

**Gutachten zur Überprüfung  
des Zuverlässigkeitsindex der  
EN 12602 – Vorgefertigte bewehrte  
Bauteile aus dampfgehärtetem  
Porenbeton**

**T 3215**

T 3215

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

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

2009

ISBN 978-3-8167-8081-6

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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

# **Gutachten zur Überprüfung des Zuverlässigkeitsindex der EN 12602 - Vorgefertigte bewehrte Bauteile aus dampfgehärtetem Porenbeton**

**DIBt ZP52-5 -7.262-1206/06**

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstrasse 20/L  
Berlin

Gutachter: Dr.-Ing. W. Roeser

Gutachten: G06-09  
Datum: 16.01.2009

Das Gutachten umfasst 56 Seiten und keine Anlage.

## **Inhalt:**

1.	Veranlassung und Zielsetzung	3
2.	Methodik	6
3.	Statistische Kennwerte der Bauteileigenschaften	8
4.	Biegung mit Längskraft	20
5.	Querkraft und Torsion	26
6.	Durchstanzen	45
7.	Verankerung	48
8.	Zusammenfassung und Empfehlung für das NAD	52
9.	Literatur	53

## 1. Veranlassung und Zielsetzung

Gemäß DIN 1055-100 [1] muss ein Bauwerk derart bemessen sein, dass die während der Errichtung und Nutzung möglichen Einwirkungen mit ausreichender Zuverlässigkeit vom Bauteil aufgenommen werden können. Das Maß der Zuverlässigkeit wird durch den Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  beschrieben, wobei in DIN 1055-100, Anhang B.4 für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei einem Bezugsraum von 50 Jahren  $\beta = 3,8$  angegeben wird, was einer Versagenswahrscheinlichkeit von  $P_f = 7,2 \cdot 10^{-5}$  ( $< 1 : 10.000$ ) entspricht. Der Zuverlässigkeitsindex  $\beta = 3,8$  aus DIN 1055-100 steht in guter Übereinstimmung zu dem angestrebten Zuverlässigkeitsindex für die vorgesehene Nutzungsdauer eines Bauwerks gemäß EC 1 [2].

In der praktischen Bemessung werden die Lasten mit Teilsicherheitsbeiwerten auf der Einwirkungsseite multipliziert und die charakteristischen Bauteilwiderstände mit entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten auf der Widerstandsseite dividiert. Durch diese Vorgehensweise wird im Sinne der DIN 1055-100 die Zuverlässigkeit des Bauteils verursachungsgerecht sichergestellt. Für bewehrte Bauteile aus Porenbeton werden die Teilsicherheitsbeiwerte in der europäischen Norm für Porenbeton EN 12602:2008, Anhang D [3] angegeben, wo für duktilen Biegeversagen  $\gamma_c = 1,44$  und für sprödes Versagen  $\gamma_c = 1,73$  festgelegt wird (Bild 1). Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_c$  für Porenbeton setzt sich multiplikativ aus den Sicherheitsparametern  $k_{\gamma 1}$ ,  $k_{\gamma 2}$  und  $k_{\gamma 3}$  zusammen. Dabei wird für den rechnerischen Nachweis von  $k_{\gamma 1} = 1,0$  für zähes Versagen und  $k_{\gamma 1} = 1,20$  für sprödes Versagen ausgegangen. Weiterhin wird von einer normalen Genauigkeit bei der Bestimmung der Materialparameter ausgegangen, was durch den Beiwert  $k_{\gamma 2} = 1,1$  berücksichtigt wird. Schließlich wird von einem Variationskoeffizienten für geometrische Größen von  $V_G = 0,02$ , für den Baustoff von  $V_f = 0,10$  und für die Modellunsicherheit von  $V_m = 0,10$  ausgegangen. Daraus ergibt sich der Beiwert  $k_{\gamma 3} = 1,31$ . Für den Betonstahl wird der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_s = 1,15$  festgelegt. Der Zuverlässigkeitsindex  $\beta = 4,7$  entspricht gemäß [1] und [2] einem Bezugszeitraum von einem Jahr.

Tabelle D.1 — Sicherheitsparameter für die Art des Versagens

Art des Versagens	Zäh	Spröde
$k_{\gamma 1}$	1,00	1,20

Tabelle D.2 — Sicherheitsparameter für die Genauigkeit bei der Bestimmung des Materialparameters

Genauigkeit des Materialparameters	Gut	Normal
$k_{\gamma 2}$	1,00	1,10

Tabelle D.3 — Vom Variationskoeffizienten abhängige Sicherheitsparameter

$V_G$ (Geometrie)	0,02	0,02	0,02	0,02
$V_m$ (Modell)	0,05	0,05	0,10	0,10
$V_f$ (Baustoff)	0,05	0,10	0,05	0,10
$k_{\gamma 3}$	1,15	1,20	1,30	1,31

Tabelle D.4 — Teilsicherheitsbeiwerte

Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_M$		Bemessung auf rechnerischem Wege		Bemessung anhand von Prüfungen $\gamma_{comp}$	
		$\gamma_s$	$\gamma_c$	Direkte Anwendung <sup>a</sup>	Erweiterte Anwendung <sup>a</sup>
Bauteile mit statisch anrechenbarer <sup>b</sup> Bewehrung	Betonstahl $\gamma_s$	1,15 (1,0 · 1,0 · 1,15)	—	—	—
Bauteile mit statisch anrechenbarer <sup>b</sup> Bewehrung	Zähes Biegeversagen <sup>c</sup> $\gamma_c/\gamma_{comp}$	—	1,44 (1,0 · 1,1 · 1,31)	1,15 (1,0 · 1,0 · 1,15)	1,30 (1,0 · 1,0 · 1,30)
Bauteile mit statisch anrechenbarer <sup>b</sup> Bewehrung	Sprödes Versagen $\gamma_c/\gamma_{comp}$	—	1,73 (1,2 · 1,1 · 1,31)	1,38 (1,2 · 1,0 · 1,15)	1,56 (1,2 · 1,0 · 1,30)
Bauteile mit statisch nicht anrechenbarer <sup>b</sup> Bewehrung	Sprödes Versagen $\gamma_c/\gamma_{comp}$	—	1,73 (1,2 · 1,1 · 1,31)	1,44 (1,2 · 1,0 · 1,2)	1,57 (1,2 · 1,0 · 1,31)

<sup>a</sup> Direkte und erweiterte Anwendung ist im Anhang B, B.1 definiert.  
<sup>b</sup> Bauteil mit statisch anrechenbarer und mit statisch nicht anrechenbarer Bewehrung, siehe 3.1.3.  
<sup>c</sup> Porenbeton verhält sich im Zusammenwirken mit statisch anrechenbarer Bewehrung zäh, wie z. B. beim Biegeversagen.

Bild 1.1: Teilsicherheitsbeiwerte gemäß 12602:2008, Anhang D mit  $\gamma = k_{\gamma 1} k_{\gamma 2} k_{\gamma 3}$

In der derzeit bauaufsichtlich eingeführten deutschen Norm für Porenbeton DIN 4223 [4] werden andere Teilsicherheitsbeiwerte auf der Materialseite (DIN 4223-5:2003-12) (Bild 1.2), andere Festigkeitsklassen, andere Anforderungen an die Materialeigenschaften und andere Grenzabmaße als in EN 12602:2008 angegeben, ohne dass der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  ausgewiesen wird. Die gleichen Teilsicherheitsbeiwerte werden auch in E D-DIN 4223-103:2008-06, Tabelle 2 [5] als deutsche Anwendungsnorm zu EN 12602 vorgesehen.

	Teilsicherheitsbeiwert
Porenbeton duktils Versagen	$\gamma_{c1} = 1,3$
Porenbeton sprödes Versagen	$\gamma_{c2} = 1,7$
Betonstahl	$\gamma_s = 1,15$

**Bild 1.2:** Teilsicherheitsbeiwerte gemäß DIN 4223-5:2003 und E-DIN 4223-103:2008-06, Tabelle 2 für die ständige und vorübergehende Bemessungssituation

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Überprüfung der Zuverlässigkeit des Sicherheitskonzepts der EN 12602 und der DIN 4223-103 für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Zur Beurteilung werden die aus der Eigen- und Fremdüberwachung der Produktion aufgezeichneten Bauteileigenschaften (Festigkeit, Geometrie, Wichte) zunächst statistisch ausgewertet. Durch Zuordnung von entsprechenden Verteilungsfunktionen werden die Grundparameter für die statistische Auswertung beschrieben.

Durch Auswertung der Bemessungsgleichungen der EN 12602 für Biegung mit Längskraft, Querkraft, Torsion, Durchstanzen und Verankerung werden unter Berücksichtigung der tatsächlichen statistischen Streuungen die Zuverlässigkeitsbeiwerte für die einzelnen Nachweise ausgewiesen. Dazu wird für ausgewählte Druckfestigkeitsklassen AAC 1,5 bis AAC 10 jeweils eine eigene Auswertung mit Monte Carlo Simulationen durchgeführt. Aus den Untersuchungen werden Empfehlungen zu den Teilsicherheitsbeiwerten auf der Widerstandsseite für das Nationale Anwendungsdokument (NAD) zur EN 12602 abgeleitet. Es wird darauf hingewiesen, dass bei der eigenen Begutachtung mit Monte Carlo Analysen stets von einem grundsätzlich richtigen mechanischen Modell in EN 12602 ausgegangen wird. Fehler in der Modellbildung können mit der Methode nicht festgestellt werden, dazu sind stets Versuche auszuwerten.

## 2. Methodik

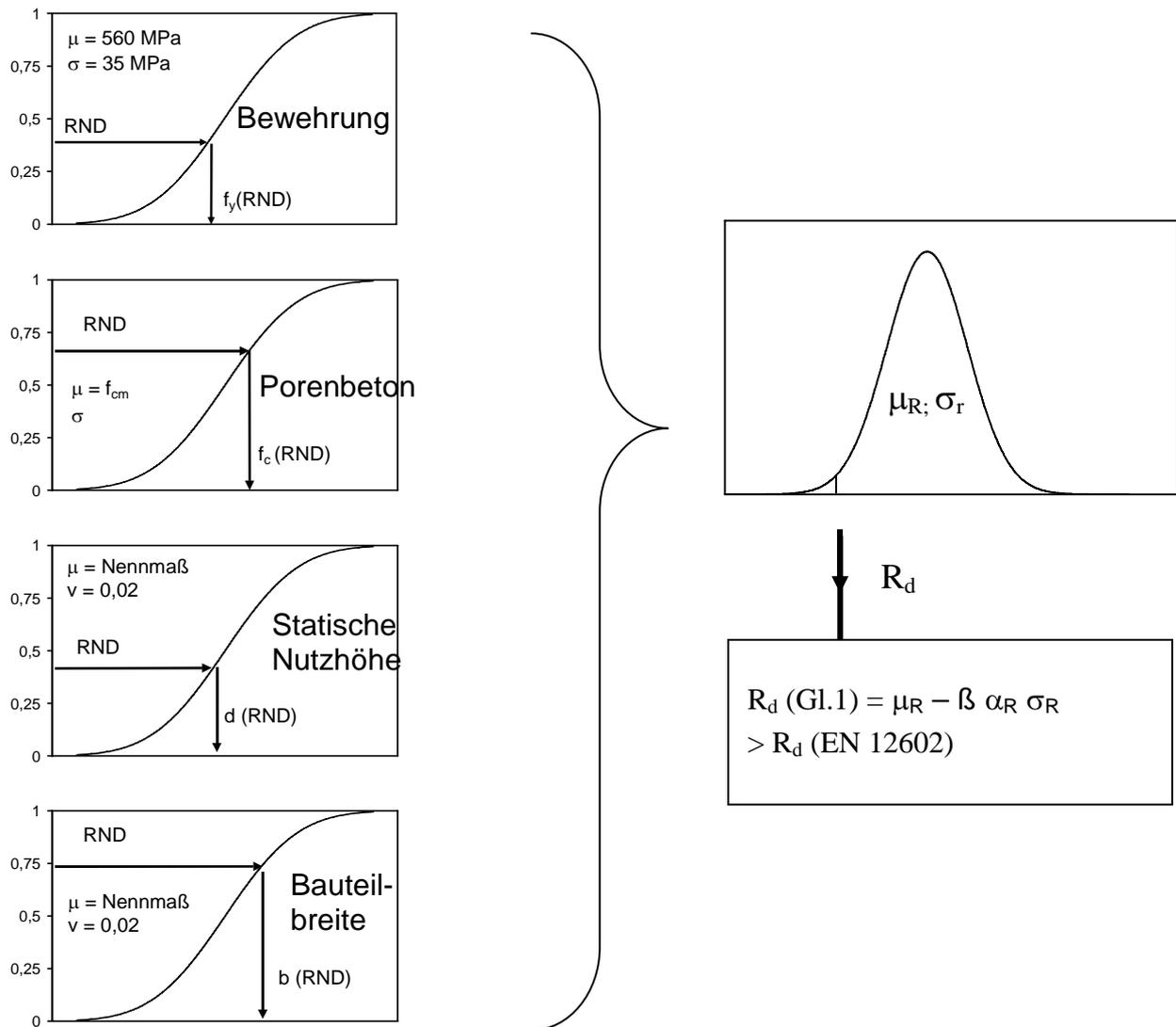
Im vorliegenden Gutachten wird ausschließlich die Widerstandsseite des Porenbetons betrachtet. Die Entkopplung des Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  zwischen der Widerstands- und der Einwirkungsseite wird in DIN 1055-100 über die Wichtungsfaktoren  $\alpha_E$  und  $\alpha_R$  erreicht. Der Bemessungswert der Widerstandsfunktion  $R_d$  ergibt sich für eine normalverteilte Funktion gemäß Gleichung 1. Für eine Lognormalverteilung und eine Gumbel-Verteilung werden in DIN 1055-100, Tabelle B.3 entsprechende Funktionen angegeben.

$$R_d = \mu_R(x_i) - \beta \cdot \alpha_R \cdot \sigma_R \quad (2.1)$$

Mit:  $\mu_R$  = Mittelwert der Widerstandsfunktion in Abhängigkeit der Variablen  $x_i$   
 $\beta$  = Zuverlässigkeitsindex  
 $\alpha_R$  = 0,8 Wichtungsfaktor für  $0,16 < \sigma_E/\sigma_R < 7,6$   
 $\sigma_R$  = Standardabweichung Widerstand  
 $\sigma_E$  = Standardabweichung Einwirkung

Die Zuverlässigkeit der Bemessungsfunktion Gleichung (2.1) lässt sich i.d.R. nicht unmittelbar ableiten, da mehrere streuende Einflussgrößen sowohl multiplikativ als auch additiv eingehen können. Zur Überprüfung der Zuverlässigkeit wird die den Mittelwert der Widerstandsfunktion beschreibende Gleichung (2.1) in einer Monte Carlo Simulation [5-13] mit streuenden Eingangswerten belegt (Bild 2.1). Mit einem Zufallsgenerator wird eine Folge von unabhängig verteilten Variablen RND im Intervall [0;1] erzeugt. Durch Transformation mit der Summenverteilungsfunktion werden aus RND die streuenden Eingangsgrößen  $x_i$  für Gleichung (2.1) berechnet. Aus Umformung von Gleichung 2.1 kann der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  gemäß Gleichung 2.2 ermittelt werden.

$$\beta = (\mu_R - R_d) / (\alpha_R \cdot \sigma_R) \quad (2.2)$$



**Bild 2.1:** Monte-Carlo-Simulation zur Generierung der Verteilungsfunktion des Bauteilwiderstandes für das Beispiel Biegung mit Längskraft bei streuenden Eingangsgrößen  $x_{i=1..4} = f_y, f_c, d$  und  $b$

In der Monte-Carlo-Simulation wird so in ausreichender Anzahl von Testläufen mit voneinander unabhängig streuenden Eingangswerten künstlich die Dichtefunktion des Bauteilwiderstandes  $R$  generiert. Für diese können der Mittelwert und die Standardabweichung gemessen werden, so dass anschließend für den Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  mit Gleichung 2.1 der Bemessungswert des Bauteilwiderstandes  $R_d$  berechnet werden kann. Zur Durchführung der Untersuchung steht ein eigenes Statistik-Programm zur Verfügung, das in [6] entwickelt wurde. Das Programm wurde bereits für die statistische Absicherung von Bemessungsformeln für Heft 525 des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton und Zulassungsverfahren beim Deutschen Institut für Bautechnik eingesetzt. Weitere Grundlagen werden in [7] bis [15] beschrieben.

### 3. Statistische Kennwerte der Bauteileigenschaften

#### 3.1 Bauteilabmessungen

Gemäß EN 12602:2008, Tabelle 8 werden die Grenzabweichungen der Bauteilabmessungen entsprechend der Toleranzklassen T1, T2 und T3 festgelegt (Tabelle 3.1). Die Toleranzklasse T1 ist hinsichtlich Höhe und Breite (+/- 3 mm) vergleichbar zu den bisherigen Grenzabmessungen nach DIN 4223-1:2003, Abschnitt 5 für bewehrte Dachbauteilen (DA) und Deckenbauteilen (DE) sowie zu Wandbauteilen mit statisch anrechenbarer Bewehrung (WL und WS).

**Tabelle 8 — Grenzabweichungen der Bauteilmaße**

Maße in Millimeter

Toleranzklasse	T 1	T 2	T 3
Länge	±5	±3,0	±3,0
Höhe	±3	±1,0	±1,0
Breite	±3	±1,5	±1,5
Ebenheit der Kontaktflächen in Fugen	Keine Anforderung	Keine Anforderung	≤ 1,0
Parallelität der Kontaktflächen in Fugen	Keine Anforderung	Keine Anforderung	≤ 1,0

**Tabelle 3.1:** Grenzabweichungen der Bauteilmaße gemäß Tabelle 8 der EN 12602

Die Toleranzklassen T2 und T3 lässt Toleranzen für die Bauteilhöhe +/- 1 mm und die Bauteilbreite +/- 1,5 mm zu, während bisher gemäß DIN 4223-1:2003 für Dachbauteile die mit Dünnbettmörtel verbunden werden (DA-D) sowie Wandbauteile mit statisch nicht anrechenbarer Bewehrung (SW, LW) für die Bauteildicke +/- 1,5 mm und die für die Breite +/- 1 mm festgelegt war.

Gemäß EN 12602, Abschnitt 5.2.1 ist die Lage der statisch anrechenbaren Bewehrung entweder vom Hersteller zu deklarieren oder im Bemessungsdokument für jedes Produkt anzugeben. Die tatsächlich vorhandene wirksame Höhe darf gegenüber dem Bemessungswert um nicht mehr als 5 mm vermindert werden. Die Lage der Stäbe der Querbewehrung darf vom Nennmaß um nicht mehr als +/- 10 mm abweichen. Gemäß DIN 4223-1, Abschnitt 4.2.2 ist für die Lage der Bewehrung im Bauteilquerschnitt auf +/- 5 mm zu begrenzen und in Bauteillängsrichtung auf +/- 10 mm.

Die von der Fa. Xella zur Verfügung gestellten Daten aus der Eigen- und Fremdüberwachung für das Jahr 2005 in Werk 4 zeigen, dass die Grenzabmessungen von +/- 3 mm für die Dicke und Breite - mit Ausnahme von einem Ausreißer - eingehalten wurde, so dass sie auch direkt der Toleranzklasse T1 zugeordnet werden können. Die eigene statistische Auswertung der Stichprobe mit insgesamt  $n = 173$  überprüften Bauteilen ergibt ein mittleres absolutes Grenzabmaß  $\sum(\text{Soll-Ist})/n = - 1,23$  mm für die Bauteilbreite und  $+ 0,79$  mm für die Bauteilhöhe.

Die bezogenen Grenzabmaße Soll/Ist führen zu den statistischen Kennwerten gemäß Tabelle 3.2. Auf Grund der industriellen Produktion werden sehr hohe Anforderungen an die Maßhaltigkeit erreicht, was durch den Mittelwert von 1,0 und den Variationskoeffizient von 1% belegt wird. Der in Tabelle D.3 der EN12602 vorausgesetzte Variationskoeffizient für geometrische Kennwerte  $V_G = 2 \%$  für Porenbeton kann durch die Auswertung der Stichprobe somit bestätigt werden.

	Bauteilhöhe	Bauteilbreite
Mittelwert $M_x$	0,9978 $\approx 1,0$	1,0038 $\approx 1,0$
Standardabweichung $S_x$	0,009	0,004
Variationskoeffizient $V_x$	0,009 $\approx 1 \%$	0,004 $\leq 1 \%$

**Tabelle 3.2:** Statistische Auswertung der Bauteilabmessungen Soll/Ist

## 3.2 Festigkeit und Wichte Porenbeton

### 3.2.1 Definition des charakteristischen Wertes in EN 12602

Gemäß EN 12602:2008, Abschnitt 4.2.3 werden die charakteristischen Festigkeitswerte für Porenbeton definiert als das 5% Quantil der betreffenden Eigenschaft ( $p = 0,95$ ) bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von  $\gamma = 0,75$ . Statistische Verfahren zur Qualitätskontrolle werden im informativen Anhang F der EN 12602 gegeben. Dabei wird die Bayes'sche Methode mit "unbestimmten" Ausgangsverteilungen verwendet, die zu gleichen Ergebnissen wie die klassische Statistik mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 0,75 führt. Der Beiwert  $k_s$  zur

Ermittlung des charakteristischen Werts  $X_k$  wird dabei in Tabelle F.2 übereinstimmend zu EC1, Anhang D, Tabelle D.1 angegeben (Tabelle 3.3).

