

Auswertung der verfügbaren Untersuchungsergebnisse zur Biegezugfestigkeit von Mauerwerk im Hinblick auf die Angabe von aktualisierten zulässigen Biegezugspannungen bei Biegebeanspruchung parallel zur Lagerfuge sowie erstmalig auch für die Biegebeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge

**T 2789**

T 2789

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.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

1998, ISBN 3-8167-5415-5

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

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

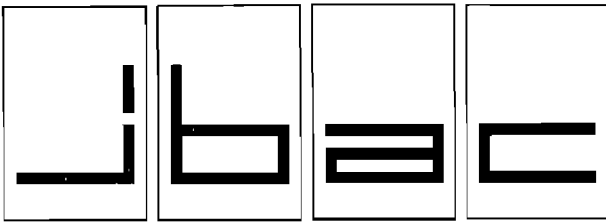
Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

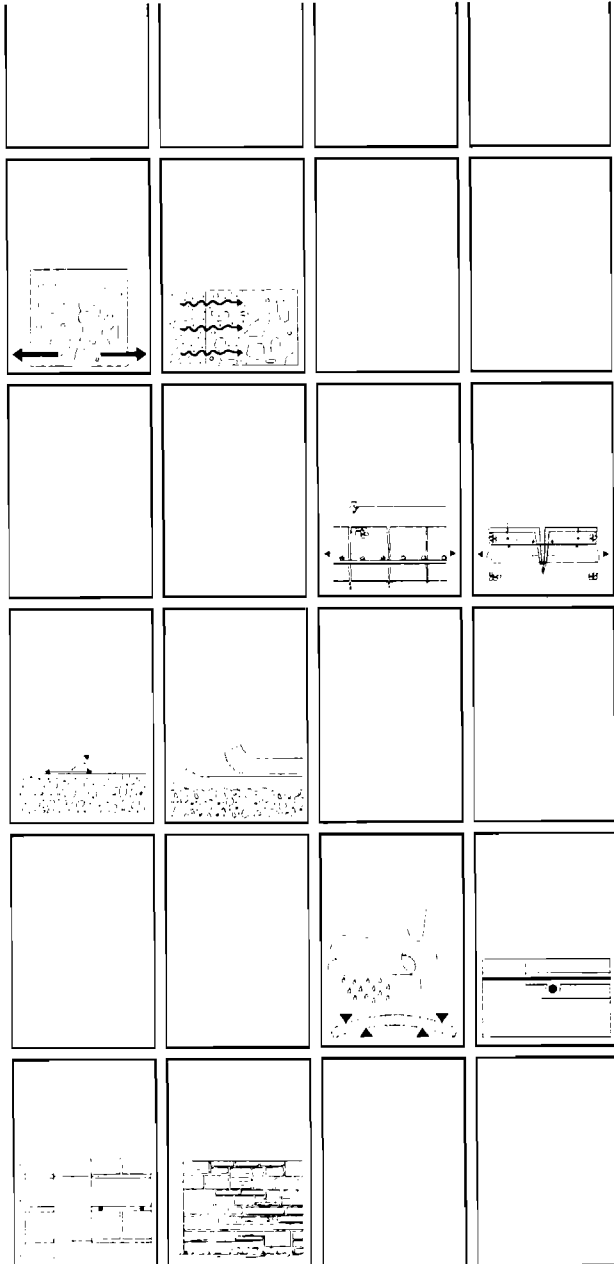
Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail [irb@irb.fhg.de](mailto:irb@irb.fhg.de)

URL <http://www.irb.fhg.de>



**Institut für Bauforschung Aachen**  
 Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule



## Forschungsbericht F 590

Auswertung der verfügbaren Untersuchungsergebnisse zur Biegezugfestigkeit von Mauerwerk im Hinblick auf die Angabe von aktualisierten zulässigen Biegezugspannungen bei Biegebeanspruchung parallel zur Lagerfuge sowie erstmalig auch für Biegebeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge

**Baustoff · Bauteil · Bauwerk**

<b>Forschung · Entwicklung</b>			
<b>Überwachung</b>			
<b>Prüfung · Beratung</b>			



Di

2. Ausfertigung

## THEMA

Auswertung der verfügbaren Untersuchungsergebnisse zur Biegezugfestigkeit von Mauerwerk im Hinblick auf die Angabe von aktualisierten zulässigen Biegezugspannungen bei Biegebeanspruchung parallel zur Lagerfuge sowie erstmalig auch für Biegebeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge

Forschungsbericht Nr.

