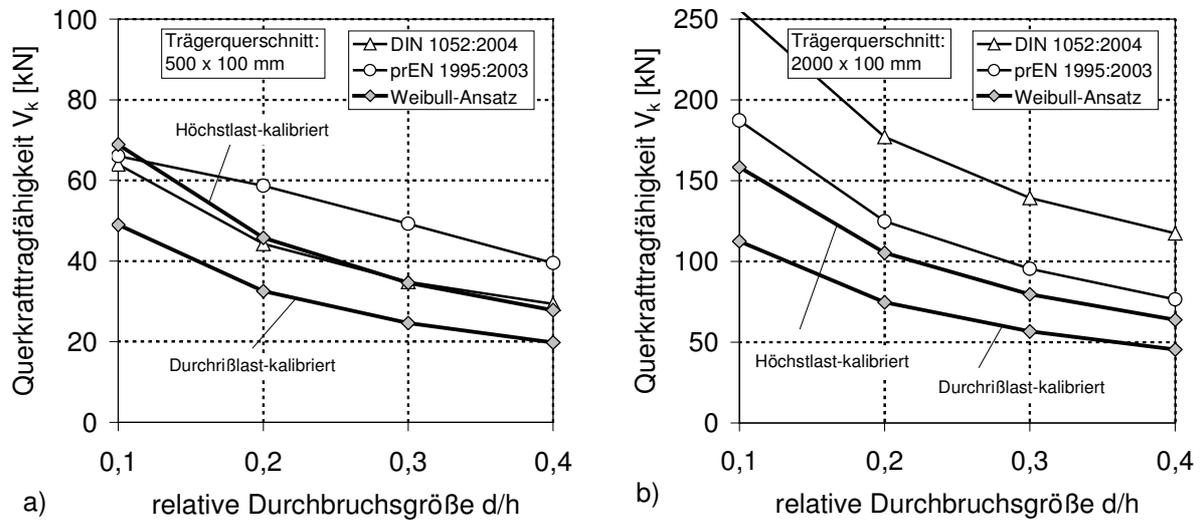


Bild 48a, b: Rechnerische charakteristische Querkrafttragfähigkeiten runder Durchbrüche mit $M/V = 3h$ für GL 24c (BS 11c) in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße d/h nach den Bemessungsansätzen DIN 1052:2004, prEN 1995-1-1:2003 und Weibull-basiertem Modell (Durchrißlast-kalibriert und Höchstlast-kalibriert)
a) Trägerquerschnitt: 500×100 mm b) Trägerquerschnitt: 2000×100 mm