Dabei ist

$$\bar{x}_k = m_x(1 - k_s V_x)$$

der charakteristische Wert von  $\bar{x}_i$  für die  $n$  geprüften Probekörper.

Wenn der Variationskoeffizient  $V_x$  bekannt ist, z. B. durch die Auswertung von früher unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführten Prüfungen, ergibt sich der Beiwert  $k_s$  aus Tabelle F.2 für bekannte Streuung.

**Tabelle F.2 — Beiwert  $k_s$  in Abhängigkeit von der Probenanzahl  $n$  für einen Ausfallprozentsatz von 5 % ( $p = 0,95$ ) und eine Aussagewahrscheinlichkeit von  $\gamma \approx 0,75$  (unter Verwendung von Bayes'schen Methoden mit „unbestimmter“ Ausgangsverteilung)**

$n$	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$k_s$ für bekannte Streuung	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
$k_s$ für unbekannte Streuung	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,75	1,73	1,64

**Tabelle 3.3:** Tabelle F.2 aus EN 12602 zur Ermittlung des charakteristischen Werts  $X_k$

### 3.2.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeitsklassen AAC 1,5 bis AAC 10 und die zugehörigen charakteristischen Druckfestigkeiten  $f_{ck}$  von Porenbeton werden in EN 12602, Abschnitt 4.2.4, Tabelle 2 angegeben (Tabelle 3.4). Die EN 12602 definiert somit einen wesentlich breiteren Bereich von Druckfestigkeitsklassen, während bisher in der DIN 4213-1:2003 die Druckfestigkeitsklassen P2,2; P3,3 und P4,4 mit den entsprechenden Druckfestigkeiten  $f_{ck} = 2,2; 3,3$  und  $4,4$  MPa geregelt waren.

**Tabelle 2 — Druckfestigkeitsklassen von dampfgehärtetem Porenbeton**

Festigkeiten in Megapascal

Druckfestigkeits- klasse	AAC 1,5	AAC 2	AAC 2,5	AAC 3	AAC 3,5	AAC 4	AAC 4,5	AAC 5	AAC 6	AAC 7	AAC 8	AAC 9	AAC 10
$f_{ck}$	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0

**Tabelle 3.4:** Druckfestigkeitsklassen von Porenbeton gemäß EN 12602

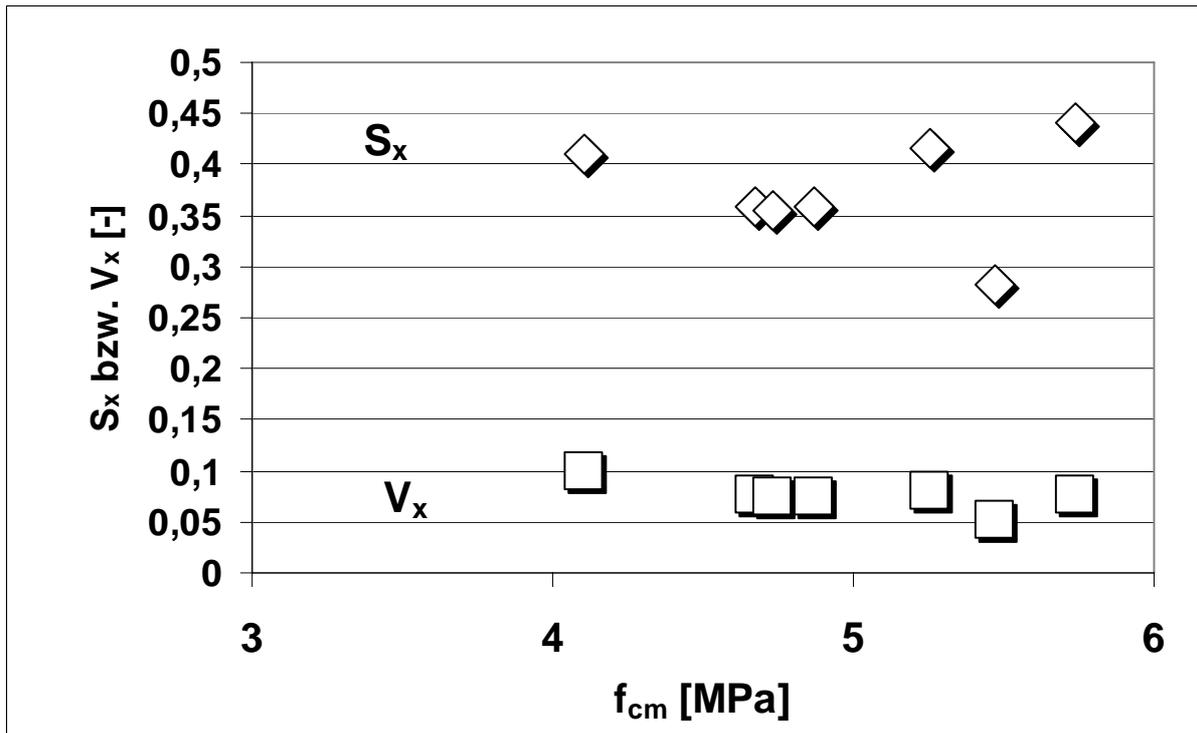
Die von der Fa. Xella zur Verfügung gestellten Daten aus der Eigen- und Fremdüberwachung für das Jahr 2005 aus 4 Werken wurden gemäß der vorgegebenen Klasseneinteilung aus DIN 4223-1 statistisch ausgewertet (Tabelle 3.5). Es zeigt sich, dass der Variationskoeffizient für

die ausgewerteten Stichproben kleiner ist, als gemäß EN 12602 Tabelle D.3 vorausgesetzt ( $V_x < 0,1$ ). Eine systematische Abhängigkeit der Standardabweichung oder des Variationskoeffizienten von der Festigkeitsklasse, wie er sich für Konstruktionsbeton ergibt, konnte für die sieben hier ausgewerteten Gruppen aus Porenbeton nicht signifikant festgestellt werden (Bild 3.1).

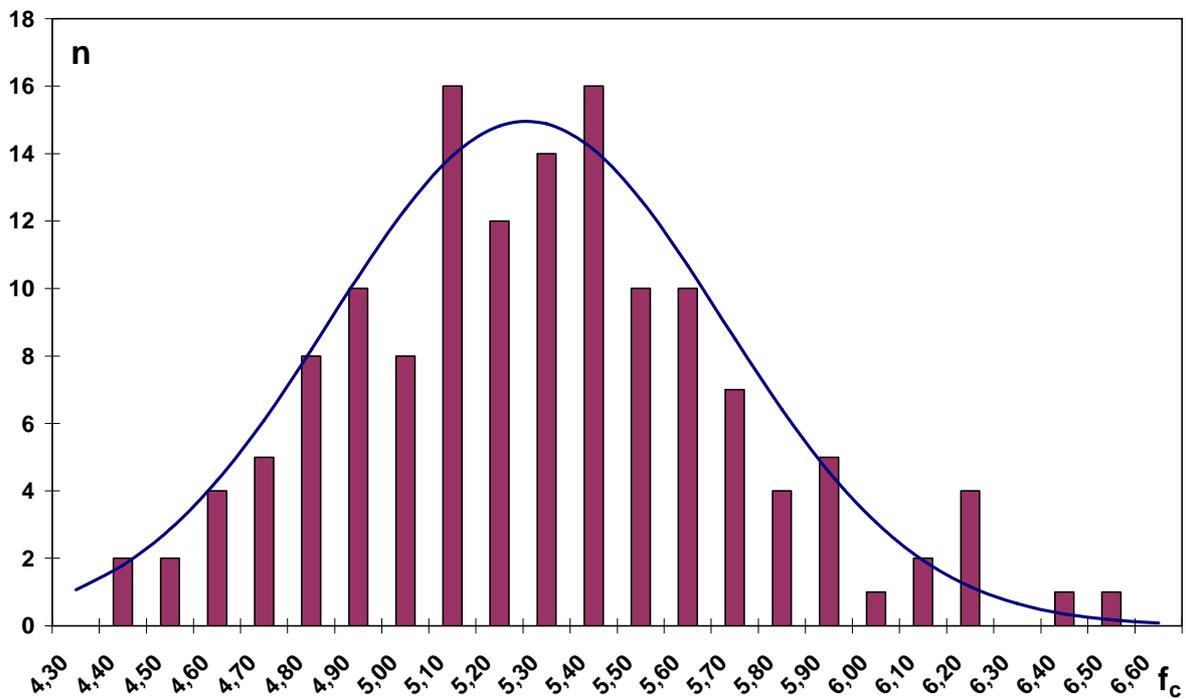
Gruppe	Werte/Klasse n / [-]	Mittelwert $M_x$ [MPa]	Standardabweichung $S_x$ [MPa]	Variationskoeffizient $V_x$ [-]
1 (Werk 1)	98 / P3,3-0,5	4,67	0,3593	0,0769
2 (Werk 1)	142 / P 4,4-0,5	5,26	0,4166	0,0792
3 (Werk 2)	175 / P 3,3-0,5	4,11	0,4097	0,0998
4 (Werk 2)	215 / P4,4-0,5	4,87	0,3591	0,0738
5 (Werk 4)	7 / P3,3-0,5	4,73	0,3545	0,0749
6 (Werk 4)	88 / P4,4-0,55	5,47	0,2834	0,0518
7 (Werk 4)	5 / P 4,4-0,6	5,47	0,4401	0,0767

**Tabelle 3.5:** Statistische Auswertung der Druckfestigkeitsproben aus 7 Gruppen

Gemäß "Porenbeton Bericht 23 - Erläuterungen zu DIN 4223" [26] hat sich zur Bewertung der im Rahmen der Eigen- und Fremdüberwachung anfallenden Prüfergebnisse die Gauß'sche Normalverteilung bewährt. Dies kann durch eigene Auswertung an den zur Verfügung gestellten Daten bestätigt werden, wie in Bild 3.2 für die Gruppe 2 aus Tabelle 3.5 grafisch dargestellt.



**Bild 3.1:** Standardabweichung  $S_x$  (Rauten) und Variationskoeffizient  $V_x$  (Quadrate) in Abhängigkeit der Druckfestigkeit  $f_{cm}$



**Bild 3.2:** Überprüfung der Verteilung der Druckfestigkeit von Gruppe 2 aus Tabelle 3.5 mit der Gauß'schen Normalverteilung

### 3.2.3 Zugfestigkeit

Der Hersteller darf die Biegezugfestigkeit  $f_{\text{eflk},g}$  anhand von Proben gemäß EN 1351 deklarieren. Der charakteristische Wert muss größer sein als der deklarierte Wert. Der Rechenwert der charakteristischen Zugfestigkeit bzw. die Biegezugfestigkeit des Porenbetons wird in EN 12602, Abschnitt 4.2.5 als Schätzwert angegeben. Diese Werte stehen in Übereinstimmung mit einer gutachterlichen Stellungnahme von Professor Reinhardt [23]. Weiterhin empfiehlt Reinhardt den Einfluss der Höhe des Querschnitts auf die Biegezugtragfähigkeit gemäß folgender Gleichung 3.1 zu bestimmen.

$$f_{\text{eflk};0,05} = (1 + 0,13 / \sqrt{h}) f_{\text{ctk};0,05} \text{ mit } h \text{ in [m]} \quad (3.1)$$

Sofern keine Versuchsergebnisse vorliegen, kann ein Schätzwert für die Zugfestigkeit bzw. die Biegezugfestigkeit mithilfe der folgenden Gleichungen erhalten werden:

$$f_{\text{ctk}; 0,05} = 0,10 f_{\text{ck}} \quad (4a)$$

$$f_{\text{ctk}; 0,95} = 0,24 f_{\text{ck}} \quad (4b)$$

$$f_{\text{eflk}; 0,05} = 0,18 f_{\text{ck}} \quad (5a)$$

$$f_{\text{eflk}; 0,95} = 0,36 f_{\text{ck}} \quad (5b)$$

Dabei ist

$f_{\text{ctk}; 0,05}$  der charakteristische Wert des 5 %-Quantils der zentrischen Zugfestigkeit, in Megapascal;

$f_{\text{ctk}; 0,95}$  der charakteristische Wert des 95 %-Quantils der zentrischen Zugfestigkeit, in Megapascal;

$f_{\text{eflk}; 0,05}$  der charakteristische Wert des 5 %-Quantils der Biegezugfestigkeit, in Megapascal;

$f_{\text{eflk}; 0,95}$  der charakteristische Wert des 95 %-Quantils der Biegezugfestigkeit, in Megapascal;

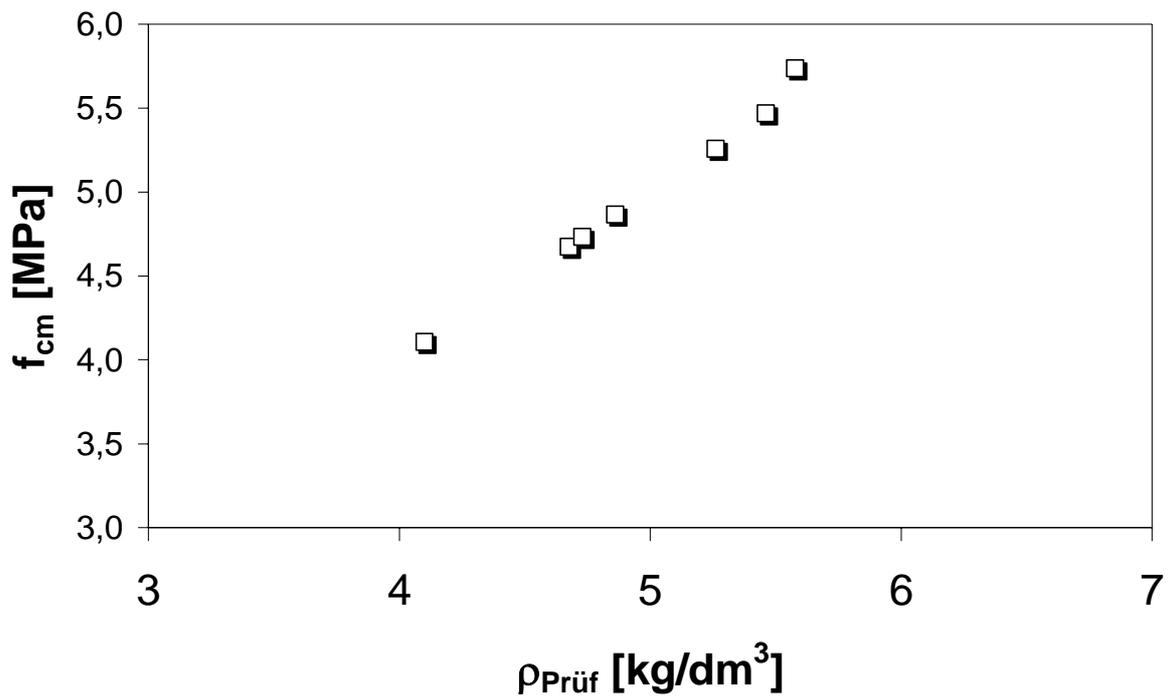
$f_{\text{ck}}$  der charakteristische Wert der Druckfestigkeit nach 4.2.4, in Megapascal.

ANMERKUNG Wird die deklarierte Biegezugfestigkeit  $f_{\text{eflk}}$  der Bemessung zu Grunde gelegt, wird ein Abminderungsfaktor von 0,8 zur Berücksichtigung des Größeneinflusses verwendet.

[Auszug aus EN 12602]

### 3.2.4 Dichte

Weiterhin ist bei der Anwendung von Porenbeton die Korrelation zwischen Wichte und Festigkeit zu beachten. In Bild 3.3 ist deutlich die zunehmende Festigkeit mit zunehmender Dichte feststellbar. Die statistische Auswertung in Tabelle 3.6 zeigt, dass die Standardabweichung  $S_x$  sowohl der Prüfrohdichte als auch der Trockenrohdichte sehr gering ist.



**Bild 3.3:** Korrelation zwischen mittlerer Prüfrohdichte  $\rho$  und Druckfestigkeit  $f_{\text{cm}}$  mehrerer Werke der Xella Gruppe

	Prüfrohdichte		Trockenrohdichte	
	$M_x \text{ [kg/dm}^3\text{]}$	$S_x \text{ [kg/dm}^3\text{]}$	$M_x \text{ [kg/dm}^3\text{]}$	$S_x \text{ [kg/dm}^3\text{]}$
P3,3-0,5	0,52	0,012	0,49	0,011
P4,4-0,55	0,57	0,016	0,54	0,013
P3,3-0,5	0,52	0,015	0,49	0,014
P4,4-0,55	0,59	0,013	0,55	0,011
P3,3-0,5	0,52	0,010	0,49	0,007
P4,4-0,55	0,57	0,012	0,54	0,009
P4,4-0,6	0,60	0,016	0,57	0,010

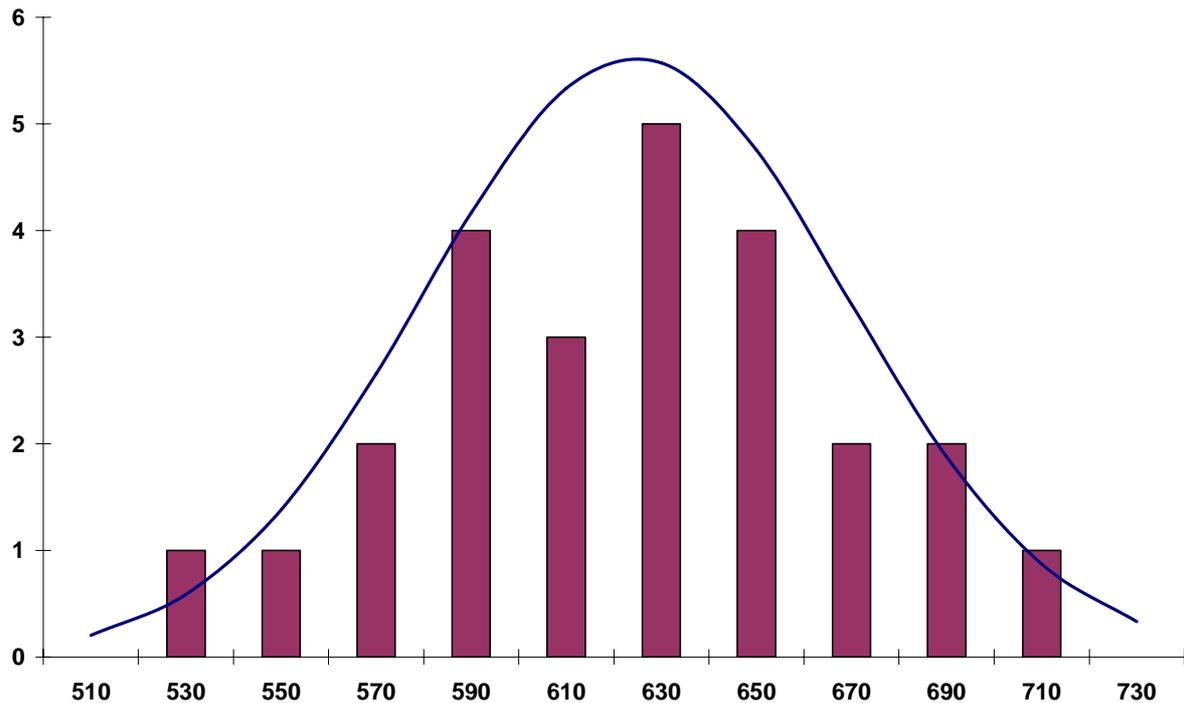
**Tabelle 3.6:** Statistische Auswertung hinsichtlich der Prüf- und Trockenrohdichte mehrerer Werke der Xella Gruppe ( $M_x$  = Mittelwert,  $S_x$  = Standardabweichung)

### **3.3 Festigkeit der Bewehrung**

#### **3.3.1 Streckgrenzenfestigkeit**

Gemäß EN 12602, Abschnitt 4.3.1 kann für die Bewehrung alternativ schweißgeeigneter Betonstahl nach EN 10080 oder nichtrostender Stahl nach EN 10088 eingesetzt werden. In Deutschland sind gemäß DIN 4223-1, Abschnitt 4.2.1 bisher als Bewehrung geschweißte Betonstahlmatten nach DIN 488-4 aus Rundstahl der Stahlsorte BSt 500 G oder der Stahlsorte S235 JRG2 nach DIN EN 10025 zu verwenden. Bei Verwendung von nichtrostenden Stählen sind gemäß DIN 4223 die hierfür geltenden technischen Baubestimmungen zu berücksichtigen. Im vorliegenden Gutachten wird als Bewehrung entsprechend der bisher in Deutschland vorwiegenden Anwendung Betonstahl BSt 500 betrachtet. Für die Festigkeit der Bewehrung wird dabei von dem charakteristischen Festigkeitswert  $f_{yk} = 500$  MPa ausgegangen.