F 590

vom 27.10.1997

---

## ABSCHLUSSBERICHT

Projektleiter

-

Sachbearbeiter

Dr.-Ing. P. Schubert

Auftraggeber/  
Förderer

Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstraße 30

10829 Berlin

Auftragsdatum

26.09.1996

Aktenzeichen

IV 1-5-817/96

Dieser Bericht umfaßt 49 Seiten, davon 24 Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet.

Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung.

Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

<b><u>INHALTSVERZEICHNIS</u></b>		<b>Seite</b>
1	ALLGEMEINES, EINFÜHRUNG.....	1
2	PRÜFVERFAHREN.....	2
2.1	Allgemeines, Prüfkörper .....	2
2.2	Herstellung, Anzahl, Lagerung der Prüfkörper, Prüfalter.....	4
2.3	Prüfung, Prüfergebnisse und Bewertung.....	4
3	EINFLÜSSE AUF DIE BIEGEZUGFESTIGKEIT .....	6
3.1	Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen.....	6
3.2	Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen .....	7
3.3	Ausführungsbedingte Einflüsse .....	7
4	RECHNERISCHE ERMITTLUNG DER BIEGEZUGFESTIGKEIT VON MAUERWERK.....	8
5	VORLIEGENDE VERSUCHSERGEBNISSE FÜR DIE BIEGEZUGFESTIGKEIT - KLEINE WÄNDE, DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE.....	11
5.1	Allgemeines.....	11
5.2	Bewertung der Versuchsergebnisse, Folgerungen .....	12
5.2.1	Allgemeines.....	12
5.2.2	Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen (s. a. Tabelle 2 und Bilder 7 bis 10).....	12
5.2.3	Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen (s. a. Tabelle 3 und Bilder 11 und 12) .....	14
5.2.4	Zusammenhang zwischen Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht und parallel zu den Lagerfugen.....	15

<b><u>INHALTSVERZEICHNIS</u></b>		<b>Seite</b>
6	VERGLEICH VON VERSUCHSMÄßIG UND RECHNERISCH ERMITTELTEN BIEGEZUGFESTIGKEITSWERTEN VON MAUERWERK.....	16
6.1	Allgemeines.....	16
6.2	Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen.....	17
7	VORSCHLÄGE FÜR DIE FESTLEGUNG VON CHARAKTERISTISCHEN BIEGEZUGFESTIGKEITSWERTEN .....	19
7.1	Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen .....	19
7.2	Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen.....	20
8	ZUSAMMENFASSUNG, AUSBLICK.....	20
9	LITERATUR.....	22
	Tabellen	A1-A3
	Bilder	B1-B22

## 1 ALLGEMEINES, EINFÜHRUNG

In DIN 1053-1 und -2, Fassungen 02.90 und 07.84 werden zulässige Zug- und Biegezugspannungen nur für die Beanspruchung parallel zur Lagerfuge angegeben. Eine planmäßige Beanspruchung auf Zug- und Biegezug senkrecht zur Lagerfuge ist nicht zulässig. Die zulässigen Zug-, Biegezugspannungen parallel zur Lagerfuge entsprechen etwa dem Erkenntnisstand von 1985 und sind auch aus diesem Grunde sehr vorsichtig angesetzt worden.