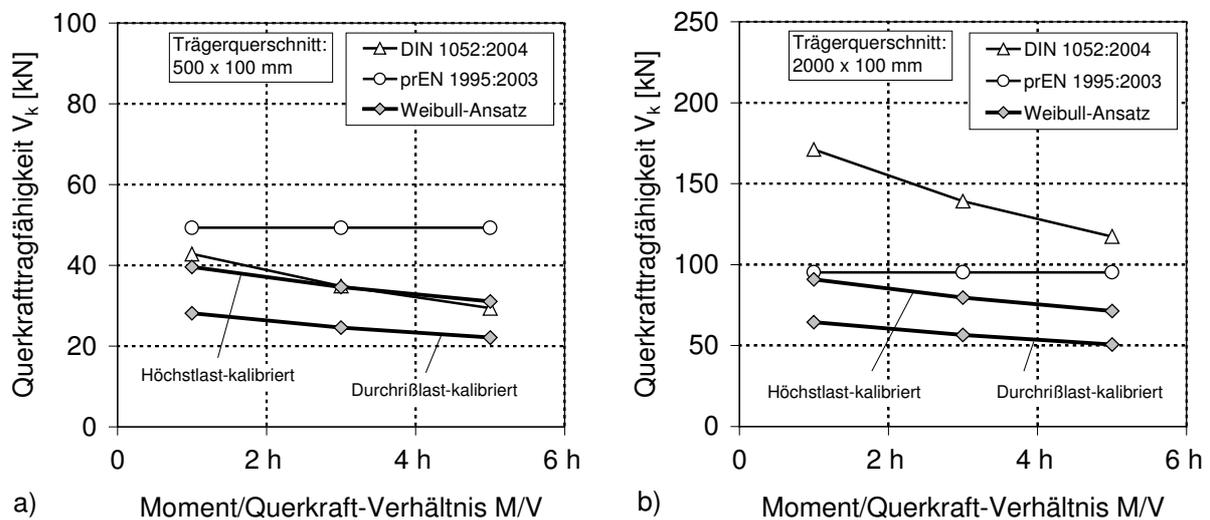


Bild 49a, b: Rechnerische charakteristische Querkrafttragfähigkeiten runder Durchbrüche mit $d/h = 0,3$ für GL 24c (BS 11c) in Abhängigkeit vom Moment/Querkraft-Verhältnis M/V nach den Bemessungsansätzen DIN 1052:2004, prEN 1995-1-1:2003 und Weibull-basiertem Modell (Durchrißlast-kalibriert und Höchstlast-kalibriert)
a) Trägerquerschnitt: 500×100 mm b) Trägerquerschnitt: 2000×100 mm

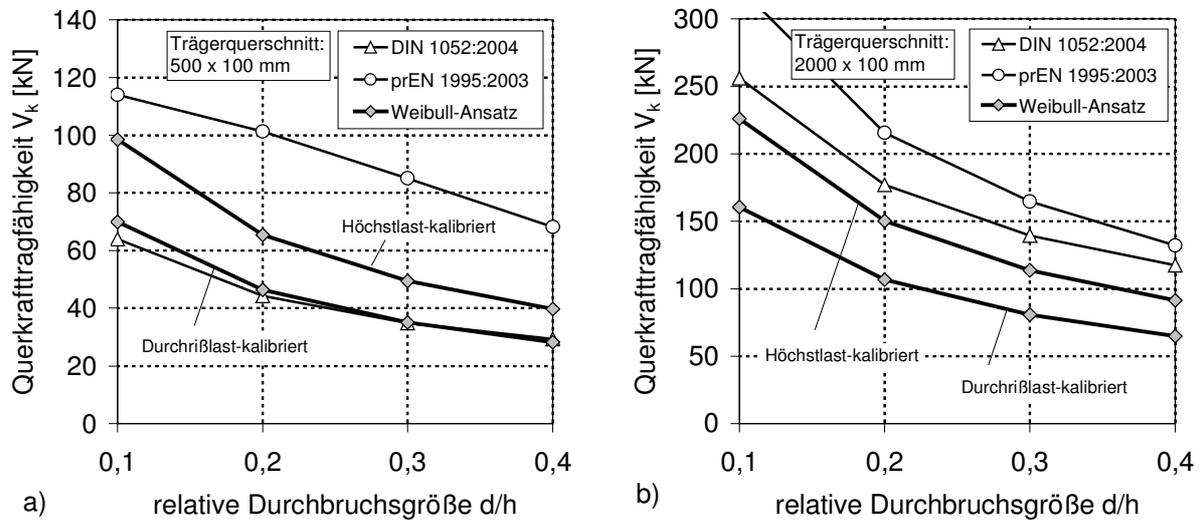


Bild 50a, b: Rechnerische charakteristische Querkrafttragfähigkeiten runder Durchbrüche mit $M/V = 3h$ für GL 32h (BS 16h) in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße d/h nach den Bemessungsansätzen DIN 1052:2004, prEN 1995-1-1:2003 und Weibull-basiertem Modell (Durchrißlast-kalibriert und Höchstlast-kalibriert)
a) Trägerquerschnitt: 500×100 mm b) Trägerquerschnitt: 2000×100 mm