Die Auswertung der von Xella zur Verfügung gestellten Werte der Betonstahlfestigkeiten aus der Fremd- und Eigenüberwachung zeigt, dass auch bei der Anwendung in Porenbeton von einer Gauß'schen Normalverteilung für den Betonstahl ausgegangen werden kann. Dies ist exemplarisch in Bild 3.4 für die Auswertung für das Jahr 2005 des Xella Werks 3 dargestellt. Dabei wurden 25 Mittelwerte aus je 3 Einzelproben (insgesamt 75 Einzelproben) an Betonstahl BSt 500 Ø 5 mm bewertet.



**Bild 3.4:** Überprüfung der Verteilung der Betonstahlstreckgrenzenfestigkeit aus Xella Werk 3 mit der Gauß'schen Normalverteilung

Gemäß EN 12602, Anhang D kann für die Bewehrung der Variationskoeffizient für Geometrie zu  $V_G = 0,02$  angenommen werden und für die Baustofffestigkeit zu  $V_f = 0,05$ . Für die Streckgrenzenfestigkeit  $A_s \cdot f_y$  ergibt sich daraus der Zusammenhang zwischen charakteristischem Wert und Mittelwert gemäß Gleichung 3.2. Von wesentlicher Bedeutung ist dabei, dass in dem Produkt  $A_s \cdot f_y$  der Variationskoeffizienten der Geometrie  $V_G$  und der Streckgrenze  $V_f$  multiplikativ eingehen. Genauso wird auch in den Versuchen zur Überwachung vorgegangen, wo sich die Spannung an der Streckgrenze aus der Division der Kraft durch den Querschnitt ( $R_{p0,2} = F_{i;0,2} / A_{si}$ ) ermittelt wird, so dass in der ausgewiesenen Spannung stets die Streuung des Querschnittswerts mit erfasst ist.

$$A_{sk} f_{yk} = A_{sm} (1 - 1,64 \cdot 0,02) f_{ym} (1 - 1,64 \cdot 0,05) = 0,89 A_{sm} f_{ym} \quad (3.2)$$

Unter Berücksichtigung des charakteristischen Werts  $f_{yk} = 500$  MPa ergibt sich der Rechenwert für die mittlere Streckgrenze zu  $f_{ym} = 500 / 0,89 = 560$  MPa, wenn entsprechend der üblichen Vorgehensweise der Querschnittswert zu  $A_s = A_{sm} = A_{sk}$  angenommen wird und die statistische Streuung über die Festigkeit erfasst wird. Unter Annahme von  $n = \infty$  Versuchen kann die zugehörige Standardabweichung zu  $(f_{ym} - f_{yk}) / 1,64 = (560 - 500) / 1,64$

= 35 MPa bestimmt werden. Die statistische Auswertung von Materialproben an Betonstahl aus der Porenbetonproduktion zeigt, dass der Betonstahl teilweise mit Überfestigkeiten eingesetzt wird (Tabelle 3.7).

Gruppe	Werte n / Ø [mm]	Mittelwert $M_x$ [MPa]	Standard- abweichung $S_x$ [MPa]	Variations- koeffizient $V_x$ [-]
1 (Werk 3)	75 / 5,0	624	44	0,0711
2 (Werk 4)	31 / 4,6	698	36	0,0519
3 (Werk 4)	9 / 5,0	696	49	0,0704
4 (Werk 4)	46 / 5,2	672	36	0,0530
5 (Werk 4)	57 / 6,0	604	50	0,0828
6 (Werk 4)	32 / 6,5	612	37	0,0609
7 (Werk 4)	26 / 7,0	595	47	0,0796
8 (Werk 4)	43 / 7,5	569	41	0,0726
9 (Werk 4)	38 / 8,0	551	44	0,0799
10 (Werk 4)	13 / 10,0	532	33	0,0623

**Tabelle 3.7:** Statistische Auswertung der Streckgrenze  $R_{p0,2}$  aus 10 Gruppen

### 3.3.2 Schweißknotenscherfestigkeit

In Porenbetonbauteilen ist die Verankerung der Längsbewehrung durch Querstäbe rechnerisch nachzuweisen, da anders als beim Stahlbeton nicht von einem Verbund zwischen Porenbeton und Bewehrung ausgegangen wird. Daher sollen in Deutschland nur die Verbundklasse B1 "*Verbund bei der Bemessung nicht berücksichtigt*" gemäß Tabelle 6 der EN 12602 und die Vorspannklasse P1 "*thermische Vorspannung bei der Bemessung nicht berücksichtigt*" gemäß Tabelle 7 der EN 12602 angewandt werden. Daher ist die Verankerung der Längsbewehrung in Deutschland stets über angeschweißte Querstäbe vorzunehmen. Gemäß EN 12602, Abschnitt 4.3.2 muss die Scherkraft  $F_{wg}$  geschweißter Knoten folgende Bedingung erfüllen:

$$F_{wg} \geq k_w f_{yk} A_{s1} \quad (8)$$

Dabei ist

$k_w$  der Beiwert für die Schweißfestigkeit, siehe Tabelle 5;

$f_{yk}$  die charakteristische Streckgrenze;

$A_{s1}$  die Querschnittsfläche des Bewehrungsstabs mit dem größeren Durchmesser des Knotens.

**Tabelle 5 — Schweißfestigkeitsklassen  
und Beiwerte  $k_w$**

Schweißfestigkeitsklasse	$k_w$
S 1	0,25
S 2	0,50

Die Scherfestigkeit geschweißter Knoten ist nach EN 1737 zu bestimmen. Die Schweißfestigkeitsklassen sind vom Hersteller nach Tabelle 5 zu deklarieren.

ANMERKUNG Üblicherweise wird die Klasse S 1 verwendet. Die Klasse S 2 sollte für Stahl mit von den nationalen Behörden geforderten besonderen Eigenschaften verwendet werden.

[Auszug aus EN 12602]

Gemäß DIN 4223-1 muss das 5%-Quantil der Grundgesamtheit der nach DIN EN 1737 ermittelten Bruchscherkraft  $S$  mindestens folgende Werte erreichen:

$$S = 0,35 A_s f_y \text{ für BSt 500G}$$

$$S = 0,50 A_s f_y \text{ für S235 JRG2}$$

In den vorliegenden Auswertungen der Fremd-/Eigenüberwachung der Firma Xella wird die erforderliche Bruchscherkraft  $S$  in Abhängigkeit des charakteristischen Werts  $f_{yk}$  ermittelt. Zur Auswertung der vorliegenden Werte aus der Fremdüberwachung wird der bezogene Wert  $k_w$  aus der an der Materialprobe ermittelten Bruchscherkraft  $F_{wg,Test}$  ermittelt:

$$k_w = F_{wg,Test} / (A_s f_{yk})$$

Tabelle 3.8 zeigt die statistische Auswertung der in Werk 4 im Jahre 2005 durchgeführten Überwachung der Schweißknoten aus Betonstahl BSt 500 auf Grundlage von DIN 488 Teil 5. Es zeigt sich, dass mit abnehmendem Verhältnis des Längsstabdurchmessers  $\emptyset$  zum Querstabdurchmesser  $\emptyset_q$  der dimensionslose Schweißfestigkeitsbeiwert  $k_w$  ansteigt. Der Variationskoeffizient der ausgewählten Gruppen liegt in der Regel zwischen 10 und 20%. Die in den Berichten dargestellten Versuchskurven zeigen in der Regel kein duktilen Verhalten.

Gruppe	Werte n [-] $\emptyset$ [mm]/ $\emptyset_q$ [mm]	Mittelwert $M_x$ [-]	Standard- abweichung $S_x$ [-]	Variations- koeffizient $V_x$ [-]
1 (Werk 4)	25 / 8 / 5,2	0,708	0,0616	0,0873
2 (Werk 4)	23 / 8 / 5,2	0,656	0,1144	0,1740
3 (Werk 4)	22 / 8 / 5,2	0,7196	0,1428	0,1984
4 (Werk 4)	15 / 8 / 5,2	<b>0,6256</b>	0,0852	<b>0,1359</b>
5 (Werk 4)	15 / 7,5 / 5,2	0,7618	0,095	0,1248
6 (Werk 4)	19 / 7,5 / 5,2	0,7195	0,07136	0,0989
7 (Werk 4)	16 / 7 / 5,2	0,8441	0,1225	0,1451
8 (Werk 4)	18 / 7 / 5,2	0,9845	0,1493	0,1517
9 (Werk 4)	21 / 7 / 5,2	0,9755	0,2061	0,2049
10 (Werk 4)	12 / 6,5 / 5,2	0,8933	0,1091	0,1221
11 (Werk 4)	18 / 6,5 / 5,2	0,9150	0,1187	0,1300
12 (Werk 4)	18 / 6,5 / 5,2	0,9837	0,0639	0,0650
13 (Werk 4)	17 / 6,5 / 5,2	<b>0,776</b>	0,1796	<b>0,2315</b>
14 (Werk 4)	18 / 6,5 / 5,2	0,8468	0,1590	0,1591
15 (Werk 4)	11 / 6,0 / 5,2	0,7452	0,1182	0,1588
16 (Werk 4)	14 / 6,0 / 5,2	0,8705	0,1890	0,2169
17 (Werk 4)	20 / 6,0 / 5,2	0,8401	0,0977	0,1164
18 (Werk 4)	20 / 6,0 / 5,2	0,8216	0,1316	0,1606
19 (Werk 4)	16 / 5,2 / 5,2	0,9604	0,0951	0,0986
20 (Werk 4)	14 / 5,2 / 5,2	0,9698	0,0914	0,0943
21 (Werk 4)	19 / 7,0 / 5,2	0,8747	0,0604	0,1105
22 (Werk 4)	11 / 5,2 / 5,2	1,0707	0,1583	0,1475
23 (Werk 4)	11 / 5,0 / 5,2	1,104	0,2036	0,1848
24 (Werk 4)	12 / 5,0 / 5,2	0,8187	0,0845	0,1037
25 (Werk 4)	11 / 4,6 / 5,2	1,101	0,0446	0,0401
26 (Werk 4)	11 / 4,6 / 5,2	1,119	0,1144	0,1018
27 (Werk 4)	12 / 4,6 / 5,2	1,061	0,0916	0,0857
28 (Werk 4)	13 / 4,6 / 5,2	1,069	0,163	0,1532
29 (Werk 4)	15 / 4,6 / 5,2	1,146	0,128	0,1115

**Tabelle 3.8:** Statistische Auswertung des Scherparameters  $k_w$  aus 29 Gruppen sortiert nach Stabdurchmesser  $\emptyset$  und Querstabdurchmesser  $\emptyset_q$

Wertet man exemplarisch die Gruppen mit dem kleinsten Mittelwert (Gruppe 4:  $M_x = 0,6256$ ) und dem größten Variationskoeffizienten (Gruppe 13:  $V_x = 0,2315$ ) in Gleichung 3.3 und 3.4 aus, so zeigt sich, dass die Schweißfestigkeitsklasse S2 auf dem charakteristischen Niveau nicht immer zuverlässig erreicht wird und in diesen Fällen die üblicherweise anzuwendende Schweißfestigkeitsklasse S1 maßgebend ist ( $k_w \geq 0,25$ ). Gemäß EN 12602 sind zur Anwendung der Schweißfestigkeitsklasse S2 auf nationaler Ebene weitergehende Anforderungen zu definieren.

Gruppe 4:

$$k_{wk} = M_x (1 - k_s V_x) = 0,6256 (1 - 1,70 \cdot 0,1359) = 0,481 \quad (3.3)$$

Gruppe 13:

$$k_{wk} = M_x (1 - k_s V_x) = 0,776 (1 - 1,69 \cdot 0,2315) = 0,472 \quad (3.4)$$

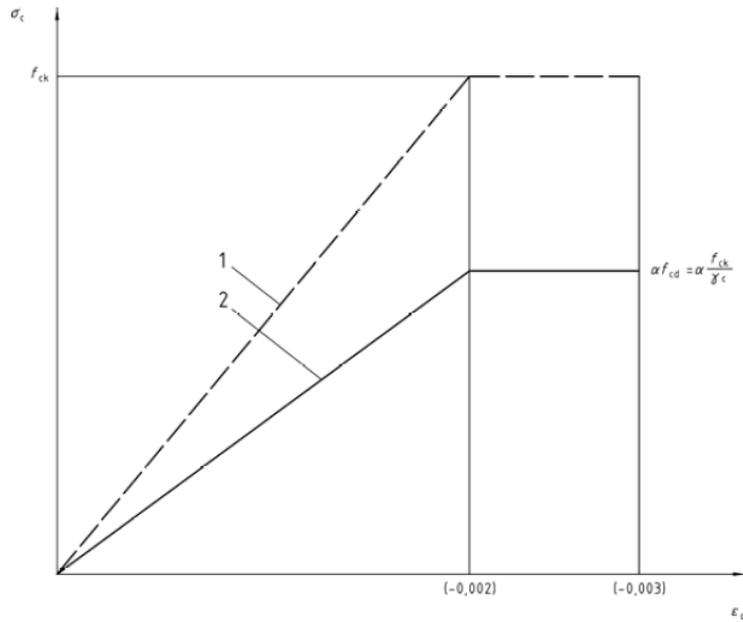
## 4. Biegung mit Längskraft

Die Bemessung für Biegung mit Längskraft ist in EN 12602, Anhang A.3 geregelt. Dabei werden folgende Annahmen in prinzipieller Übereinstimmung zu DIN 4223-2 festgelegt:

- a) Ebene Querschnitte bleiben eben.
- b) Die Zugfestigkeit (einschließlich der Biegezugfestigkeit) des Porenbetons bleibt bei der Bemessung von Porenbetonbauteilen mit statisch anrechenbarer Bewehrung unberücksichtigt. Bei Wandbauteilen mit statisch nicht anrechenbarer Bewehrung mit Biegung aus nicht ständig wirkender Belastung rechtwinklig zur Bauteilebene gilt Abschnitt A.5.
- c) Für Querschnitte, die durch reinen Längsdruck beansprucht werden, ist die Dehnung des Porenbetons auf  $|-0,002|$  begrenzt.
- d) Für Querschnitte, die nicht vollständig unter Druck stehen, ist die Dehnung in der Druckzone auf  $|-0,003|$  begrenzt. Für dazwischen liegende Fälle ist die Dehnung in der Druckzone in einem Abstand von  $1/3$  der Querschnittshöhe von dem am stärksten gedrückten Rand auf  $|-0,002|$  begrenzt.
- e) Für zähes Versagen bei Biegung ohne Längsdruck muss die Stahldehnung größer als  $0,001$  sein.
- f) Die Übernahme der vorgenannten Annahmen führt zu dem in Bild A.4 gezeigten Bereich möglicher Dehnungsdiagramme.
- g) Die Wirkung einer in der Druckzone vorhandenen Längsbewehrung darf bei der Berechnung der aufnehmbaren Längskraft nicht in Rechnung gestellt werden, sofern die Bewehrungsstäbe nicht ausreichend mit der Hauptbewehrung in der Zugzone verbunden sind, z. B. durch Bügel.
- h) Bei der Bemessung eines Querschnitts, der Biegung mit geringer Längskraft aufnehmen muss, darf die Wirkung der größten Bemessungs-Längskraft unberücksichtigt bleiben, wenn die zugehörige Längsspannung infolge der Längskraft einen Wert von  $0,08 f_{ck}$  nicht überschreitet.
- i) Eine örtliche Verminderung der wirksamen Höhe ist bei der Querschnittsbemessung zu berücksichtigen

[Auszug aus EN 12602]

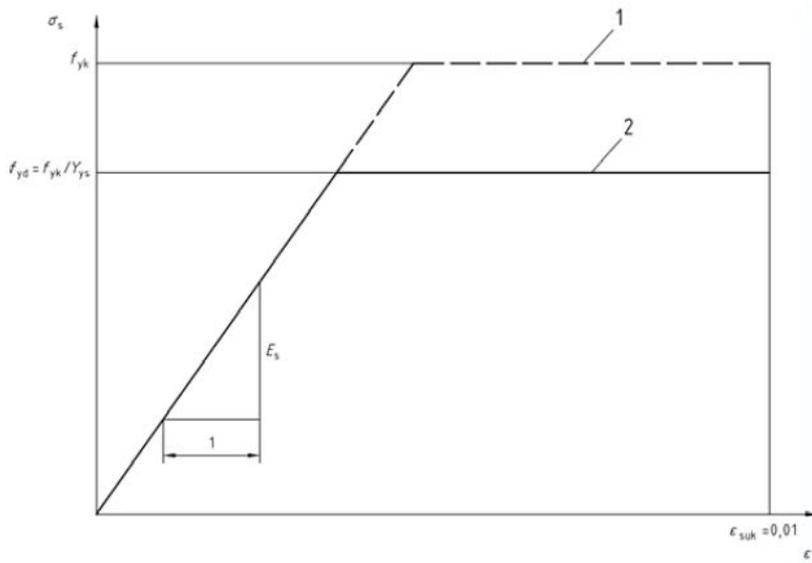
Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme für Porenbeton und Betonstahl sind in den Bildern 4.1 und 4.2 angegeben und das zugehörige Dehnungsdiagramm in Bild 4.3 (Bilder A.2 bis A.4 der EN 12602). Der Faktor  $\alpha$  in Bild 4.1 ist der Beiwert zur Berücksichtigung von Langzeiteinflüssen auf die Dauerhaftigkeit und von ungünstigen Einflüssen, die aus der Art und Weise der Lastaufbringung herrühren. Der Wert  $\alpha$  darf dem Nationalen Anwendungsdokument (NAD) des entsprechenden Landes entnommen werden. In EN 12602 wird in Übereinstimmung mit DIN 4223-2 der Wert  $\alpha = 0,85$  empfohlen.



- Legende**
- 1 idealisiertes Diagramm
  - 2 Bemessungsdiagramm

Bild A.2 — Bilineares Spannungs-Dehnungs-Diagramm für druckbeanspruchtes Porenbeton für die Querschnittsbemessung

**Bild 4.1:** Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Porenbeton



- Legende**
- 1 idealisiertes Diagramm
  - 2 Bemessungsdiagramm

Bild A.3 — Bemessungs-Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Betonstahl

**Bild 4.2:** Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Betonstahl

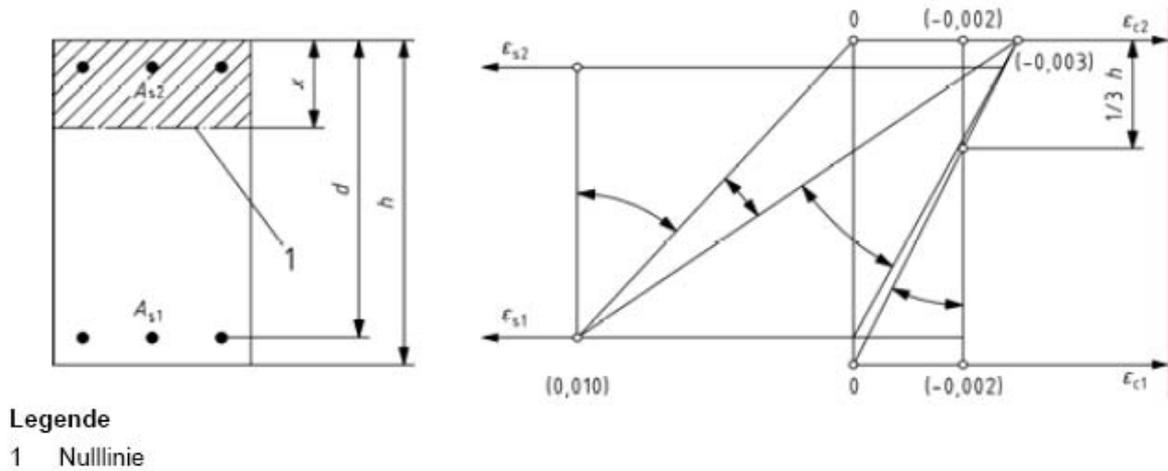


Bild A.4 — Dehnungsdiagramme im Grenzzustand der Tragfähigkeit

### Bild 4.3: Dehnungsebenen

Die praktische Biegebemessung von Porenbetonbauteilen wird in [26] ausführlich beschrieben und es wird eine Bemessungstabelle mit dimensionslosen Beiwerten zur Verfügung gestellt (Bild 4.4). Aufgrund der weitestgehenden Übereinstimmungen zwischen den grundlegenden Bemessungsannahmen bzgl. Biegung mit Längskraft in DIN 4223 und EN 12602 kann die Tabelle gemäß Bild 4.4 für die hier vorliegende statistische Auswertung herangezogen werden. Durch eine Regressionsanalyse wird dazu ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem bezogenen Moment  $m_d$  und dem mechanischen Bewehrungsgrad  $\omega$  gemäß Gleichung 4.1 und 4.2 ermittelt.