Bei der Überarbeitung von DIN 1053-1, -2 wurde die Frage nach zulässigen Zug-, Biegezugspannungen senkrecht zur Lagerfuge diskutiert. In der DIN V ENV 1996-1-1 (Eurocode 6) /1/ ist eine derartige Beanspruchung zulässig, wenn das Versagen der entsprechenden Bauteile nicht zu einem Gesamtversagen des Bauwerks oder wichtiger Teile des Bauwerks führt. Die Frage nach der Einführung von zulässigen Spannungen für diesen Beanspruchungsfall war deshalb auch bei der Bearbeitung des Nationalen Anwendungsdokumentes (NAD) für die ENV Diskussionsgegenstand. Es ist bekannt und auch durch Versuche belegt, daß Mauerwerk senkrecht zu den Lagerfugen eine z. T. nennenswerte Biegezugfestigkeit aufweist. Daß eine solche Biegezugfestigkeit vorhanden ist, ergibt sich auch indirekt beim rechnerischen Nachweis der Ausfachungsflächen nach DIN 1053-1, der in einer Reihe von Fällen ohne den Ansatz einer Biegezugfestigkeit nicht gelingt.

Da bisher jedoch keine zusammenfassende und bewertende Auswertung von Versuchsergebnissen zur Biegezugfestigkeit von Mauerwerk - vor allem senkrecht zu den Lagerfugen - vorliegt, sahen sich weder der Fachausschuß DIN 1053-1 bzw. -2 noch der Fachausschuß zum Nationalen Anwendungsdokument in der Lage, konkret über zulässige Spannungen für diesen Beanspruchungsfall zu diskutieren.

Ziele in der vorliegenden Forschungsarbeit sind deshalb:

- (1) Erfassung und Auswertung aller verfügbaren Untersuchungsergebnisse zur Biegezugfestigkeit von Mauerwerk bei Beanspruchung parallel und senkrecht zu den Lagerfugen und ausschließlich in bezug auf kleine Mauerwerkprüfkörper analog prEN 1052-2 /2/.
- (2) Darstellen der wesentlichen Einflußgrößen auf die Biegezugfestigkeit von Mauerwerk.
- (3) Versuch, die Biegezugfestigkeit aus Eigenschaftswerten von Mauersteinen, Mauermörtel und deren Verbund herzuleiten und

- (4) Vorschlag für die Festlegung von zulässigen Zug- und Biegezugspannungen auf der Basis charakteristischer Biegezugfestigkeitswerte (5 %-Quantil-Werte).

Die Forschungsarbeit wurde dankenswerter Weise vom Deutschen Institut für Bautechnik, Berlin, finanziell gefördert.

Über die wesentlichen Ergebnisse der Forschungsarbeit wurde bereits vorab im Mauerwerk-Kalender 1997 /3/ berichtet. Auf diese Veröffentlichung wird im folgenden hauptsächlich Bezug genommen.

## **2 PRÜFVERFAHREN**

### **2.1 Allgemeines, Prüfkörper**

Die Druckfestigkeit von Mauerwerk wird nach DIN 18 554-1 an kleinen Wandprüfkörpern ermittelt. Diese stellen einen repräsentativen „Ausschnitt“ aus einer üblicherweise geschoß-hohen Mauerwerkwand dar. Mit diesem „Ersatzprüfkörper“ wurde ein ähnlicher Weg wie bei der Prüfung von Beton an Betonwürfeln beschritten. Durch die Verwendung der kleinen Wandprüfkörper wird bei ausreichender Aussagekraft der Prüfergebnisse der Prüfaufwand wesentlich verringert.

Eine ähnliche Verfahrensweise wurde für die Ermittlung der Biegezugfestigkeit von Mauerwerk gewählt. In der entsprechenden europäischen Prüfnorm prEN 1052-2 /2/ - eine deutsche Prüfnorm existiert bislang nicht - wurden, analog wie bei der zuvor beschriebenen Druckfestigkeitsprüfung, kleine Wände als Prüfkörper festgelegt. Durch die vereinbarten Maße und den Schichtenaufbau sind diese kleinen Wände repräsentativ für das jeweilige Mauerwerk. Der kleine wandartige Prüfkörper ist nach DIN V ENV 1996-1-1 (Eurocode 6) /1/ Bezugs-Prüfkörper zur Ermittlung der Biegezugfestigkeit von Mauerwerk sowohl senkrecht als auch parallel zu den Lagerfugen. Die an diesen Prüfkörpern ermittelten Biegezugfestigkeitswerte für Mauerwerk sind - nach entsprechender sicherheitsbezogener Bewertung - die Grundlage für die Bestimmung der Biegetragfähigkeit von Mauerwerk in /1/.