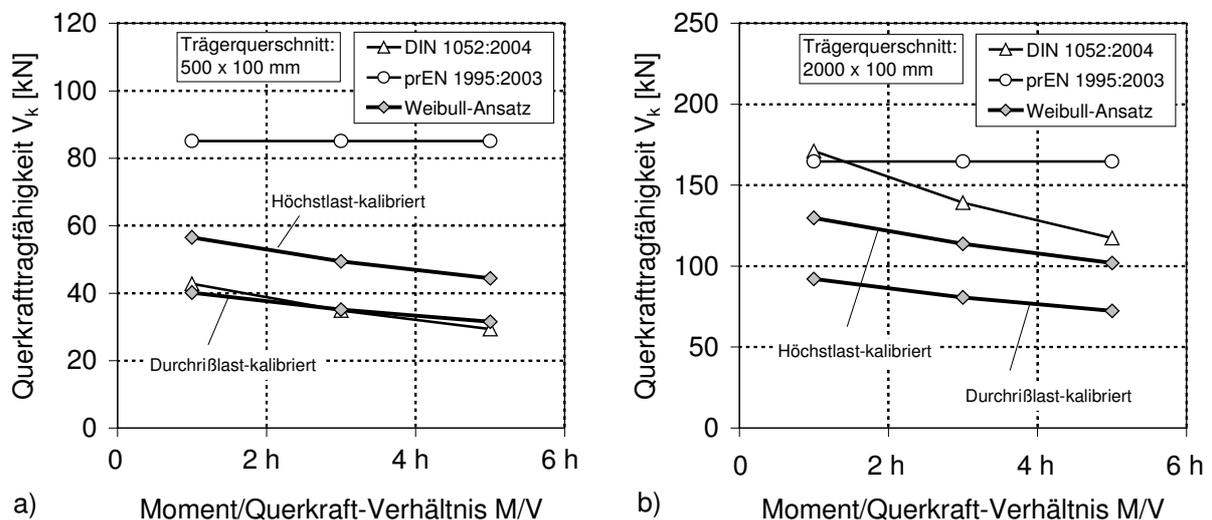


Bild 51a, b: Rechnerische charakteristische Querkrafttragfähigkeiten runder Durchbrüche mit $d/h = 0,3$ für GL 32h (BS 16h) in Abhängigkeit vom Moment/Querkr.-Verhältnis M/V nach den Bemessungsansätzen DIN 1052:2004, prEN 1995-1-1:2003 und Weibull-basiertem Modell (Durchrißlast-kalibriert und Höchstlast-kalibriert)
a) Trägerquerschnitt: 500×100 mm b) Trägerquerschnitt: 2000×100 mm