Für S 235 und BSt 500 mit  $1000 \omega \leq 380$ :

$$1000 m_d = - 0,0006 (1000 \omega)^2 + 1,0089 (1000 \omega) - 0,8574 \quad (4.1)$$

Für BSt 500 mit  $1000 \omega \geq 381$ :

$$1000 m_d = - 0,00009 (1000 \omega)^2 + 0,22 (1000 \omega) - 233,72 \quad (4.2)$$

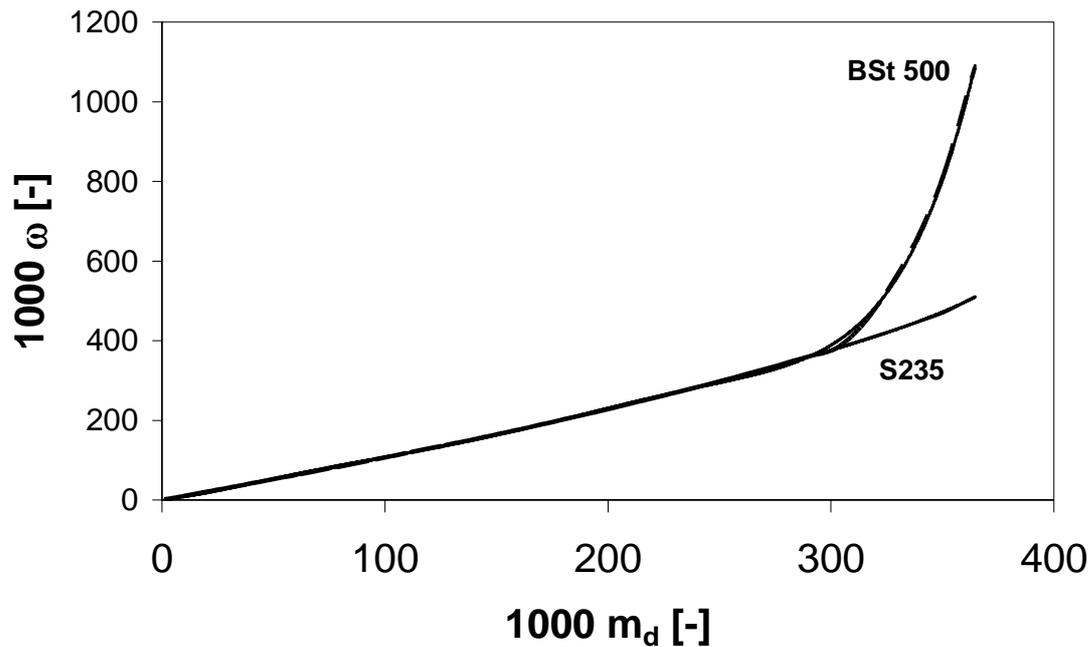
$$m_d = \frac{M_d \cdot \gamma_{c1}}{\alpha \cdot f_{ck} \cdot A_c \cdot d}$$

$$A_s = A_c \cdot \varpi \cdot \frac{\alpha \cdot f_{ck} \cdot \gamma_s}{\gamma_{c1} \cdot f_{yk}}$$

$M_d$  Bemessungswert des Biegemomentes  
 $d$  statische Nutzhöhe  
 $A_c$  Porenbetonquerschnitt  $A_c = b \cdot d$   
 $A_s$  Bewehrungsquerschnitt  
 $f_{ck}$  charakteristische Porenbetondruckfestigkeit  
 $f_{yk}$  charakteristische Stahlfestigkeit  
 $\gamma_{c1}, \gamma_s$  Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN 4223-5

$\epsilon_c$ [‰]	$\epsilon_s$ [‰]	$k_x$	$k_z$	$1000 \cdot m_d$	$1000 \cdot \varpi$	
					S 235 JRG	BSt 500
0,25	10,00	0,024	0,992	1,512		1,524
0,50	10,00	0,048	0,984	5,858		5,952
0,75	10,00	0,070	0,977	12,78		13,08
1,00	10,00	0,091	0,970	22,04		22,73
1,25	10,00	0,111	0,963	33,44		34,72
1,50	10,00	0,130	0,957	46,79		48,91
1,75	10,00	0,149	0,950	61,92		65,16
2,00	10,00	0,167	0,944	78,70		83,33
2,25	10,00	0,184	0,938	95,72		102,0
2,50	10,00	0,200	0,931	111,7		120,0
2,75	10,00	0,216	0,924	126,8		137,3
3,00	10,00	0,231	0,917	141,0		153,8
3,00	9,75	0,235	0,915	143,5		156,9
3,00	9,50	0,240	0,913	146,1		160,0
3,00	9,25	0,245	0,912	148,8		163,3
3,00	9,00	0,250	0,910	151,6		166,7
3,00	8,75	0,255	0,908	154,5		170,2
3,00	8,50	0,261	0,906	157,5		173,9
3,00	8,25	0,267	0,904	160,7		177,8
3,00	8,00	0,273	0,902	163,9		181,8
3,00	7,75	0,279	0,899	167,3		186,0
3,00	7,50	0,286	0,897	170,8		190,5
3,00	7,25	0,293	0,894	174,5		195,1
3,00	7,00	0,300	0,892	178,3		200,0
3,00	6,75	0,308	0,889	182,3		205,1
3,00	6,50	0,316	0,886	186,5		210,5
3,00	6,25	0,324	0,883	190,9		216,2
3,00	6,00	0,333	0,880	195,5		222,2
3,00	5,75	0,343	0,876	200,3		228,6
3,00	5,50	0,353	0,873	205,3		235,3
3,00	5,25	0,364	0,869	210,6		242,4
3,00	5,00	0,375	0,865	216,1		250,0
3,00	4,75	0,387	0,860	222,0		258,1
3,00	4,50	0,400	0,856	228,1		266,7
3,00	4,25	0,414	0,851	234,6		275,9
3,00	4,00	0,429	0,845	241,5		285,7
3,00	3,75	0,444	0,840	248,7		296,3
3,00	3,50	0,462	0,833	256,4		307,7
3,00	3,25	0,480	0,827	264,5		320,0
3,00	3,00	0,500	0,819	273,1		333,3
3,00	2,75	0,522	0,812	282,3		347,8
3,00	2,50	0,545	0,803	292,0		363,6
3,00	2,25	0,571	0,794	302,3		381,0
3,00	2,00	0,600	0,783	313,3	400,0	434,8
3,00	1,75	0,632	0,772	325,0	421,1	523,0
3,00	1,50	0,667	0,759	337,4	444,4	644,1
3,00	1,25	0,706	0,745	350,6	470,6	818,4
3,00	1,00	0,750	0,729	364,6	510,9	1.087,0

**Bild 4.4:** Bemessungstabelle mit dimensionslosen Beiwerten



**Bild 4.5:** Funktionaler Zusammenhang zwischen  $m_d$  und  $\omega$

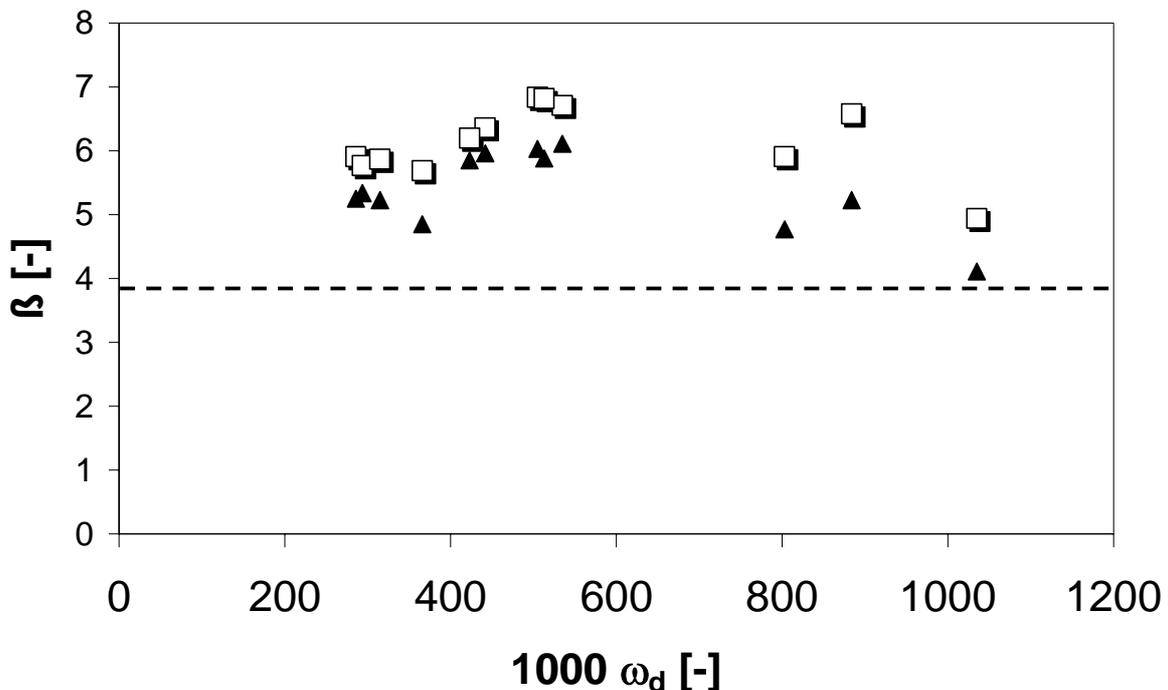
Zu statistischen Auswertungen mit der Monte Carlo Analyse werden dann entsprechend der in Abschnitt 2, Bild 2.1 beschriebenen Vorgehensweise je untersuchter Variante mehr als 2.000 unabhängige Testläufe mit streuenden Eingangswerten durchgeführt. Dabei werden die statistischen Streuungen der Abmessungen  $A_s$ ,  $b$  und  $d$  und der Festigkeitswerte  $f_y$  und  $f_{c,cyl}$  wie in Abschnitt 3 beschrieben und in Übereinstimmung mit Anhang D berücksichtigt.

Für die Bauteilabmessungen und Belastungssituationen wurden praxismgerechte Beispiele aus dem Porenbeton-Bericht 23 als Grundvarianten ausgewählt und in Variantenrechnungen Bewehrungsgrad und Betonfestigkeit systematisch variiert.

Die in der Monte Carlo Simulation generierten Werte werden statistisch ausgewertet und mit den Bemessungswerten verglichen. Dabei kommen entsprechend EN 12602 die Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_c = 1,44$  gemäß EN 12602 bzw.  $\gamma_c = 1,3$  gemäß DIN 4223 für duktilen Biegeversagen und  $\gamma_s = 1,15$  für die Bewehrung zur Anwendung.

In Bild 4.6 ist die Auswertung der Monte Carlo Analyse dargestellt. Die Simulationen wurden auf Grundlage der Beispiele 1, 2, 3 und 11 der Beispielsammlung des Bundesverband für

Porenbeton [26] unter Variation maßgebender Parameter (Festigkeit, Bewehrungsgrad, Geometrie) durchgeführt. Durch die dimensionslose Schreibweise sind die Simulationsergebnisse prinzipiell auf den gesamten Wertebereich der  $\mu$ - $\omega$ -Tabelle übertragbar. Es zeigt sich, dass der erforderliche Zuverlässigkeitsindex  $\beta = 3,8$  durch Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_s = 1,15$  und  $\gamma_c = 1,44$  bzw.  $\gamma_c = 1,3$  für Biegung mit Längskraft überschritten wird. Gemäß Schneider [12] kann die Modellunsicherheit im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei Anwendung der Grenzwertsätze der Plastizitätstheorie vernachlässigt werden. Im Falle von Biegung mit Längsdruck handelt es sich um ein deterministisches Bemessungskonzept für das elasto-plastische Spannungs-Dehnungs-Linien genutzt werden (Bild 4.1 und 4.2), so dass hier in Übereinstimmung mit Schneider keine Modellunsicherheiten zur Bestimmung von  $\beta$  herangezogen werden.



**Bild 4.6:** Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  für Biegung mit Längskraft in Abhängigkeit des mechanischen Bewehrungsgrad  $\omega$  unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_s = 1,15$  und  $\gamma_c = 1,44$  entsprechend EN 12602, Anhang D (Weiße Rechtecke) und  $\gamma_c = 1,3$  entsprechend DIN 4223 (Schwarze Dreiecke)

## 5. Querkraft und Torsion

### 5.1 Querkraft ohne Querkraftbewehrung

Gemäß EN 12602, Abschnitt A.4.1.2 wird der Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung im Wesentlichen in Übereinstimmung zu DIN 4223-2, Abschnitt 10.3.3. festgelegt. Der Sicherheitsbeiwert für sprödes Versagen beträgt gemäß DIN 4223  $\gamma_c = 1,7$  und die Empfehlung gemäß EN12602 Anhang D  $\gamma_c = 1,73$ .

(1) Der Bemessungswert des Querkrafttragwiderstands  $V_{Rd1}$  für quer zu ihrer Ebene belastete Bauteile ergibt sich aus der folgenden empirischen Gleichung (A.6):

$$V_{Rd1} = \tau_{Rd} (1 - 0,83d / 1000) \cdot (1 + 240\rho_1) b_w d \geq 0,06 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} b_w d \quad (\text{A.6})$$

Dabei ist

- $V_{Rd1}$  der Bemessungswert des Querkrafttragwiderstands, in Newton;
- $\tau_{Rd}$  der Grundwert der aufnehmbaren Schubspannung =  $0,063 f_{ck}^{0,5} / \gamma_c$ , in Megapascal;
- $f_{ck}$  die charakteristische Druckfestigkeit des Porenbetons, in Megapascal;
- $\gamma_c$  der Teilsicherheitsbeiwert des Porenbetons für sprödes Versagen;
- $d$  die wirksame Höhe des Querschnitts, in Millimeter ( $d \leq 400$  mm);
- $\rho_1$  das Bewehrungsverhältnis, definiert als:  $\rho_1 = A_{sl} / b_w d \leq 0,005$ .

Dabei ist

- $A_{sl}$  die Querschnittsfläche der Zugbewehrung, in Quadratmillimeter;
- $b_w$  die Mindestbreite des Querschnitts im Bereich der wirksamen Höhe, in Millimeter.

ANMERKUNG Der in einem Land anzuwendende Wert von  $\gamma_c$  darf dem betreffenden nationalen Anwendungsdokument entnommen werden. Der zur Verwendung empfohlene Wert ist in Tabelle D.4 angegeben.

[Auszug aus EN 12602]

Die Bemessungsgleichung ergibt sich somit gemäß Gleichung 5.1.

$$V_{Rd1} = \tau_{Rd} (1 - 0,83 d / 1000) ( 1 + 240 \rho_1) b_w d \geq 0,06 (f_{ck} / \gamma_c) b_w d \quad (\text{5.1})$$

Mit:  $\tau_{Rd} = 0,063 f_{ck}^{0,5} / \gamma_c$   
 $\gamma_c =$  Teilsicherheitsbeiwert für Porenbeton für **sprödes** Versagen

Die charakteristische Gleichung ergibt sich somit gemäß Gleichung 5.2.

$$V_{Rk1} = \tau_{Rk} (1 - 0,83 d / 1000) ( 1 + 240 \rho_1) b_w d \geq 0,06 f_{ck} b_w d \quad (\text{5.2})$$

$$= 0,063 f_{ck}^{0,5} (1-0,83 d / 1000) (1+ 240 \rho_l) b_w d \geq 0,06 f_{ck} b_w d$$

Der Mittelwert kann dementsprechend mit Gleichung 5.3 errechnet werden.

$$V_{Rm1} = 0,063 f_{cm}^{0,5} (1-0,83 d / 1000) (1+ 240 \rho_l) b_w d \geq 0,06 f_{cm} b_w d \quad (5.3)$$

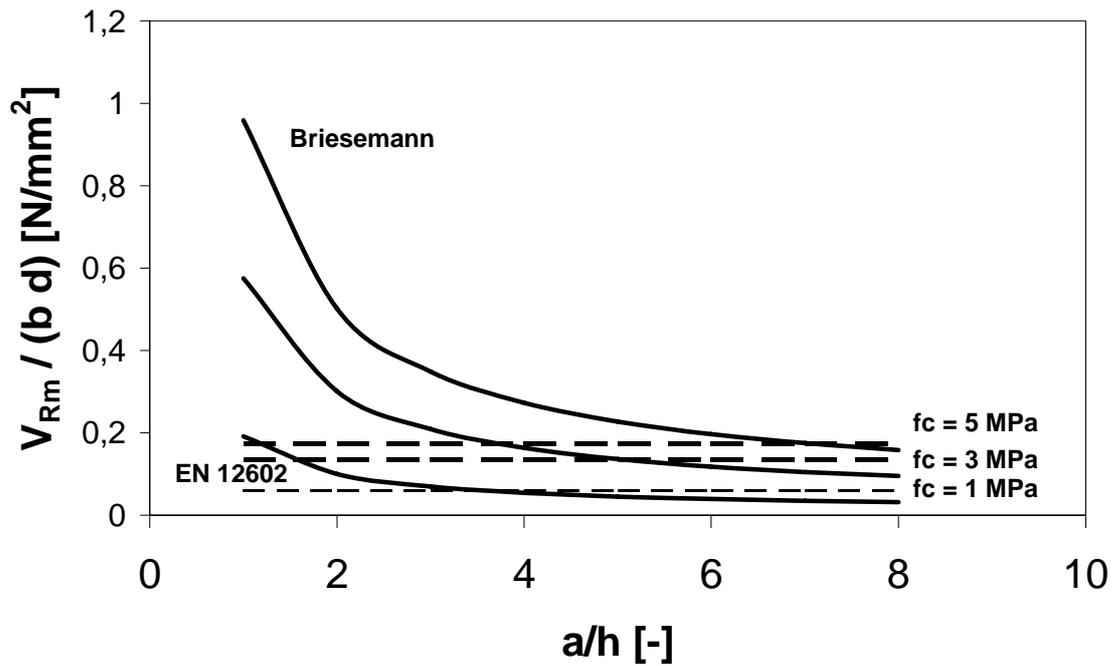
(5.3a)

(5.3b)

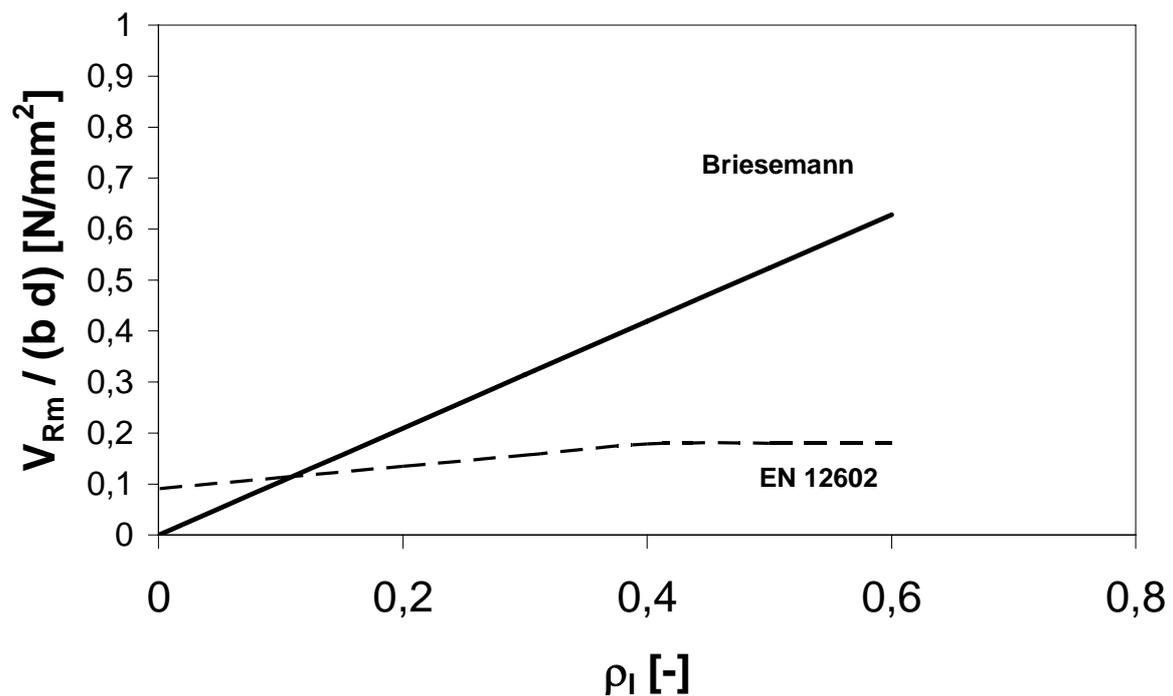
Von Briesemann [21] wurde in den 1970er Jahren eine empirische Formel durch Auswertung von Versuchen hergeleitet, die für plattenartige Bauteile ohne Schubbewehrung in Gleichung 5.4 wiedergegeben ist. In Bild 5.1 sind für die Betonfestigkeiten  $f_c = 1$  MPa bis 5 MPa die rechnerisch mittleren Querkrafttragfähigkeiten gemäß Gleichung (5.3) und (5.4) in Abhängigkeit der Schubschlankheit aufgetragen. Dabei wurde von einem Längsbewehrungsgrad  $\mu = \rho = 0,2$  %, einer statischen Nutzhöhe  $d = 200$  mm und einer Druckfestigkeit  $f_{cm} = \beta_d$  ausgegangen. Es zeigt sich, dass die Anwendung der EN 12602 für die maßgebenden Schubschlankheiten  $3 \leq a/h \leq 4$  gegenüber dem Modell von Briesemann als konservativ einzustufen ist. Gemäß EN 12602, Abschnitt A.4.1.1, Absatz (9) können auflagernahe Einzellasten im Abstand  $x < 2,5 d$  vom Auflager auf der Einwirkungsseite abgemindert werden, so dass im auflagernahen Bereich die deutlichen Unterschiede zur Formel von Briesemann gemäß Bild 5.1 teilweise ausgeglichen werden.

$$Q_u = b \cdot z \cdot \beta_d \cdot \mu [0,0522 + 1,0776 / (a/h)] \quad (5.4)$$

Mit:  $Q_u$  maximale Querkraft im Versuch (Mittelwert)  
 $z = 0,8488 d$   
 $\mu =$  Längsbewehrungsgrad [%]  
 $a / h =$  Schubschlankheit



**Bild 5.1:** Vergleich der Querkrafttragfähigkeit gemäß EN 12602 und nach Briesemann in Abhängigkeit der Schubslankheit  $a/h$



**Bild 5.2:** Vergleich der Querkrafttragfähigkeit gemäß EN 12602 und nach Briesemann in Abhängigkeit des Längsbewehrungsgrad  $\rho$  (Beispiel mit  $f_{cm} = 3 MPa$ ,  $a/h = 3$  und  $\rho_l = 0$  bis  $0,6$ )

Die Auswertung in Abhängigkeit des Längsbewehrungsgrades in Bild 5.2 zeigt:

- In der Formel von Briesemann ist kein Grundwert der Schubspannung vorhanden, so dass der Querkraftwiderstand linear vom Längsbewehrungsgrad abhängt.
- In der Formel gemäß EN 12602 wird der Sockelbetrag  $0,06 f_c$  für den Schubwiderstand vorausgesetzt, der unabhängig vom Längsbewehrungsgrad vorhanden ist.
- Daraus folgt eine Überschätzung der Querkrafttragfähigkeit bei geringen Längsbewehrungsgraden bei Anwendung der EN 12602.