Die Fassung Januar 1996 der EN 1052-2 wurde vom zuständigen technischen Komitee (CEN/TC 125) für den europäischen „Weißdruck“ verabschiedet.



Bei der Prüfung nach dieser EN handelt es sich um einen 4-Punkt-Biegeversuch. Um einen für Mauerwerk repräsentativen Prüfkörper zu erhalten und geeignete Prüfbedingungen zu gewährleisten, wurden folgende Festlegungen getroffen (siehe auch Bilder 1 und 2):

(1)

Biegebeanspruchung	Steinhöhe	Prüfkörperhöhe (h)	Prüfkörperbreite (b)	Zusätzliche Bedingungen
	mm			
senkrecht zu den Lagerfugen	beliebig	-	$\geq 400$ und $\geq 1,5 l_{st}$	mind. 2 Lagerfugen innerhalb $l_2$
parallel zu den Lagerfugen	$\leq 250$	$\geq 240$ und $\geq 3 h_{st}$	-	mind. 1 Stoßfuge je Schicht innerhalb $l_2$
	$> 250$	$\geq 1000$	-	mind. 1 Lagerfuge, mind. 1 Stoßfuge innerhalb $l_2$

$h_{st}, l_{st}$ : Steinhöhe, -länge

(2)  $(l_1 - l_2) / 2 \geq d$

- d gleich Steinbreite, wenn nicht anders verlangt
- $l_2 = (0,4 \dots 0,6) \cdot l_1$
- $l_2$  so anordnen, daß die Strecke symmetrisch zu den nächsten parallel zu den Auflagern liegenden Mörtelfugen ist.
- $l_3 \geq 50$  mm

(3) Es ist sicherzustellen, daß im Auflagerbereich der Prüfkörper - gilt für Biegebeanspruchung parallel zu den Lagerfugen - keine Reibungskräfte auftreten. Dies läßt sich (näherungsweise) erreichen z. B. durch

- 2 Folien (Dicke  $d \geq 0,2$  mm) mit Gleitfett zwischen den Folien
- Nadel-, Kugel- oder Rollenlager.

## 2.2 Herstellung, Anzahl, Lagerung der Prüfkörper, Prüfalter

Hinsichtlich der Vorbehandlung der Mauersteine und der Herstellung der Mauerwerkprüfkörper finden sich in /2/ die nachfolgenden Angaben.

- (1) Die Mauersteine sind wie angegeben vorzubehandeln. Der Feuchtegehalt von Porenbeton- und Kalksandsteinen ist zu ermitteln. Bei anderen Mauersteinen ist die Vorbehandlung vor dem Vermauern zu beschreiben.
- (2) Die Prüfkörper sind innerhalb von 30 min nach der Vorbehandlung ohne Unterbrechung des Mauerns herzustellen. Die Prüfkörperanzahl je Beanspruchungsrichtung beträgt mindestens fünf.
- (3) Sofort nach dem Herstellen sind die Prüfkörper mit einer Auflast bzw. Druckspannung von  $2,5 \cdot 10^{-3}$  bis  $5,0 \cdot 10^{-3}$  N/mm<sup>2</sup> zu belasten. Prüfkörper -außer mit Mörtel auf Kalk-Basis - sind bis zur Prüfung mit Folie abzudecken. Die Prüfkörper sollen bis zur Prüfung nicht bewegt werden.
- (4) Das Prüfalter beträgt  $(28 \pm 1)$  d.