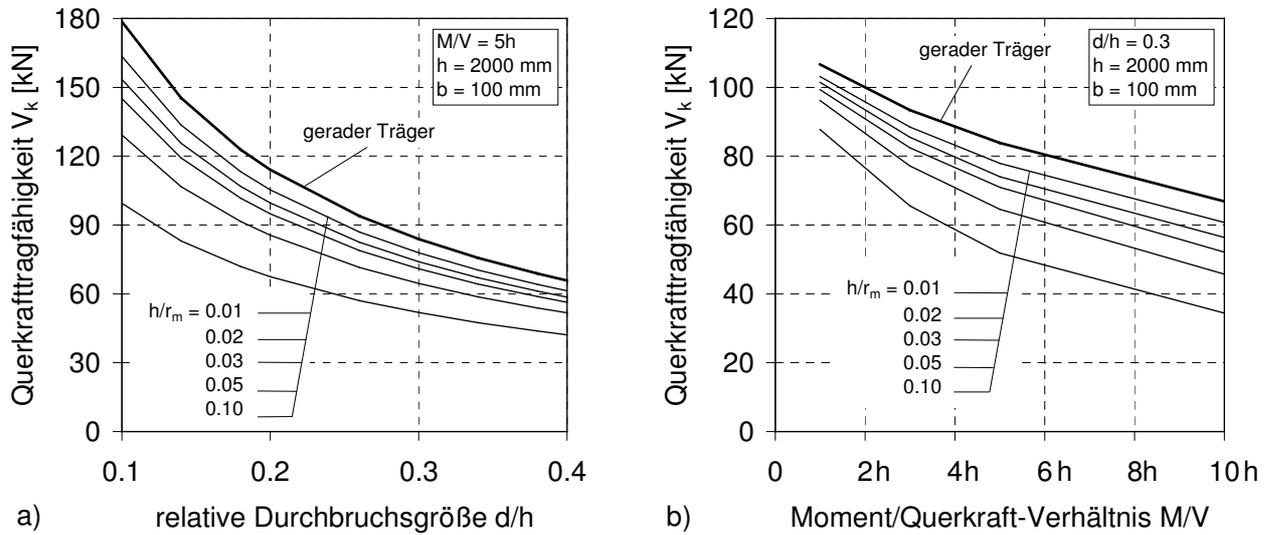


Bild 52a, b: Berechnete Durchrißlast-kalibrierte charakteristische Querkrafttragfähigkeiten run-
der Durchbrüche nach dem Weibull-basierten Ansatz für verschiedene Träger-
krümmungen für einen Trägerquerschnitt: 2000×100 mm
a) in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße d/h
b) in Abhängigkeit vom Moment/Querkraft-Verhältnis M/V

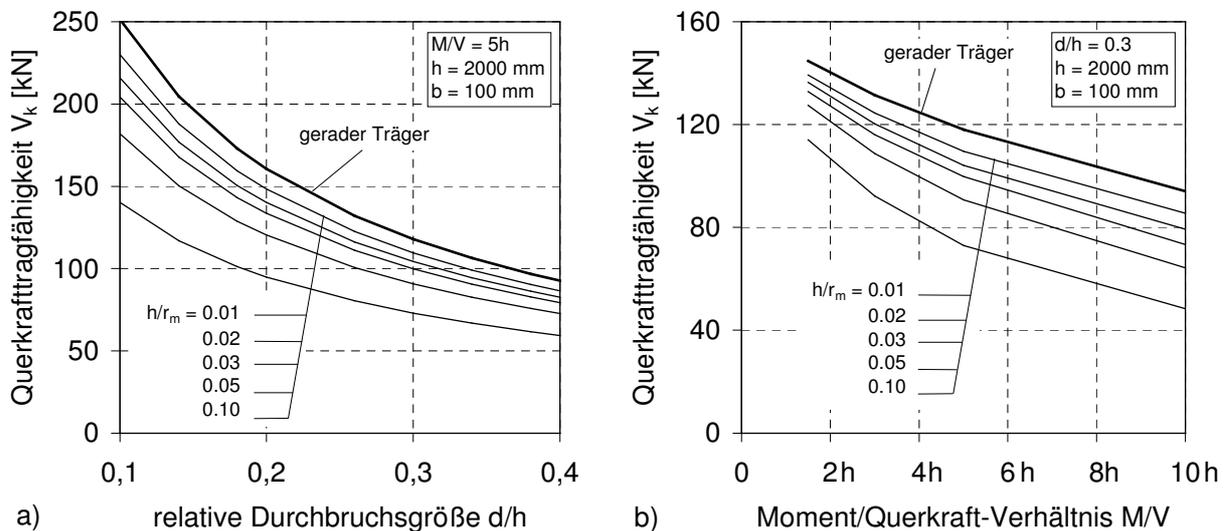


Bild 53a, b: Berechnete Höchstlast-kalibrierte charakteristische Querkrafttragfähigkeiten run-
der Durchbrüche nach dem Weibull-basierten Ansatz für verschiedene Trägerkrüm-
mungen für einen Trägerquerschnitt: 2000×100 mm
a) in Abhängigkeit von der relativen Durchbruchgröße d/h
b) in Abhängigkeit vom Moment/Querkraft-Verhältnis M/V

Tabelle 27 Größeneinfluß der betrachteten Bemessungsansätze (Verhältnis der aufnehmbaren Querkräfte); jeweils unter Betrachtung gleicher d/h- und M/V-Verhältnisse

Bemessungsansatz	Größeneinfluß		Beispiel für Größeneinfluß	
	Höheneinfluß	Breiteneinfluß	$h_1/h_2 = 2$	$b_1/b_2 = 2$
DIN 1052:2004	$\frac{h_1}{h_2}$	$\frac{b_1}{b_2}$	2.00	2.00
prEN 1995:2003	$\left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{0,5}$	$\frac{b_1}{b_2}$	1.41	2.00
Weibull-Ansatz	$\frac{h_1}{h_2} \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{0,4}$	$\frac{b_1}{b_2} \left(\frac{b_2}{b_1}\right)^{0,2}$	1.52	1.74