Zur Überprüfung der Gleichung 5.3 wurden die Versuche aus der Datenbank von Briesemann neu ausgewertet. Es wurden ausschließlich Versuche mit dokumentierten Schubzug- und Schubdruckbruch herangezogen, während Versuche mit Verankerungsbruch oder Biegeversagen aussortiert wurden. Zur Auswertung wurde die Gleichung 5.3 einmal mit und einmal ohne den Sockelwert von  $0,06 f_c$  bewertet (Tabelle 5.1). Es zeigt sich, dass der Sockelwert  $0,06 f_c$  zu einer Überschätzung der Querkrafttragfähigkeit führt, da im Versuch im Mittel nur 64% der rechnerischen Tragfähigkeit gemäß Gleichung (5.3b) erreicht wird. Kein Einziger der 16 herangezogenen Versuche erreichte den prognostizierten Wert der Querkrafttragfähigkeit gemäß Gleichung 5.3b. Wird hingegen auf den Ansatz des Sockelwerts  $0,06 f_{cm}$  gemäß Gleichung (5.3a) verzichtet, wird eine ausreichend gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Vorhersage erzielt, was durch den Mittelwert  $M_x = 0,99$  dokumentiert wird. Die Auswertung in Abhängigkeit der maßgebenden Parameter Porenbetonfestigkeit  $f_c$ , Längsbewehrungsgrad  $\rho_l$ , statische Nutzhöhe  $d$  und Schubslankheit  $a/h$  in den Bildern 5.3 bis 5.6 zeigt, dass die wesentlichen Parameter trendfrei in Gleichung 5.3a erfasst werden. Allein mit zunehmender Schubslankheit  $a/h$  ist ein Trend im Verhältniswert  $V_{Test}/V_{calc}$  zu beobachten, wie er sich allerdings auch für Stahlbeton ergibt.

In Bild 5.7 sind die Funktionsterme  $0,063 f_c^{0,5}$  und  $0,06 f_c$  gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die lineare Funktion  $0,06 f_c$  zu einem deutlich schnelleren Anwachsen des Funktionswertes führt, als die Wurzelfunktion  $0,063 f_c^{0,5}$ , so dass insbesondere bei der Extrapolation auf höhere Betonfestigkeitsklassen nicht mehr von einer ausreichenden Zuverlässigkeit des Bemessungsmodells gemäß Gleichung 5.3b ausgegangen werden kann. Infolge der Erweiterung des Anwendungsbereichs von der bisherigen Beschränkung der Festigkeit auf P4,4 gemäß DIN 4213 bis auf die Festigkeitsklassen AAC 10 gemäß EN 12602

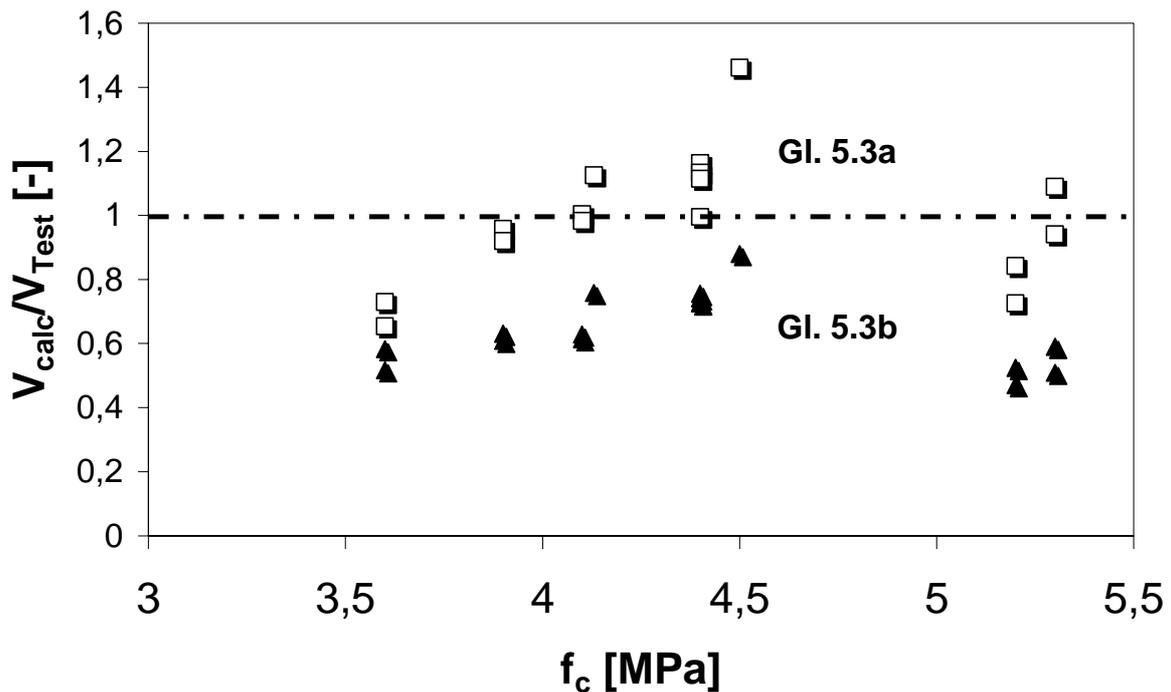
wird von einer Anwendung des Sockelwerts  $0,06 f_c$ . bei dem derzeitigen Kenntnisstand aus gutachterlicher Sicht abgeraten.

	$V_{Test}/V_{Rm1}^*$ (5.3a)	$V_{Test}/V_{Rm1}$ (5.3b)
$M_x$	0,99	0,64
$S_x$	0,20	0,11
$V_x$	0,20	0,18

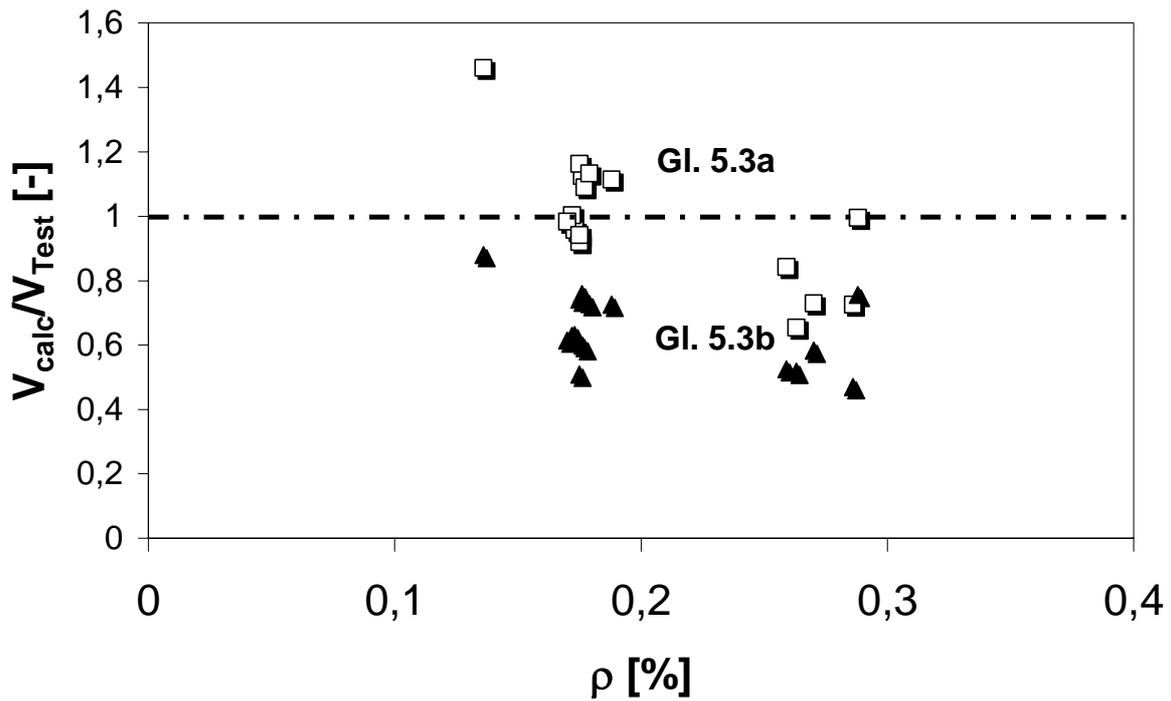
$$V_{Rm1}^* = 0,063 f_{cm}^{0,5} (1-0,83 d / 1000) (1+ 240 \rho_l) b_w d \quad (5.3a)$$

$$V_{Rm1} = 0,063 f_{cm}^{0,5} (1-0,83 d / 1000) (1+ 240 \rho_l) b_w d \geq 0,06 f_{cm} b_w d \quad (5.3b)$$

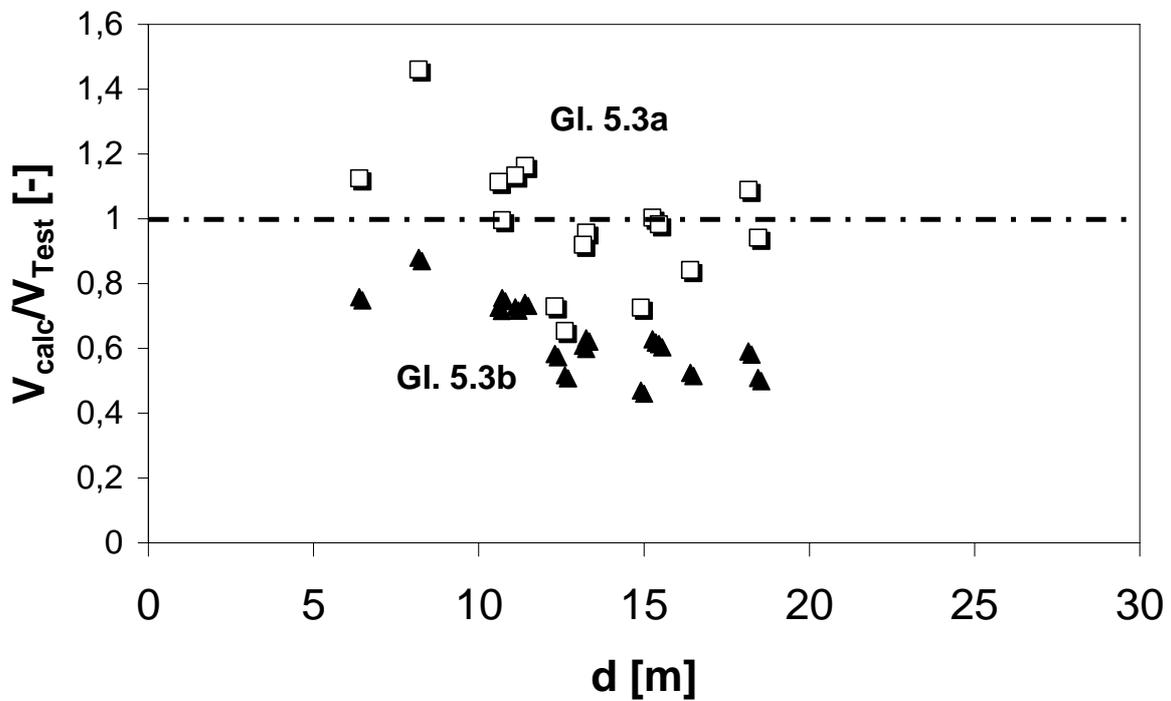
**Tabelle 5.1:** Auswertung der Querkraftversuche ohne Schubbewehrung aus der Datenbank von Briesemann mit den Gleichungen 5.3a und 5.3b



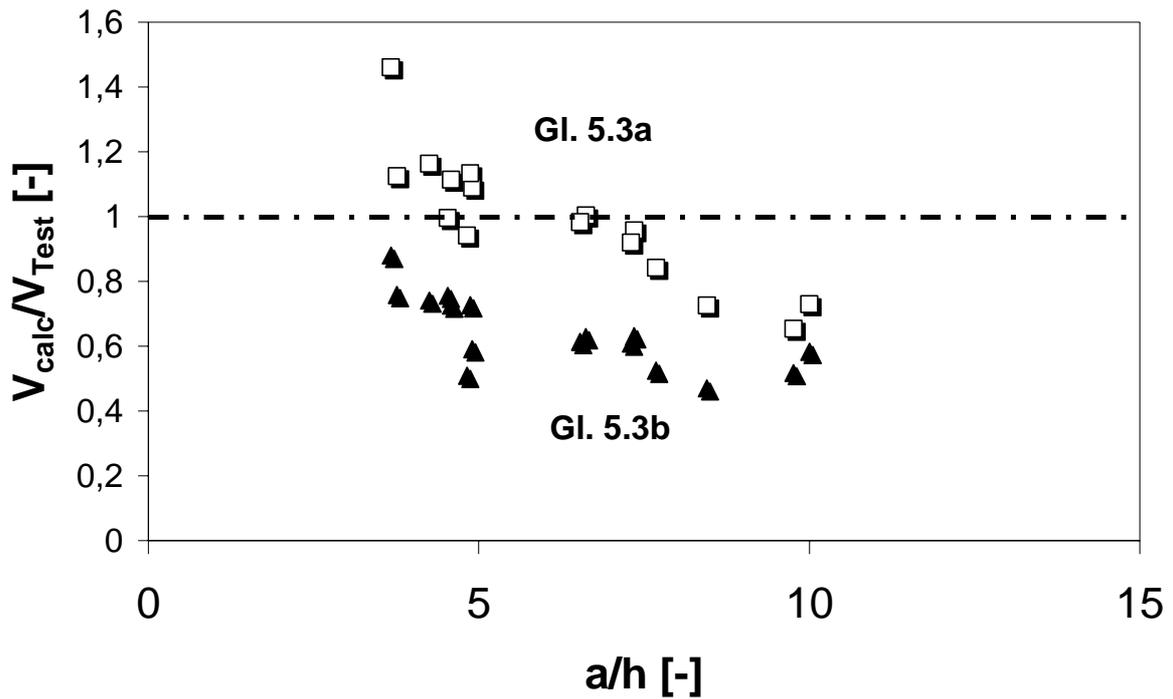
**Bild 5.3:** Auswertung der Querkraftversuche aus der Datenbank von Briesemann gemäß Gleichung 5.3a (weiße Rechtecke) und 5.3b (schwarze Dreiecke) in Abhängigkeit der Druckfestigkeit  $f_c$



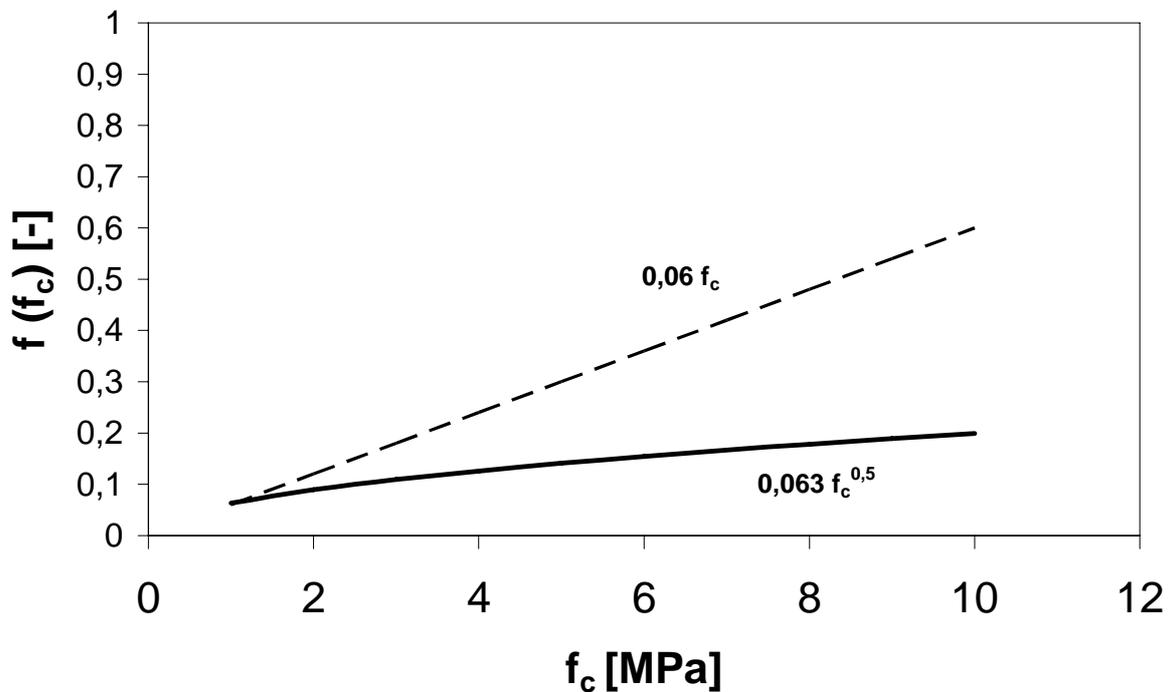
**Bild 5.4:** Auswertung der Querkraftversuche aus der Datenbank von Briesemann gemäß Gleichung 5.3a (weiße Rechtecke) und 5.3b (schwarze Dreiecke) in Abhängigkeit des Längsbewehrungsgrades  $\rho_l$



**Bild 5.5:** Auswertung der Querkraftversuche aus der Datenbank von Briesemann gemäß Gleichung 5.3a (weiße Rechtecke) und 5.3b (schwarze Dreiecke) in Abhängigkeit der statischen Nutzhöhe  $d$



**Bild 5.6:** Auswertung der Querkraftversuche aus der Datenbank von Briesemann gemäß Gleichung 5.3a (weiße Rechtecke) und 5.3b (schwarze Dreiecke) in Abhängigkeit der Schubslankheit  $a/h$

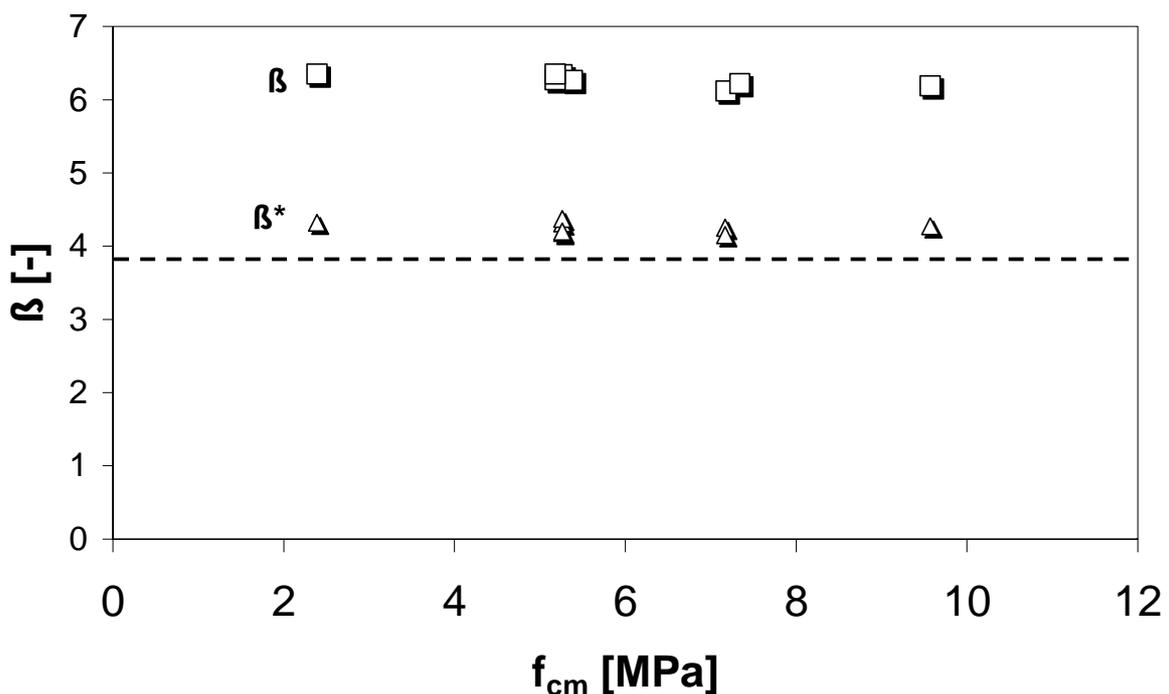


**Bild 5.7:** Vergleich der Funktionsterme  $0,063 f_c^{0,5}$  und  $0,06 f_c$

In Bild 5.8 sind die Ergebnisse der Monte Carlo Analysen aufgetragen. Demnach wird bei Anwendung der Gleichung 5.3a ein ausreichend großer Zuverlässigkeitsbeiwert  $\beta > 3,8$  erreicht. Es wird darauf hingewiesen, dass Modellunsicherheiten in Bild 5.8 nicht erfasst sind, die aber entsprechend EN 12602 Anhang D mit einem zusätzlichen Variationskoeffizienten von  $V_m = 0,10$  berücksichtigt werden können. Setzt man die Modellunsicherheit mit dem Variationskoeffizienten  $V_m = 0,10$  in Gleichung 2.2, so kann  $\beta^*$  abweichend zu Gleichung 2.2 folgendermaßen ermittelt werden.

$$\beta^* = [\mu_R (1 - 1,64 V_m) - R_d] / (\alpha_R \cdot \sigma_R)$$

Es zeigt sich, dass auch bei dieser Annahme ein ausreichender Zuverlässigkeitsindex erreicht wird. Allerdings bleibt zu bewerten, ob die Modellunsicherheit von  $V_m = 0,1$  für spröde Versagensformen zutreffend ist.