## 2.3 Prüfung, Prüfergebnisse und Bewertung

- (1) Die Prüfkörper werden unter Einhaltung der Bedingungen nach Abschnitt 2.1 (2) und (3) in eine geeignete Prüfmaschine bzw. Prüfeinrichtung (s. als Beispiel Bilder 3 und 4) der Klasse 2 eingebaut.
- (2) Die Auflagerungs- und Belastungselemente müssen den vollflächigen Kontakt über die gesamte Prüfkörperhöhe bzw. -breite sicherstellen. Dies kann z. B. mit mind. 7 mm dicken Gummischläuchen auf Rundstahl von 8 mm Durchmesser erreicht werden (s. Bilder 3, 4).
- (3) Die Prüfkörper werden mit einer Biegespannung zwischen 0,03 und 0,3 (N/mm<sup>2</sup>)/min bis zum Bruch belastet.
- (4) Außer den Maßen werden die Belastungszeit bis zur Höchstlast max F, die Höchstlast auf 10 N genau und das Reißbild ermittelt. Versuche mit einem Bruch außerhalb von  $l_2$  (s. Bilder 1 und 2) werden nicht gewertet. In diesem Falle sind weitere Prüfkörper bis mindestens 5 „gültige“ Versuche vorliegen, zu prüfen.

(5) Die Biegefestigkeit  $\beta_{BZ}$  ergibt sich zu (Maßbezeichnungen s. Bild 1)

$$\beta_{BZ}(f_{xi}) = \frac{3 \max F (l_1 - l_2)}{2 \cdot b \text{ (bzw. } h) \cdot d^2} \quad (\text{N} / \text{mm}^2)$$

(6) Die charakteristische Biegefestigkeit (5 %-Quantil) wird wie folgt ermittelt:

- bei  $n = 5$

$$\beta_{BZ,5\%}(f_{xk}) = \beta_{BZ}(f_{xi}) / 1,5 = \beta_{BZ}(f_{xi}) \cdot 0,67$$

- bei  $n > 5$  unter Bezug auf die logarithmische Normalverteilung

$$\bar{y} = \Sigma y_n / n$$

$$y_n = \log_{10} \cdot f_{xn}$$

$$y_c = \bar{y} - k \cdot s$$

$$f_{xk} = \text{antilog}_{10}(y_c)$$

mit

$f_{xn}$   $f_{x1}, f_{x2} \dots f_{xn}$  (Einzelwerte der Biegefestigkeit)

$n$  Anzahl der Versuche

$\bar{y}$  Mittelwert

$k$  Faktor in Abhängigkeit von  $n$   
 $k = 2,18; 2,08; 2,01; 1,96; 1,92$  für  
 $n = 6; 7; 8; 9; 10$

$s$  Standardabweichung der logarithmierten Werte  $y_1, y_2 \dots y_n$

$f_{xk}$  charakteristische Biegefestigkeit.

### 3 EINFLÜSSE AUF DIE BIEGEZUGFESTIGKEIT

#### 3.1 Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen

##### Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen

Bei sachgerechter Vermörtelung weist das Mauerwerk eine durchgehende, unter Biegebeanspruchung voll wirksame Druckzone auf. Das Versagen des Mauerwerks unter Biegebeanspruchung kann erfolgen durch:

- (1) *Überschreiten der Biegezugfestigkeit der Mauersteine.*  
Dies ist zu erwarten bei Mauerwerk mit hoher Verbundfestigkeit zwischen Mauerstein und Mauermörtel, geringer Steindruckfestigkeit (ersatzweise für die Biegezugfestigkeit) bzw. bei hohem Lochanteil und/oder ungünstigem Lochbild für die Biegezugbeanspruchbarkeit der Mauersteine. Beispiele für einen derartigen Versagensfall sind Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln mit höherfesten Normalmörteln oder Dünnbettmörtel oder auch Dünnbettmauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen niedriger Festigkeitsklassen.
- (2) *Überschreiten der Verbundfestigkeit (Scherfestigkeit) zwischen Lagerfugenmörtel und Mauerstein.*  
Dieser Versagensfall ist wahrscheinlich bei Mauerwerk mit höherfesten Mauersteinen und vergleichsweise geringer Verbundfestigkeit zwischen Mauerstein und Mauermörtel. Ein Beispiel dafür ist Mauerwerk aus Kalksandsteinen mit Normalmörtel. Anzumerken ist, daß es sich bei der Scherbeanspruchung in diesem Versagensfall um ein „Abdrehen“ der Lagerfugen gegen den Mauerstein handelt, das eher einer Torsionsbeanspruchung entspricht. Diese wird durch die Haftscherfestigkeitsprüfung nach DIN 18 555-5 oder nach EN 1052-3 nicht erfaßt. Aus diesem Grunde können die Haftscherfestigkeitswerte nach DIN oder EN die Verbundeigenschaften bei dieser Beanspruchung i. allg. nicht genau genug beschreiben (s. dazu auch in Abschn. 4).
- (3) *Überschreiten der Druckfestigkeit der Mauersteine in Längsrichtung der Wand in der Biegedruckzone.*  
Dieser Versagensfall tritt bei vergleichsweise hoher Verbundfestigkeit zwischen Lagerfugenmörtel und Mauerstein und großer Biegezugfestigkeit des Mauersteins aber sehr niedriger Längs- bzw. Querdruckfestigkeit der Mauersteine infolge eines hohen Lochanteils und für diese Beanspruchung ungünstigen Lochbildes ein. Ein Beispiel dafür ist Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln mit in Wandlängsrichtung versetzten Steinstege, hohem Lochanteil und geringer Steifigkeit der in der Biegedruckzone liegenden Steinstege.

### Mauerwerk mit unvermörtelten Stoßfugen

Wegen der nicht vermörtelten Stoßfuge können Druckspannungen in der Biegedruckzone nur im Bereich der Lagerfugen aufgenommen werden.

Als Ursache für das Versagen des Mauerwerks kommen die zuvor aufgeführten Fälle (1) und (2) in Frage.

### **3.2 Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen**

Die Biegezugfestigkeit wird - unabhängig von der Ausführung der Stoßfugen (vermörtelt, unvermörtelt) - durch die Verbundfestigkeit zwischen Lagerfugenmörtel und Mauerstein (Biegehaftzugfestigkeit) und die Steinbiegezugfestigkeit, jeweils in Richtung senkrecht zu den Lagerfugen, bestimmt.

Daraus ergeben sich folgende 2 mögliche Versagensfälle

- (1) Überschreiten der Haftzugfestigkeit zwischen Lagerfugenmörtel und Mauerstein - Haftzugbiegebeanspruchung.  
Dieser Fall wird dann eintreten, wenn die Steinfestigkeit im Vergleich zur Biegehaftzugfestigkeit zwischen Lagerfugenmörtel und Mauerstein deutlich größer ist. Dies trifft mit Ausnahme von Dünnbettmauerwerk i. allg. zu.
- (2) Überschreiten der Steinbiegezugfestigkeit (in Richtung Steinhöhe).  
Dieser Versagensfall kann bei Dünnbettmauerwerk eintreten, wenn die Steinfestigkeit gering ist. Ein Beispiel dafür ist Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen niedriger Festigkeitsklasse und Dünnbettmörtel.

### **3.3 Ausführungsbedingte Einflüsse**

Die wesentlichsten ausführungsbedingten Einflüsse sind:

- (1) *Das Vornässen der Mauersteine*  
Der Einfluß ist besonders groß bei sehr stark wasseraufsaugenden Mauersteinen und/oder Witterungsbedingungen, welche eine schnelle und intensive Austrocknung des Mauerwerks - vor allem des Mauermörtels - fördern. Durch zu starken und schnellen Wasserentzug aus dem Fugenmörtel kann die Verbundfestigkeit zwischen

Fugenmörtel und Mauerstein beträchtlich verringert werden. Eine weitere Folge - auch eines zu schnellen und intensiven Austrocknens - kann ein hohes Schwinden des Fugenmörtels im Außenrandbereich mit möglicher Ablösung vom Mauerstein sein. Dies wirkt sich besonders gravierend auf die Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht zu den Lagerfugen aus.