**Bild 5.8:** Auswertung des Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  für die Gleichung 5.3a bei Anwendung des Sicherheitsbeiwert  $\gamma_c = 1,7$  für sprödes Versagen sowie des Zuverlässigkeitsindex  $\beta^*$  bei Annahme einer Modellunsicherheit mit einem Variationskoeffizient von  $V_m = 0,1$

## 5.2 Querkraft mit Querkraftbewehrung

Gemäß EN 12602, Abschnitt A.4.1.3 wird der Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit mit Querkraftbewehrung vom prinzipiellen Format her ähnlich wie in DIN 4223-2, Abschnitt 10.3.4 festgelegt.

### **A.4.1.3 Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung**

#### **A.4.1.3.1 Querkrafttragwiderstand**

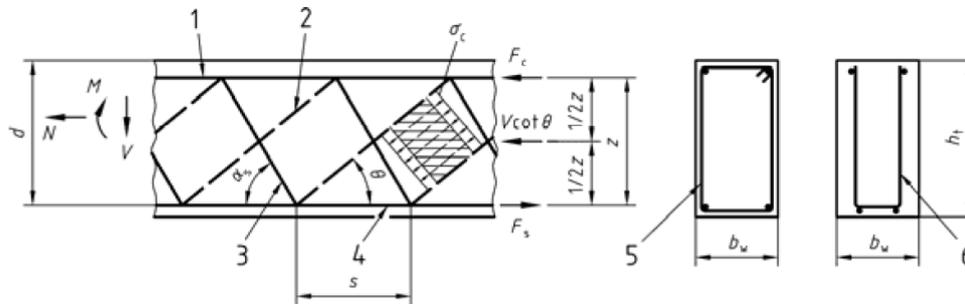
(1)P Die folgenden Gleichungen für geneigte Querkraftbewehrung gelten nur für Bügel, die mit der oberen und der unteren Längsbewehrung verschweißt sind.

(2)P Wenn die Belastung nicht auf der Bauteiloberseite einwirkt oder wenn sich das Auflager nicht auf der

[Auszug aus EN 12602]

Unterseite des Bauteils befindet, ist eine Aufhängebewehrung vorzusehen, um die Last auf die Bauteiloberseite zu übertragen.

(3)P Für die Querkraftbemessung wird angenommen, dass das Tragsystem aus einer Druckzone und einer Zugzone besteht, die durch einen dem inneren Hebelarm entsprechenden Abstand  $z$  voneinander getrennt sind. Die Querkraft übertragende Zone hat eine Höhe  $z$  und eine Breite  $b_w$ . Der innere Hebelarm wird rechtwinklig zur Längsbewehrung berechnet. Die verwendeten Bezeichnungen sind in Bild A.5 angegeben.



**Legende**

- |   |                    |   |                                     |
|---|--------------------|---|-------------------------------------|
| 1 | Druckzone          | 4 | Zugzone                             |
| 2 | Druckstreben       | 5 | Beispiel eines geschlossenen Bügels |
| 3 | Querkraftbewehrung | 6 | Beispiel eines offenen Bügels       |

**Bild A.5 — Bezeichnungen für Querkraft beanspruchte Bauteile**

Die in Bild A.5 angegebenen Kenngrößen sind:

- $\alpha_s$  der Winkel zwischen Querkraftbewehrung und Längsachse;
- $\theta$  der Winkel zwischen den Porenbeton-Druckstreben und der Längsachse, angenommen zu  $45^\circ$ ;
- $\sigma_c$  die Porenbeton-Spannung in den Druckstreben;
- $F_s$  die Zugkraft in der Längsbewehrung;
- $F_c$  die Druckkraft im Porenbeton in Richtung der Längsachse;
- $b_w$  die kleinste Querschnittsbreite;
- $z$  bei einem Bauteil mit konstanter Höhe der dem größten Biegemoment in dem betrachteten Bauteil entsprechende innere Hebelarm. Beim Querkraftnachweis darf üblicherweise ein Näherungswert von  $z = 0,9 d$  für Bauteile mit einer Schlankheit von  $l/h_t > 5$  verwendet werden.

Dabei ist

- $d$  die wirksame Höhe;
- $l$  die Stützweite;
- $h_t$  die Gesamthöhe des Querschnitts.

(4)P Für die Ausbildung der Querkraftbewehrung gelten die in 5.2.7.2.2 c) angegebenen Bewehrungsregeln.

[Auszug aus EN 12602]

(5) Der Querkrafttragwiderstand eines Querschnitts mit Querkraftbewehrung ergibt sich aus Gleichung (A.7):

$$V_{Rd3} = V_{cd} + V_{wd} \quad (\text{A.7})$$

Dabei ist

$V_{cd}$  der Beitrag des Porenbetons; er entspricht  $V_{Rd1}$  (siehe A.4.1.2);

$V_{wd}$  der Beitrag der Querkraftbewehrung.

(6) Der Beitrag der vertikalen Querkraftbewehrung ergibt sich aus Gleichung (A.8):

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} z \sigma_{swd} \quad (\text{A.8})$$

Dabei ist

$A_{sw}$  die Querschnittsfläche der vertikalen Querkraftbewehrung in dem betrachteten Querschnitt;

$s$  der gegenseitige Abstand der Querkraftbewehrung;

$\sigma_{swd}$  der Bemessungswert der Zugspannung in der Querkraftbewehrung, siehe A.4.1.3.2.

(7) Der Beitrag der geneigten Querkraftbewehrung ergibt sich aus Gleichung (A.9):

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} z \sigma_{swd} (1 + \cot \alpha_s) \sin \alpha \leq \frac{d}{\sin \alpha_s} \sqrt{\frac{v f_{ck}}{\gamma_C} \cdot \frac{b_w \cdot \sigma_{swd} \cdot A_s}{2s}} \quad (\text{A.9})$$

Dabei ist

$A_{sw}$  die Querschnittsfläche der geneigten Querkraftbewehrung in dem betrachteten Querschnitt;

$s$  der gegenseitige Abstand der Querkraftbewehrung in Richtung der Bauteil-Längsachse (siehe Bild A.5);

$\sigma_{swd}$  der Bemessungswert der Zugspannung in der Querkraftbewehrung, siehe A.4.1.3.2;

$d$  die wirksame Höhe;

$b_w$  die kleinste Querschnittsbreite;

$f_{ck}$  die charakteristische Druckfestigkeit des Porenbetons;

$\gamma_C$  der Teilsicherheitsbeiwert für Porenbetons bei sprödem Versagen;

$v$  der Wirksamkeitsfaktor zur Berücksichtigung der verminderten Druckfestigkeit  $f_{ck}$  in der Querkraft übertragenden Zone des Bauteils. Für Porenbeton gilt  $v = 0,56$ .

**ANMERKUNG** Der in einem Land anzuwendende Wert von  $\gamma_C$  darf dem betreffenden nationalen Anwendungsdokument entnommen werden. Der zur Verwendung empfohlene Wert ist in Tabelle D.4 angegeben.

[Auszug aus EN 12602]

#### A.4.1.3.2 Bemessungswert der Stahlspannung in der Querkraftbewehrung

(1) Der Bemessungswert der Zugspannung in der Querkraftbewehrung kann mit einer der folgenden Gleichungen (A.10) oder (A.11) bestimmt werden:

$$\sigma_{\text{swd}} = \begin{cases} \frac{250}{\gamma_s} \left(1 - 0,02 \frac{l}{d}\right) \cdot \left(1,2 - 60 \frac{A_{\text{sw}}}{s \cdot b_w}\right) \leq \frac{f_{\text{ywk}}}{\gamma_s} \leq 300 \text{ MPa,} & \text{für geschlossene Bügel} \\ \frac{150}{\gamma_s} \left(1 - 0,02 \frac{l}{d}\right) \cdot \left(1,2 - 60 \frac{A_{\text{sw}}}{s \cdot b_w}\right) \leq \frac{f_{\text{ywk}}}{\gamma_s} \leq 300 \text{ MPa,} & \text{für offene Bügel} \end{cases} \quad \text{A.10}$$

$$\sigma_{\text{swd}} = 0,45 K_1 K_2 f_{\text{co}} \frac{\phi_{\text{sl}}^2 + K_3 \phi_{\text{sw}}^2}{\phi_{\text{sw}}^2} \leq \frac{f_{\text{ywk}}}{\gamma_s} \leq 200 \text{ MPa} \quad \text{(A.11)}$$

Die Gleichung (A.11) gilt nur für vertikale Bügel, sowohl offene als auch geschlossene.

ANMERKUNG 1 Die Gleichung (A.10) liefert für schlanke Balken besser zutreffende Werte als die Gleichung (A.11).

Dabei ist

- $l$  die Stützweite;
- $d$  die wirksame Höhe;
- $f_{\text{ywk}}$  die charakteristische Streckgrenze der Bügel;
- $\gamma_s$  der Teilsicherheitsbeiwert für Stahl;
- $f_{\text{co}}$  die aufnehmbare Lochleibungsspannung  $f_{\text{co}} = 2,4 f_{\text{cd}}$  für verschweißte Querkraftbewehrung und  $f_{\text{co}} = f_{\text{cd}}$  für nicht verschweißte Querkraftbewehrung;
- $f_{\text{cd}}$  der Bemessungswert der Druckfestigkeit von Porenbeton,  $f_{\text{cd}} = f_{\text{ck}} / \gamma_c$ ;
- $f_{\text{ck}}$  die charakteristische Druckfestigkeit von Porenbeton;
- $\gamma_c$  der Teilsicherheitsbeiwert des Porenbetons für sprödes Versagen;
- $\phi_{\text{sl}}$  der Durchmesser der oberen oder unteren Längsstäbe, der kleinere Wert ist maßgebend;
- $\phi_{\text{sw}}$  der Durchmesser der Bügel;
- $K_3$  = 1 für geschlossene Bügel und  $K_3 = 0$  für offene Bügel;
- $K_1$  der Abminderungsbeiwert für eine verminderte Porenbetondeckung:  
 $K_1 = 1$  für geschlossene Bügel und  $K_1 = 0,33$  *el*  $\phi_{\text{sl}} \leq 1$  für offene Bügel;
- $K_2$  der Abstandsfaktor der Bügel:  $K_2 = s / \phi_{\text{sl}} \leq 14$ ;
- $e$  der Abstand der Schwerachse der Längsstäbe an den offenen Enden von der benachbarten Seitenfläche des Porenbetonbauteils;
- $s$  der gegenseitige Abstand der Bügel.

ANMERKUNG 2 Die in einem Land zu verwendenden Werte für  $\gamma_c$  und  $\gamma_s$  dürfen dem jeweiligen nationalen Anwendungsdokument entnommen werden. Die zur Verwendung empfohlenen Werte sind in Tabelle D.4 angegeben.

[Auszug aus EN 12602]

#### A.4.1.3.3 Bemessungswert des Querkrafttragwiderstands $V_{Rd2}$

(1) Für den Nachweis des Versagens der Porenbeton-Druckstreben ist  $V_{Rd2}$  in Gleichung (A.12) angegeben:

$$V_{Rd2} = b_w z v f_{cd} \left( \frac{\cot \theta + \cot \alpha_s}{1 + \cot^2 \theta} \right) \quad (\text{A.12})$$

Dabei ist

- $v$  der Wirksamkeitsbeiwert zur Berücksichtigung der verminderten Druckfestigkeit  $f_{ck}$  in der Querkraft übertragenden Zone des Bauteils. Für Porenbeton gilt  $v = 0,56$ .
- $f_{cd}$  der Bemessungswert der Druckfestigkeit des Porenbeton,  $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$ ;
- $f_{ck}$  die charakteristische Druckfestigkeit des Porenbeton;
- $\gamma_c$  der Teilsicherheitsbeiwert für Porenbeton für sprödes Versagen;
- $\alpha_s$  der Winkel zwischen der geneigten Querkraftbewehrung und der Bauteil-Längsachse;
- $b_w$  die kleinste Breite der Querkraft übertragenden Zone;
- $\theta$  siehe Bild A.5;
- $z$  siehe Bild A.5.

ANMERKUNG Der in einem Land zu verwendenden Wert für  $\gamma_c$  darf dem jeweiligen nationalen Anwendungsdokument entnommen werden. Der zur Verwendung empfohlene Wert ist in Tabelle D.4 angegeben.

[Auszug aus EN 12602]

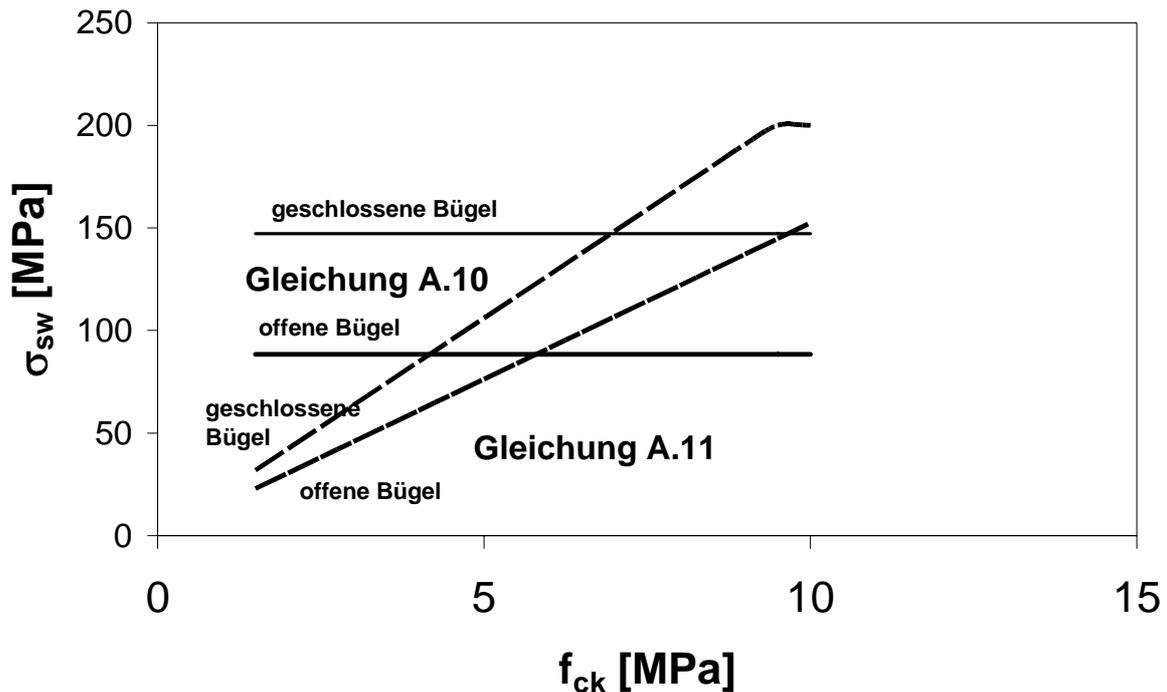
Gegenüber DIN 4223-2 sind in EN 12602 allerdings folgende wesentliche Unterschiede festzustellen:

- In EN 12602 wird auch eine geneigte Querkraftbewehrung berücksichtigt, die in DIN 4223-2 nicht beschrieben wird. Gemäß den Erläuterungen zu DIN 4223-2 [4] wird für Porenbeton immer von einer Druckstrebeneigung von  $\theta = 45^\circ$  und einer Querkraftbewehrung senkrecht zur Bauteilachse ausgegangen.
- Die Gleichung A.10 der EN 12602 findet keine Entsprechung in DIN 4223.
- Die Gleichung A.11 der EN 12602 ist der Gleichung 22 der DIN 4223 ähnlich. Der Vorfaktor  $(4/\pi) \alpha (f_{ck} / \gamma_c) = 1,08 f_{cd}$  aus DIN 4223, Gl. 22 entspricht dem Wert  $0,45 f_{co} = 0,45 \cdot 2,4 f_{ck} / \gamma_c = 1,08 f_{cd}$  für verschweißte Querkraftbewehrung gemäß EN 12602, Gleichung A.11. Gemäß EN 12602 ist für nicht verschweißte Querkraftbewehrung eine deutlich geringere Festigkeit anrechenbar. Weiterhin fällt auf, dass der Beiwert K3 in DIN 4223, Gl. 22 quadratisch eingeht, während er in EN 12602, Gl. A.11 linear eingeht.

Der Vergleich zwischen Gleichung A.10 und A.11 jeweils mit geschlossen und offenen Bügeln gemäß Bild 5.9 zeigt, dass die Gleichung A.11 von der Betonfestigkeit beeinflusst wird, während in Gleichung A.10 die Betonfestigkeit gar nicht eingeht. Gemäß den Erläuterungen zu DIN 4223-2 [4] wird in Gleichung A.11 das Verankerungsverhalten der Bügel detailliert berücksichtigt, was in guter Übereinstimmung zu Versuchen steht. Für die Verankerung ist erwartungsgemäß die Porenbetonfestigkeit von entscheidender Größe. In der Dissertation Wehr [24] wird eine vergleichende Übersicht zu den bisher aus der Literatur bekannten Ergebnissen gegeben. In der Literatur [16-22] wird festgestellt:

- Gemäß Briesemann hat die Schubbewehrung bei Porenbeton eine geringere Wirksamkeit als bei Stahlbeton, was auf die offensichtlich nicht ausreichende Verankerung der Schubbewehrung in der Biegedruckzone zurückzuführen ist.
- Gemäß Schäffler wird durch die Verwendung von Schrägstäben im querkraftbeanspruchten Bereich keine deutliche traglaststeigernde Wirkung erzielt. Lokale Zerstörungen des Porenbetons an den Umlenkpunkten der Schrägstäbe bedingen Lastumlagerungen und eine Tendenz zur direkten Lastabtragung durch Sprengwerkwirkung.

Nach telefonischer Auskunft von Herrn Dr. Stankowski (CSZ, Darmstadt) am 9.9.2008 sind die Gleichungen 9 und 10 der EN 12602 für die Anwendung in Deutschland auszuschließen.