(2) *Das Vermörteln der Fugen*

Durch nicht vollflächig bzw. vollständig vermörtelte Fugen kann die Verbundfestigkeit zwischen Fugenmörtel und Mauerstein wesentlich vermindert werden. Dies führt vor allem in den Fällen zu einer verringerten Biegezugfestigkeit des Mauerwerks, in denen die Verbundfestigkeit die Biegezugfestigkeit maßgebend bestimmt (s. (2) in Abschn. 3.1 und (1) in Abschn. 3.2).

#### 4 RECHNERISCHE ERMITTLUNG DER BIEGEZUGFESTIGKEIT VON MAUERWERK

Mann hat sich /4/ mit der theoretischen Herleitung der *Biegezugfestigkeit von Mauerwerk parallel zur Lagerfuge* befaßt. In /4/ werden Rechenansätze für Mauerwerk mit unvermörtelten und vermörtelten Stoßfugen hergeleitet.

##### Mauerwerk mit unvermörtelten Stoßfugen

Da über die Stoßfugen weder Zug- noch Druckkräfte übertragen werden können, lassen sich die Rechenansätze für zentrischen Zug parallel zu den Lagerfugen anwenden (s. auch in /4, 5/ und Bilder 5 und 6):

$$(1) \beta_{\text{BZ,pu}} = 0,5 \cdot \beta_{\text{Z,st}} \frac{h_{\text{st}}}{h_{\text{st}} + d_{\text{F}}} + \beta_{\text{Z,mö}} \frac{d_{\text{F}}}{h_{\text{st}} + d_{\text{F}}} \quad (1.1)$$

$$(2) \quad \beta_{\text{BZ,pu}} = \beta_{\text{HS}} \frac{\ddot{u}}{h_{\text{st}} + d_{\text{F}}} + \beta_{\text{Z,mö}} \cdot \frac{d_{\text{F}}}{h_{\text{st}} + d_{\text{F}}} \quad (1.2)$$

mit

$\beta_{\text{Z,st}}$  Zugfestigkeit Mauersteine parallel zu den Lagerfugen

$\beta_{\text{Z,mö}}$  Zugfestigkeit des Mörtels in der Lagerfuge

$\beta_{HS}$  Haftscherfestigkeit

$h_{st}$  Steinhöhe

$d_F$  Fugendicke (Lagerfuge)

$\ddot{u}$  Überbindemaß.

Maßgebend ist der kleinste der beiden Werte  $\beta_{BZ,pu}$  der Gleichungen (1.1), (1.2).

Da das Mitwirken der Mörtellagerfuge (2. Term in den Gl. (1.1), (1.2)) bisher nicht nachgewiesen ist und auch nur einen geringen Beitrag zu  $\beta_{BZ,pu}$  darstellt, kann der 2. additive Teil in den Gleichungen entfallen.

Bei Dünnbettmauerwerk und anderem Mauerwerk aus Mauersteinen mit großer Steinhöhe ( $h_{st} \geq 238$  mm) kann Gleichung (1.1) vereinfacht werden zu

$$\beta_{BZ,pu} = 0,5 \cdot \beta_{Z,st} \quad (1.3)$$

Die Gleichungen entsprechen den beiden Versagensfällen (1) und (2) nach Abschn. 3.1 für Mauerwerk mit unvermörtelten Stoßfugen. Anstelle der in Gleichung 1.1 nach /2/ angesetzten Zugfestigkeit der Mauersteine müßte zutreffender mit der Stein-Biegezugfestigkeit gerechnet werden.

#### Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen

In /4/ wird - wie auch in Abschn. 3.1 ausgeführt - zwischen dem Versagen der Steine (Überschreiten der Steinbiegezugfestigkeit) und dem Versagen des Verbundes zwischen Mauermörtel und Mauerstein (Überschreiten der Verbundfestigkeit) unterschieden. Folgende Gleichungen werden hergeleitet:

$$(1) \quad \beta_{BZ,pv} = 0,59 \cdot \beta_{Z,st} \quad (2.1)$$

$$(2) \quad \beta_{BZ,pv} = \frac{\beta_{HS} (1 + 1,24 \cdot h/d \cdot k)}{0,71 - 0,75 \cdot \ddot{u}/d \cdot \mu} \cdot \frac{\ddot{u}}{h} \quad (2.2)$$

mit

$$h = h_{st} + d_F$$

d Wanddicke

$\mu$  Reibungsbeiwert,  $\mu = 0,6$  (s. auch in /4/).