**Bild 5.9:** Vergleich der Bügelspannungen  $\sigma_{sw}$  gemäß Gleichung A.10 und A.11 in Abhängigkeit der Betonfestigkeit  $f_c$

Der Querkraftwiderstand schubbewehrter Porenbetonbauteile mit lotrechten Bügeln kann somit gemäß Gleichung 5.5 beschrieben werden. Die Gleichungen 5.6 bzw. 5.7 beschreiben das charakteristische Niveau bzw. den Mittelwert gemäß EN 12602.

$$\begin{aligned}
 V_{Rd3} &= V_{Cd} + V_{Wd} & (5.5) \\
 &= V_{Rd1} + (A_{sw}/s) \cdot z \cdot \sigma_{swd}
 \end{aligned}$$

Mit:  $V_{Rd1}$  gemäß Gleichung 5.1  
 $\sigma_{swd} = 0,45 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot f_{c0} (\varnothing_{sl}^2 + K_3 \varnothing_{sw}^2) / \varnothing_{sw}^2$   
 $f_{c0} = 2,4 f_{ck} / \gamma_c$  für verschweißte Querkraftbewehrung  
 $f_{c0} = 1,0 f_{ck} / \gamma_c$  für nicht-verschweißte Querkraftbewehrung  
 $\gamma_c$  = der Teilsicherheitsbeiwert für Porenbeton für **sprödes** Versagen

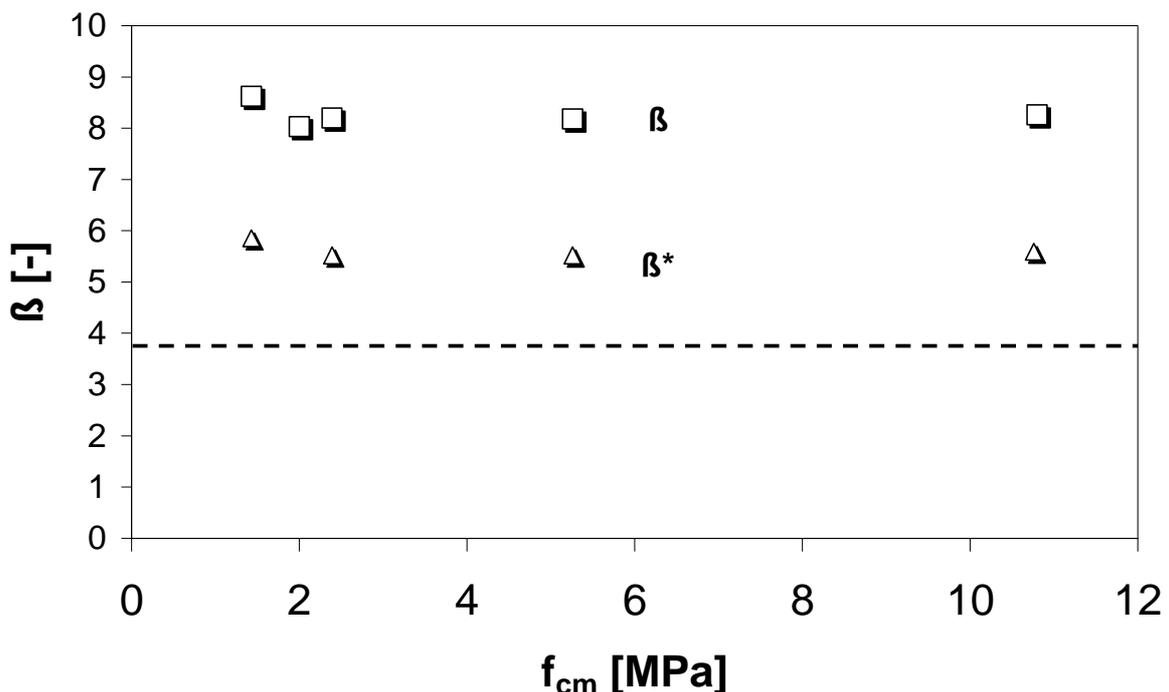
$$V_{Rk3} = V_{Rk1} + (A_{sw}/s) \cdot z \cdot \sigma_{swk} \quad (5.6)$$

Mit:  $V_{Rk1}$  gemäß Gleichung 5.2  
 $\sigma_{swd} = 0,45 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot f_{c0k} (\varnothing_{sl}^2 + K_3 \varnothing_{sw}^2) / \varnothing_{sw}^2$   
 $f_{c0} = 2,4 f_{ck}$  für verschweißte Querkraftbewehrung  
 $f_{c0} = 1,0 f_{ck}$  für nicht-verschweißte Querkraftbewehrung

$$V_{Rm3} = V_{Rm1} + (A_{sw}/s) \cdot z \cdot \sigma_{swm} \quad (5.7)$$

Mit:  $V_{Rm1}$  gemäß Gleichung 5.3a  
 $\sigma_{swd} = 0,45 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot f_{c0m} (\varnothing_{sl}^2 + K_3 \varnothing_{sw}^2) / \varnothing_{sw}^2$   
 $f_{c0} = 2,4 f_{cm}$  für verschweißte Querkraftbewehrung  
 $f_{c0} = 1,0 f_{cm}$  für nicht-verschweißte Querkraftbewehrung

In Bild 5.10 ist der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  für ausgewählte Betonfestigkeitsklassen für die Anwendung der Gleichungen A.9 und A.11 entsprechender eigenen Monte Carlo Simulationen aufgetragen. Es zeigt sich ein ausreichender Zuverlässigkeitsindex  $\beta > 3,8$ . Es wird darauf hingewiesen, dass Modellunsicherheiten entsprechend EN 12602 Anhang D mit einem zusätzlichen Variationskoeffizienten von  $V_m = 0,10$  berücksichtigt werden können ( $\beta^*$  in Bild 5.10).



**Bild 5.10:** Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  für Querkraft mit lotrechter Schubbewehrung entsprechend Gleichung A.9 und A.11 der EN 12602 und dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_c = 1,7$  sowie des Zuverlässigkeitsindex  $\beta^*$  bei Annahme einer Modellunsicherheit mit einem Variationskoeffizienten von  $V_m = 0,1$

### 5.3 Querkraft und Torsion

Die Bemessung für Gleichgewichtstorsion wird in EN 12602, Abschnitt A.7 beschrieben. Der Bemessungswert des Torsionswiderstands bügelbewehrter Bauteile ergibt sich gemäß Gleichung (5.7). Daraus leiten sich die entsprechenden charakteristische Gleichung 5.8 und die Gleichung des Mittelwerts 5.9 ab.

$$T_{Rd3} = 2 \cdot \sigma_{swd} \cdot A_k \cdot (A_{sw}/s) \quad (5.7)$$

Mit:

$$\begin{aligned} \sigma_{swd} &= (f_{cd}/\sqrt{2}) (b' + h') / (\pi \varnothing_{sw}) < f_{ywd} \\ A_k &= b' \cdot h' \\ f_{cd} &= f_{ck} / \gamma_c \\ \gamma_c &= \text{Teilsicherheitsbeiwert für Porenbeton mit **sprödem** Versagen} \end{aligned}$$

$$T_{Rk3} = 2 \cdot \sigma_{swk} \cdot A_k \cdot (A_{sw}/s) \quad (5.8)$$

Mit:

$$\begin{aligned} \sigma_{swk} &= (f_{ck}/\sqrt{2}) (b' + h') / (\pi \varnothing_{sw}) \\ A_k &= b' \cdot h' \end{aligned}$$

$$T_{Rm3} = 2 \cdot \sigma_{swm} \cdot A_k \cdot (A_{sw}/s) \quad (5.9)$$

Mit:

$$\begin{aligned} \sigma_{swk} &= (f_{cm}/\sqrt{2}) (b' + h') / (\pi \varnothing_{sw}) \\ A_k &= b' \cdot h' \end{aligned}$$

(1)P Wenn das statische Gleichgewicht eines Tragwerks von dem Torsionswiderstand von Porenbetonbauteilen abhängt, ist eine Bemessung für Torsion nötig.

(2) Ein Bemessungs-Torsionsmoment  $T_{Sd}$  kann ohne Torsionsbewehrung aufgenommen werden, wenn eine der Gleichungen (A.32a) bis (A.32c) erfüllt ist:

$$\frac{T_{Sd}}{T_{Rd1}} \leq 0,2 \quad \text{und} \quad \frac{V_{Sd}}{V_{Rd1}} \leq 0,95 \quad (\text{A.32a})$$

$$\frac{V_{Sd}}{V_{Rd1}} \leq 0,2 \quad \text{und} \quad \frac{T_{Sd}}{T_{Rd1}} \leq 0,95 \quad (\text{A.32b})$$

$$\frac{T_{Sd}}{T_{Rd1}} + \frac{V_{Sd}}{V_{Rd1}} \leq 1,2 \quad (\text{A.32c})$$

Dabei ist

$V_{Sd}$  definiert in A.4.1.1;

$V_{Rd1}$  definiert in A.4.1.2;

$T_{Rd1}$  das aufnehmbare Torsionsmoment, anzunehmen als  $0,06 f_{cd} W_T$ ;

$f_{cd}$  der Bemessungswert der Druckfestigkeit des Porenbetons  $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_C$ ;

$f_{ck}$  die charakteristische Druckfestigkeit des Porenbetons;

$\gamma_C$  der Teilsicherheitsbeiwert für Porenbeton für sprödes Versagen;

$W_T$  das Torsionswiderstandsmoment des Querschnitts.

ANMERKUNG 1 Der in einem Land anzuwendende Wert für  $\gamma_C$  darf dem jeweiligen nationalen Anwendungsdokument entnommen werden. Der zur Verwendung empfohlene Wert ist in Tabelle D.4 angegeben.

(3) Wenn keine der Gleichungen (A.32a) bis (A.32c) erfüllt ist, wird eine Torsionsbewehrung benötigt, die der Gleichung (A.33) genügt:

$$\frac{T_{Sd}}{T_{Rd3}} + \frac{V_{Sd}}{V_{Rd3}} \leq 1 \quad (\text{A.33})$$

Dabei ist

$V_{Rd3}$  definiert in A.4.1.3;

$T_{Rd3}$  das von einem Querschnitt mit Torsionsbewehrung aufnehmbare Torsionsmoment nach Gleichung (A.34):

$$T_{Rd3} = 2 A_k h_k \sigma_{slid} \rho_{T,1} = 2 A_k h_k \sigma_{swd} \rho_{T,s} \quad (\text{A.34})$$

$A_k = b' h'$  die durch die Achsen der Längsbewehrung in jeder Querschnittsecke begrenzte Querschnittsfläche, siehe Bild A.12;

[Auszug aus EN 12602]

$h_k$  die Höhe eines gedachten Kastenquerschnitts nach Gleichung (A.35):

$$h_k = \min\{b/6; h/6\}; \quad (\text{A.35})$$

$\sigma_{sld}$  der Bemessungswert der Zugspannung in der Torsions-Längsbewehrung;

$\sigma_{swd}$  der Bemessungswert der Zugspannung in den Bügeln;

$\sigma_{swd} < f_{yd}$  die zulässige Zugspannung in der Bewehrung infolge Torsion nach Gleichung (A.36):

$$\sigma_{swd} = (f_{cd} / \sqrt{2})(b' + h') / (\pi \phi_s) \quad (\text{A.36})$$

$f_{cd}$  der Bemessungswert der Druckfestigkeit des Porenbetons  $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_C$ ;

$f_{ck}$  die charakteristische Druckfestigkeit des Porenbetons;

$\gamma_C$  der Teilsicherheitsbeiwert für Porenbeton für sprödes Versagen;

$\phi_s$  der Durchmesser der Bügel;

$\rho_{T,l}$  das Bewehrungsverhältnis der zur Aufnahme der Torsion herangezogenen Längsbewehrung nach Gleichung (A.37):

$$\rho_{T,l} = A_{s,l} / [2h_k (b' + h')] \quad (\text{A.37})$$

$A_{s,l}$  die Querschnittsfläche der Torsions-Längsbewehrung;

$\rho_{T,s}$  das Bewehrungsverhältnis der zur Aufnahme der Torsion herangezogenen Bügel nach Gleichung (A.38):

$$\rho_{T,s} = A_{sw} / (h_k s) \quad (\text{A.38})$$

$A_{sw}$  die Querschnittsfläche der zur Aufnahme der Torsion herangezogenen Bügel;

$s$  der gegenseitige Abstand der Bügel.

ANMERKUNG 2 Der in einem Land anzuwendende Wert für  $\gamma_C$  darf dem jeweiligen nationalen Anwendungsdokument entnommen werden. Der zur Verwendung empfohlene Wert ist in Tabelle D.4 angegeben.

(4)P Die Torsionsbewehrung muss aus rechtwinklig zur Bauteillängsachse angeordneten geschlossenen Bügeln bestehen, die mit Längsstäben kombiniert werden. Geschlossene Bügel dürfen nicht aus Paaren von überlappenden U-Bügeln hergestellt werden. Der gegenseitige Abstand der Bügel darf nicht größer sein als  $\min\{b, h\}$  bzw. 25 cm. Die Längsstäbe sind so anzuordnen, dass in jeder Querschnittsecke mindestens ein Stab liegt und die übrigen Stäbe gleichmäßig über den inneren Umfang der Bügel verteilt sind.

(5)P Die Verankerung der Längsbewehrung ist für Zugkräfte infolge Biegung und Torsion zu bemessen.

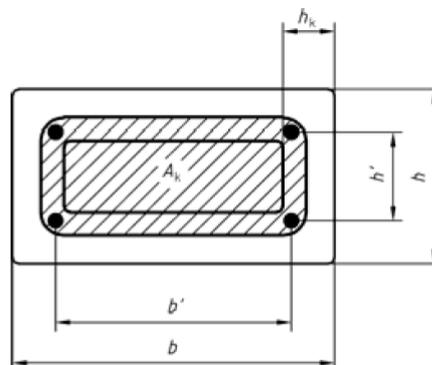
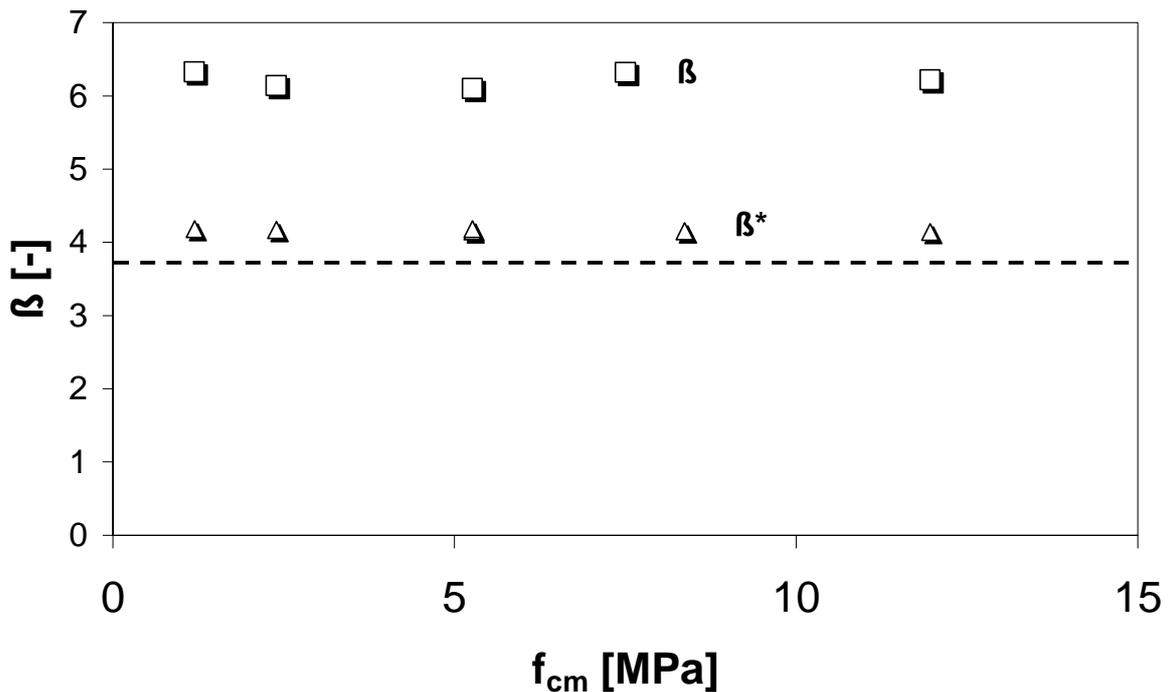


Bild A.12 — Idealisierter Kastenquerschnitt

[Auszug aus EN 12602]

In Bild 5.11 ist der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  für ausgewählte Betonfestigkeitsklassen für die Anwendung der Gleichungen A.34 entsprechend der eigenen Monte Carlo Simulationen aufgetragen. Es zeigt sich ein ausreichender Zuverlässigkeitsindex  $\beta > 3,8$ . Es wird darauf hingewiesen, dass Modellunsicherheiten entsprechend EN 12602 Anhang D mit einem zusätzlichen Variationskoeffizienten von  $V_m = 0,10$  berücksichtigt werden können ( $\beta^*$  in Bild 5.11).



**Bild 5.11:** Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  für Torsion entsprechend Gleichung A.34 der EN 12602 und dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_c = 1,7$  sowie des Zuverlässigkeitsindex  $\beta^*$  bei Annahme einer Modellunsicherheit mit einem Variationskoeffizienten von  $V_m = 0,1$

## 6. Durchstanzen

Die Bemessung für Durchstanzen wird in EN 12602, Abschnitt A.6 beschrieben. Der Bemessungswert ergibt sich gemäß Gleichung (6.1). Die Regelung steht in Übereinstimmung zu Gleichung 27 der DIN 4223-2. Daraus leiten sich die charakteristische Gleichung 6.2 und die Gleichung des Mittelwerts 6.3 ab.

$$V_{Rd} = 0,42 \cdot A_{crit} \cdot \tau_{Rd} \quad (6.1)$$

Mit:  $\tau_{Rd} = 0,063 f_{ck}^{0,5} / \gamma_c$   
 $\gamma_c =$  Teilsicherheitsbeiwert für Porenbeton mit **spröden** Versagen

$$V_{Rk} = 0,42 \cdot A_{crit} \cdot \tau_{Rk} \quad (6.2)$$

Mit:  $\tau_{Rd} = 0,063 f_{ck}^{0,5}$

$$V_{Rm} = 0,42 \cdot A_{crit} \cdot \tau_{Rm} \quad (6.3)$$

Mit:  $\tau_{Rm} = 0,063 f_{cm}^{0,5}$

(1) Das Bemessungsverfahren für Durchstanzen berücksichtigt nicht die Bewehrung. Es ordnet den Durchstanzwiderstand der kritischen Fläche zu. Der Tragwiderstand eines durch eine Punktlast belasteten Porenbetonbauteils ist in Gleichung (A.30) angegeben:

$$V_{Rd} = 0,42 \cdot A_{crit} \cdot \tau_{Rd} \quad (A.30)$$

Dabei ist

$A_{crit}$  die kritische Fläche nach A.6.2.3, in Quadratmillimeter;

$\tau_{Rd}$  der Grundwert der aufnehmbaren Schubspannung für Porenbeton,  $\tau_{Rd} = 0,063 f_{ck}^{0,5} / \gamma_c$ , in Megapascal;

$\gamma_c$  der Teilsicherheitsbeiwert für Porenbeton für sprödes Versagen.

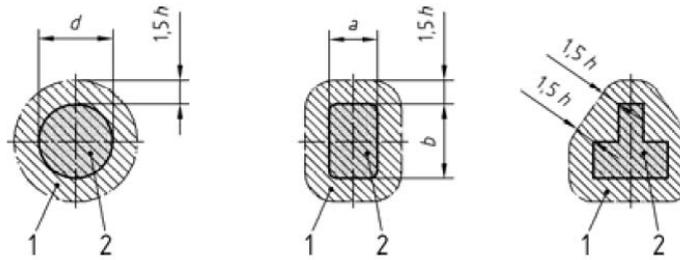
ANMERKUNG Der in einem Land anzuwendende Wert für  $\gamma_c$  darf dem jeweiligen nationalen Anwendungsdokument entnommen werden. Der zur Verwendung empfohlene Wert ist in Tabelle D.4 angegeben.

(2) Die einwirkende Durchstanzlast muss Gleichung (A.31) erfüllen.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (A.31)$$

[Auszug aus EN 12602]

(1) Der kritische Rundschnitt für kreisförmige oder rechteckige Lasteinleitungsflächen abseits von ungestützten Rändern ist definiert als ein die Lasteinleitungsfläche mit festgelegtem Abstand (angenommen zu  $1,5 h$ ) umschließender Rundschnitt, siehe Bild A.9.



**Legende**

1 kritische Fläche

2 Lasteinleitungsflächen

$$d < 3,5h$$

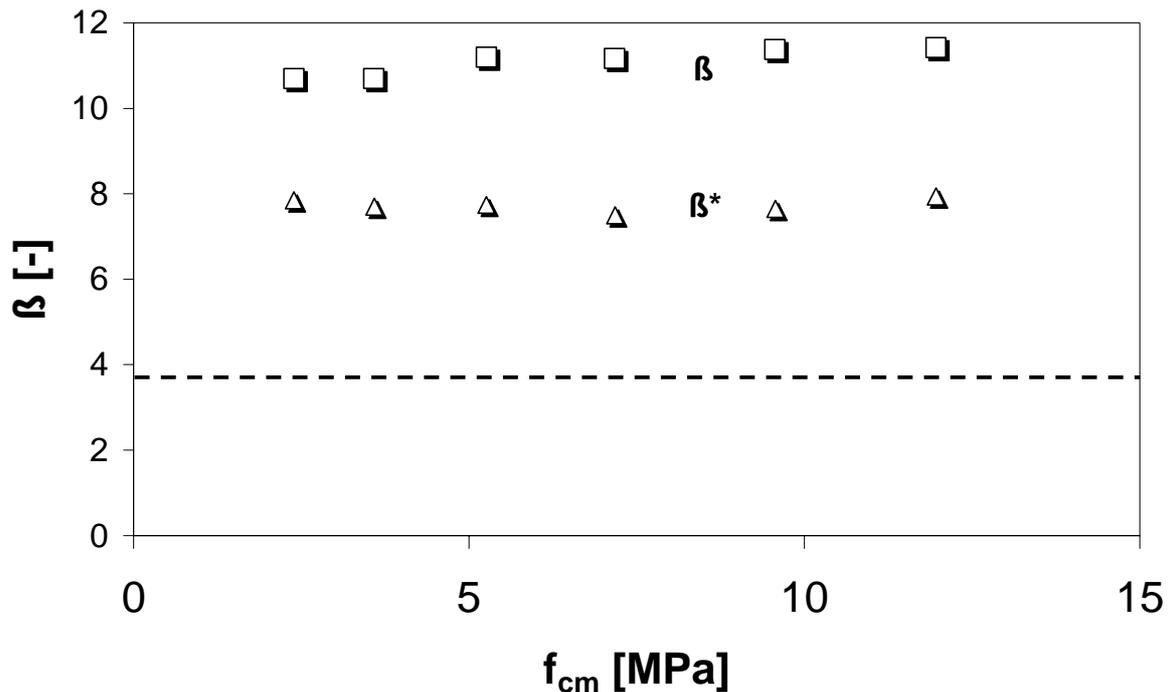
$$2(a+b) < 11h$$

$$b < 2a$$

**Bild A.9 — Kritische Rundschnitte um abseits von einem ungestützten Rand gelegene Lasteinleitungsflächen**

[Auszug aus EN 12602]

In Bild 6.1 ist der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  für ausgewählte Betonfestigkeitsklassen für die Anwendung der Gleichungen A.30 entsprechend der eigenen Monte Carlo Simulationen aufgetragen. Es zeigt sich ein ausreichender Zuverlässigkeitsindex  $\beta > 3,8$ . Es wird darauf hingewiesen, dass Modellunsicherheiten entsprechend EN 12602 Anhang D mit einem zusätzlichen Variationskoeffizienten von  $V_m = 0,10$  berücksichtigt werden können ( $\beta^*$  in Bild 6.1).



**Bild 6.1:** Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  für Durchstanzen entsprechend Gleichung A.30 der EN 12602 und dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_c = 1,7$  sowie des Zuverlässigkeitsindex  $\beta^*$  bei Annahme einer Modellunsicherheit mit einem Variationskoeffizient von  $V_m = 0,1$

## 7. Verankerung

Die Nachweise zur Bemessung der Verankerung der Bewehrung werden in EN 12602, Abschnitt A10.3 gegeben. Dabei wird zwischen der deklarierten Scherkraft des Schweißknotens  $F_{wg}$  und dem Bemessungswert der aufnehmbaren Lochleibungskraft des Porenbeton  $f_{ld}$  unterschieden. Die Regelung stimmt vom Format mit DIN 4223-2, Abschnitt 12.4 weitestgehend überein. Allerdings wird in EN 12602 die wirksame gesamte Länge  $t_t$  der Querbewehrung nach Gleichung A.50 herangezogen und dementsprechend die Scherfestigkeit der Knoten mit der Anzahl der Längsstäbe  $n_l$  multipliziert.

(1) P In den Bereichen, in denen die Verbundspannung unter der Bemessungslast (ULS) den Bemessungswert der Verbundfestigkeit überschreitet, ist die Verankerung der Längsbewehrungsstäbe über angeschweißte Querstäbe vorzunehmen. Die Anzahl und die Verteilung der Querstäbe muss in diesen Bereichen so sein, dass in jedem Querschnitt die Gleichung (A.47) für alle Bewehrungsstäbe erfüllt ist:

$$F_{RA} \geq F_{ld} \quad (A.47)$$

Dabei ist

$F_{RA}$  die aufnehmbare Verankerungskraft der zur Verankerung benutzten Querstäbe;

$F_{ld}$  der Bemessungswert der Zugkraft in der Längsbewehrung.

(2)  $F_{RA}$  und  $F_{ld}$  dürfen mithilfe der Gleichungen (A.48) und (A.51) bestimmt werden:

$$F_{RA} = 0,83 n_t \phi_{tot} t_t f_{ld} \leq 0,6 n_l n_t F_{wg} / \gamma_s \quad (A.48)$$

Dabei ist

$F_{wg}$  die deklarierte Scherkraft eines Schweißknotens, siehe Gleichung (8);

$n_l$  die Anzahl der Längsstäbe;

$n_t$  die Anzahl der Querstäbe zwischen dem betreffenden Schnitt und dem Ende des Bauteils;

$\phi_{tot}$  der wirksame Durchmesser der zur Verankerung benutzten Querstäbe. Der deklarierte mittlere äußere Durchmesser des Querstabs mit dem korrosionsschützenden Überzug  $\phi_{tot,g}$ , siehe 4.3.1, darf als der wirksame Durchmesser  $\phi_{tot}$  verwendet werden, wenn die Anwendbarkeit von  $\phi_{tot,g}$  durch Prüfungen (nach EN 15361) nachgewiesen worden ist. Andernfalls ist  $\phi_{tot} = \phi_t$ , wobei  $\phi_t$  der Durchmesser des zur Verankerung benutzten Querstabs ist. Der wirksame Durchmesser  $\phi_{tot}$  darf nicht größer als folgende Werte angenommen werden:  $\phi_{tot} \leq 1,5 \phi_t$  im Falle einer Zugkraft im Längsstab und  $\phi_{tot} \leq 1,0 \phi_t$  im Falle einer Druckkraft im Längsstab, wobei  $\phi_t$  der Durchmesser der Längsbewehrungsstäbe ist.

ANMERKUNG 1 Der Wert für  $\phi_{tot}$  ( $\phi_{tot} = \phi_t$  aus Prüfungen nach EN 15361), der in Gleichung (A.48) für die Bemessung einzusetzen ist, darf dem nationalen Anwendungsdokument des jeweiligen Verwendungslandes entnommen werden.

$t_t$  die gesamte wirksame Länge der zur Verankerung benutzten Querstäbe, siehe Gleichung (A.50);

$f_{ld}$  der Bemessungswert der aufnehmbaren Lochleibungsspannung des Porenbetons, siehe Gleichung (A.49);

$\gamma_s$  der Teilsicherheitsbeiwert für Betonstahl, siehe ANMERKUNG 2.

ANMERKUNG 2 Der in einem Land anzuwendende Wert für  $\gamma_s$  darf dem jeweiligen nationalen Anwendungsdokument entnommen werden. Der zur Verwendung empfohlene Wert ist in Tabelle D.4 angegeben.

[Auszug aus EN 12602]

Der Bemessungswert der aufnehmbaren Lochleibungsspannung  $f_{ld}$  des Porenbetons (Widerstand gegen Querdruck unter einem Querstab) wird nach Gleichung (A.49) bestimmt:

$$f_{ld} = K_{c1} m (e / \phi_{tot})^{1/3} \alpha f_{ck} / \gamma_C \leq K_{c2} f_{ck} / \gamma_C \quad (A.49)$$

Dabei ist

$f_{ck}$  die charakteristische Druckfestigkeit des Porenbetons;

$\gamma_C$  der Teilsicherheitsbeiwert für Porenbeton für sprödes Versagen. Jedoch darf für die Berechnung der aufnehmbaren Verankerungskraft für alle Stäbe über dem Auflager der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_C$  für duktilen Versagen verwendet werden, siehe ANMERKUNG 2;

$m$  ein Faktor zur Berücksichtigung des vorhandenen Querdrucks (z. B. Auflagerpressung) im Verankerungsbereich, er ist anzunehmen zu:

$$m = 1 + 0,3 \cdot \frac{n_p}{n_t}$$

Dabei ist

$n_p$  die Anzahl der zur Verankerung benutzten Querstäbe innerhalb des Bereichs mit Querdruck (z. B. am Auflager);

$e$  der Abstand der Achse der Querstäbe im Verankerungsbereich zur nächsten Oberfläche des Bauteils (siehe Bild A.15);

$K_c$  der Beiwert für die aufnehmbare Lochleibungsspannung.  $K_{c1}$  und  $K_{c2}$  (siehe Tabelle A.1) hängen von den Verbundklassen B 1 und B 2 ab, siehe 4.4.

[Auszug aus EN 12602]

Im Folgenden werden die Gleichungen zur Knotenscherfestigkeit der Bewehrung nach DIN 4213 und EN 12602 direkt gegenüber gestellt.

EN 12602:

$$F_{RA} \leq 0,6 F_{wg} / \gamma_s = 0,15 A_s f_y / \gamma_s \text{ für die Schweißfestigkeitsklasse S1}$$
$$\leq 0,6 F_{wg} / \gamma_s = 0,30 A_s f_y / \gamma_s \text{ für die Schweißfestigkeitsklasse S2}$$

DIN 4223-2:

$$F_{RA} \leq 0,5 S / \gamma_s = 0,175 A_s f_y / \gamma_s$$

Es zeigt sich, dass hinsichtlich der Verankerung die Schweißfestigkeitsklasse S1 der EN 12602 zu geringfügig konservativeren Werten führt als DIN 4223, während die Schweißfestigkeitsklasse S2 wesentlich progressiver als die bisherige Anwendung gemäß DIN 4223 ausfällt. Bezüglich der Scherkraft des Schweißknotens wird auf Abschnitt 3.3.2 verwiesen.

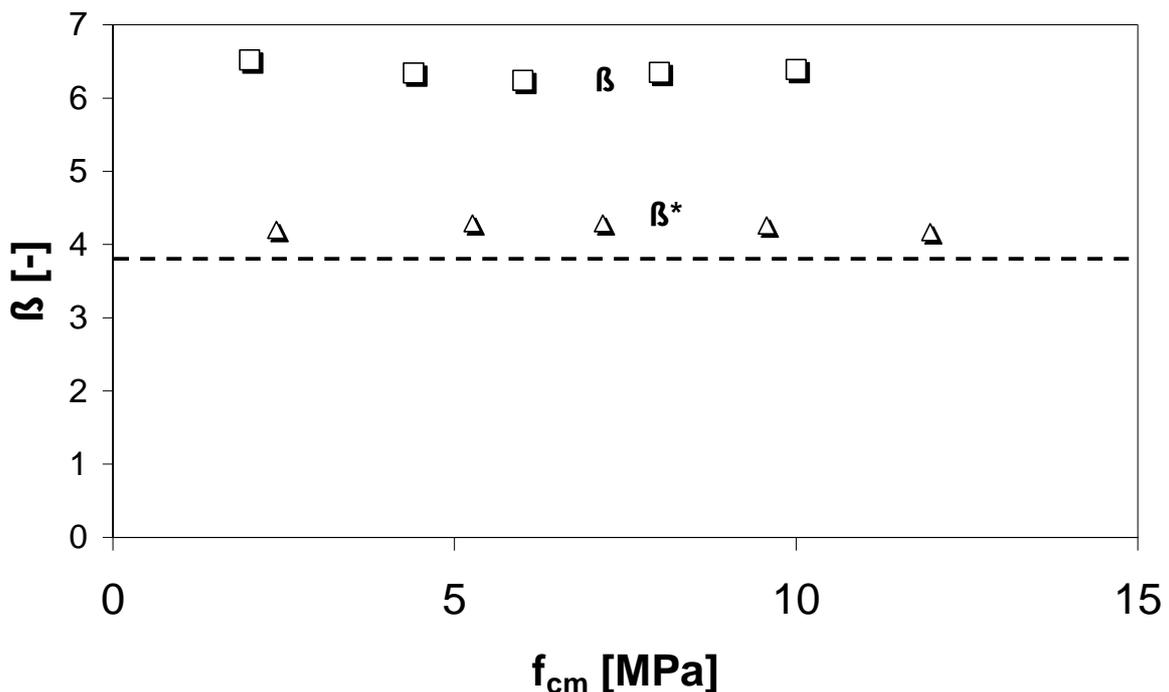
Im Folgenden wird die aufnehmbare Lochleibungskraft (Gleichungen 7.1 bis 7.3) des Porenbetons statistisch gemäß Gleichung A.49 mit Monte Carlo Analysen ausgewertet.

$$f_{ld} = K_{c1} m (e/d_q)^{1/3} \alpha f_{ck}/\gamma_c \leq K_{c2} f_{ck} / \gamma_c \quad (7.1)$$

$$f_{lk} = K_{c1} m (e/d_q)^{1/3} \alpha f_{ck} \leq K_{c2} f_{ck} \quad (7.2)$$

$$f_{lm} = K_{c1} m (e/d_q)^{1/3} \alpha f_{cm} \leq K_{c2} f_{cm} \quad (7.3)$$

In Bild 7.1 ist der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  für ausgewählte Betonfestigkeitsklassen für die Anwendung der Gleichungen A.49 entsprechend der eigenen Monte Carlo Simulationen für die Verbundklasse B1 aufgetragen. Es wird darauf hingewiesen, dass Modellunsicherheiten entsprechend EN 12602 Anhang D mit einem zusätzlichen Variationskoeffizienten von  $V_m = 0,10$  berücksichtigt werden können ( $\beta^*$  in Bild 7.1).



**Bild 7.1:** Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  für die Lochleibungsfestigkeit des Porenbetons entsprechend Gleichung A.49 der EN 12602 und dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_c = 1,7$  sowie des Zuverlässigkeitsindex  $\beta^*$  bei Annahme einer Modellunsicherheit mit einem Variationskoeffizient von  $V_m = 0,1$

## 8. Zusammenfassung und Empfehlung für das NAD

Im vorliegenden Gutachten wird die Zuverlässigkeit der Bemessungsgleichungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Biegung mit Längskraft, Querkraft, Torsion, Durchstanzen und Verankerung für Porenbeton gemäß EN 12602 unter Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte gemäß E-DIN 4223-103:2008-06 (siehe Bild 1.2) mit Monte Carlo Analysen statistisch betrachtet. In den Monte Carlo Analysen wird die natürliche Streuung der Materialfestigkeiten und der Bauteilabmessungen berücksichtigt. In der Untersuchung wurde für alle untersuchten Bemessungsgleichungen ein ausreichender Zuverlässigkeitsindex  $\beta > 3,8$  festgestellt. Insbesondere bei Anwendung des Teilsicherheitsbeiwerts  $\gamma_c = 1,7$  für sprödes Versagen wird der gemäß DIN 1055-100 erforderliche Zuverlässigkeitsindex  $\beta = 3,8$  deutlich überschritten.

Es wird darauf hingewiesen, dass die statistische Analyse stets von einem grundsätzlich korrekten mechanischen Modell ausgeht. Fehler in der Modellbildung können dabei nicht identifiziert werden. Bei deterministisch hergeleiteten mechanischen Modellen, die weiterhin von elasto-plastischen Spannungs-Dehnungs-Linien ausgehen, kann in Übereinstimmung mit [12] im Grenzzustand der Tragfähigkeit von vernachlässigbar geringen Modellunsicherheiten ausgegangen werden. Dies trifft z.B. für Biegung mit Längskraft zu und wird durch den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_c = 1,4$  in E-DIN 4223-103:2008-06 berücksichtigt. Bei empirisch abgeleiteten Bemessungsmodellen mit spröden Werkstoffverhalten ist hingegen naturgemäß von größeren Modellunsicherheiten auszugehen. Die Berücksichtigung der Modellunsicherheiten für diese Anwendungsfälle durch den in EN 12602 beschriebenen Variationskoeffizienten  $V_m = 0,1$  zeigt, dass diese mit den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_c = 1,7$  gemäß E-DIN 4223-103:2008-06 ebenfalls abgedeckt sind und für alle untersuchten Fälle zu einem Zuverlässigkeitsindex  $\beta^* > 3,8$  führen.

Über den eigentlichen Auftragsumfang hinaus wurden bei der Bearbeitung einige Auffälligkeiten in der Querkraftbemessung der EN 12602 festgestellt:

- Der Sockelbetrag  $0,06 f_{ck}$  in Gleichung A.6 der EN 12602 lässt sich an Hand der vorliegenden Querkraftversuche nicht begründen. Dies führt insbesondere bei Extrapolation auf die in EN 12602 vorgesehenen höheren Betonfestigkeiten zu einer

unsicheren Bemessung. Es wird empfohlen, den Sockelbetrag  $0,06 f_{ck}$  für die Anwendung der EN 12602 zu streichen.

- Die Gleichung A.10 zur Beurteilung der Bügelspannungen bei schubbewehrten Bauteilen und die Anwendung geneigter Schubbewehrung steht in Widerspruch zu der Bemessungs- und Versuchserfahrung in Deutschland, die im Wesentlichen in Gleichung A.11 wiedergegeben ist. Nach telefonischer Auskunft von Dr. Stankowski soll die Anwendung der Gleichung A.10 der EN 12602 auch in Zukunft in Deutschland ausgeschlossen werden.

Unter Ausschluss der zuvor genannten Punkte können die Teilsicherheitsbeiwerte gemäß E DIN 4223-103:2008-06 für die ständige und vorübergehende Bemessungskombination entsprechend der bisherigen Anwendung in Deutschland und den hier zugrunde liegenden Annahmen empfohlen werden. Eigene Untersuchungen zur außergewöhnlichen Kombination oder Erdbeben wurden nicht durchgeführt.

Aachen, den 16.1.2009

Dr.-Ing. W. Roeser

## 9. Literatur

- [1] DIN 1055-100: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln; März 2001, Beuth Verlag, Berlin
- [2] Eurocode 1-Anhang A: Tragwerksberechnung und -bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten; EC 1 / ENV 1991-1 - Anhang A; deutsche Fassung ENV 1991-1: 1994 (Dezember 1995)
- [3] EN 12602:2008 (D): Prefabricated reinforced components of autoclaved aerated concrete - Vorgefertigte bewehrte Bauteile aus dampfgehärtetem Porenbeton; CEN/TC 177, 2008-07
- [4] DIN 4223: Vorgefertigte bewehrte Bauteile aus dampfgehärtetem Porenbeton - Teil 1 bis 5; Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2003
- [5] E-DIN 4223-103:2008-6: Anwendung von vorgefertigten bewehrten Bauteilen aus dampfgehärteten Porenbeton - Sicherheitskonzept; NA 005-087-09 AA N 488
- [6] Roeser, W.: Zur Bemessung von Rahmenknoten aus Stahlbeton; Dissertation, RWTH Aachen, 2001
- [7] Fischer, L.: Das neue Sicherheitskonzept im Bauwesen; Bautechnik Spezial, Ernst & Sohn, 2001
- [8] Plate, E.J.: Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure; Ernst & Sohn, 1993
- [9] Joint Committee on Structural Safety: Probabilistic Model Code; JCSS, 10/2000
- [10] Hampe, E.: Tragverhalten unter speziellen Einwirkungen; in Franz, G.; Hampe, E.; Schäfer, K.: Konstruktionslehre des Stahlbetons: Band II Tragwerke, Teil B. Entstehen und Bestehen der Bauwerke; Springer Verlag, 1991
- [11] Moosecker, W.: Zur Bemessung der Schubbewehrung von Stahlbetonbalken mit möglichst gleichmäßiger Zuverlässigkeit; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 307, Beuth Verlag, Berlin, 1979
- [12] Schneider, J.: Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen; B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1996
- [13] Vismann, U.: Zuverlässigkeitstheoretische Verifikation von Bemessungskriterien im Stahlbetonbau; Dissertation, TU München, 1995
- [14] Six, M.: Sicherheitskonzept für nichtlineare Traglastverfahren im Betonbau; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 534, Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [15] Schueller, G.I.: Tragwerkszuverlässigkeit; in: Mehlhorn, G.: Der Ingenieurbau, Ernst & Sohn, 1996

- [16] Rüschi, H.: Gas- und Schaumbeton - Versuche zur Schubsicherung bei Balken aus bewehrtem Gas- und Schaumbeton; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 121, Beuth Verlag, Berlin, 1956
- [17] Schäffler, H.: Gas- und Schaumbeton - Druckfestigkeit von dampfgehärtetem Gasbeton nach verschiedener Lagerung *und* Über die Tragfähigkeit von bewehrten Platten aus dampfgehärtetem Gas- und Schaumbeton; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 133, Beuth Verlag, Berlin, 1959
- [18] Schäffler, H.: Gas- und Schaumbeton - Versuche über die Verankerung der Bewehrung in Gasbeton; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 136, Beuth Verlag, Berlin, 1960
- [19] Rüschi, H., Sell, R.: Gas- und Schaumbeton - Festigkeit der Biegedruckzone; Heft 143, Beuth Verlag, Berlin, 1961
- [20] Sell, R.: Festigkeit und Verformung von Gasbeton unter zweiaxialer Druck-Zug-Beanspruchung *und* Sell, R.; Zelger, C.: Versuche über den Verbund bei bewehrtem Gasbeton; Heft 209, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, Berlin, 1970
- [21] Bastgen, K.; Wesche, K.: Kurzzeitverhalten von extrem leichten Betonen, Druckfestigkeit und Formänderungen *und* Brieseman, D.: Die Schubtragfähigkeit bewehrter Balken aus dampfgehärtetem Gasbeton nach Versuche; Heft 314, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, Berlin, 1980
- [22] Daschner, F.; Zilch, K.: Schubtragfähigkeit längsbewehrter Porenbetonbauteile ohne Schubbewehrung, Tehrmische Vorspannung bewehrter Porenbetonbauteile, Kriechen von unbewehrtem Porenbeton, Kriechen des Porenbetons im Bereich der zur Verankerung der Längsbewehrung dienenden Querstäbe und Tragfähigkeit der Verankerung; Heft 518, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, Berlin, 2001
- [23] Reinhardt, H.W.: Überprüfung der Beziehung von Zug-/Biegezugfestigkeit zur Druckfestigkeit von Porenbeton nach prEN 12602; Gutachterliche Stellungnahme, 10.4.2006 und Zeus/Öttl: Forschungsbericht, 12-8.340.000/Öt, MPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut, 4.4.2006
- [24] Wehr, G.: Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit an querkraftbewehrten Elementen aus Porenbeton; Dissertation, Bauhausuniversität Weimar, 2001
- [25] Fischer, L.: Untersuchung industriell errichteter Wohnbauten aus Porenbeton, hergestellt 1966-88 im Werk Parchim - experimentelle Prüfung und statistische Auswertung; Bautechnik 1995, Heft 3, S. 174-182
- [26] Schwarz, P.; Stankowski, T.; Kirmse, H.; Langer, P.; Bertram, D.; Blaschke, R.; Langsdorf, A.; Flassenberg, G.: Erläuterungen zur DIN 4223:2003-12; Bundesverband Porenbeton, Dezember 2004 sowie Beispielsammlung