Bei der rechnerischen Ermittlung der *Biegezugfestigkeit von Mauerwerk für den Fall Verbundversagen* wurde in /4/ neben der Scherfestigkeit ohne Auflast - Haftscherfestigkeit - auch der Anteil  $\mu \cdot \sigma_D$  infolge Auflast  $\sigma_D$  mit berücksichtigt. Da sich die vorliegende Forschungsarbeit ausschließlich auf die Biegezugfestigkeit des Mauerwerks als Materialeigenschaft bezieht, muß dieser auflastbezogener Anteil unberücksichtigt bleiben. Die entsprechende Gleichung nach /4/ - hier Gleichung (2.2) - wurde deshalb ohne den Anteil „ $\mu \cdot \sigma_D$ “, ansonsten jedoch nach /4/ hergeleitet.

In der Gleichung (2.2) nach /4/ wird die Verbundfestigkeit zwischen Stoßfugenmörtel und Mauerstein als Verhältniswert zur Haftscherfestigkeit zwischen Lagerfugenmörtel und Mauerstein angegeben:

$$\beta_{HS,ST} = k \cdot \beta_{HS}$$

Der Wert k wurde in /4/ für einen Vergleich berechneter Biegezugfestigkeitswerte mit Versuchsergebnissen zunächst zu 0,75 angenommen. Dieser Wert erscheint zu hoch, vor allem dann, wenn die übliche Ausführungsqualität berücksichtigt wird. Desweiteren wird als Eigenschaftskenngröße für die Verbundfestigkeit die Haftscherfestigkeit angesetzt. Wie bereits in Abschn. 3.1 ausgeführt, unterscheiden sich die Beanspruchungen bei der Prüfung der Haftscherfestigkeit und bei der Biegebelastung des Mauerwerks. Wie groß der daraus resultierende Unterschied der Verbundfestigkeit zwischen Lagerfugenmörtel und Mauerstein ist, muß durch Untersuchungen geklärt werden.

Die in /4/ theoretisch hergeleiteten Rechnungsansätze für die Biegezugfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen sind ein wertvoller und wichtiger Beitrag und die Voraussetzung für die Festlegung von aktualisierten zulässigen Biegezugspannungen bei Verzicht auf Biegezugversuche an Mauerwerk. Die Rechenansätze bedürfen - wie zuvor ausgeführt - für einige wenige Eingangsgrößen noch der Überarbeitung.



## 5 VORLIEGENDE VERSUCHSERGEBNISSE FÜR DIE BIEGEZUGFESTIGKEIT - KLEINE WÄNDE, DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

### 5.1 Allgemeines

Die im folgenden verwendeten Kurzzeichen sind in der Tabelle 1 erläutert. Die Tabellen 2 und 3 enthalten die zusammengefaßten Versuchs- und Auswertergebnisse für die Biegezugfestigkeit senkrecht (Tabelle 2) und parallel (Tabelle 3) zu den Lagerfugen. Die Quellen der einzelnen Untersuchungen enthält der zweite Teil des Literaturverzeichnisses.

Unter Bezug auf die vorliegenden Untersuchungsberichte wurde eine Datenbank mit allen wesentlichen Eigenschaftskennwerten der Mauersteine, des Mauermörtels, von Mauermörtel-Mauerstein-Verbundprüfkörpern und vom Mauerwerk angelegt. Leider fehlen bei vielen Untersuchungen wichtige Kennwerte. Aus diesem Grunde sind Einzelauswertungen nur mit einer jeweils mehr oder weniger stark eingegrenzten Anzahl von Versuchswerten möglich.

In den Tabellen 2 und 3 wurden Mauersteinarten, -sorten sowie Mörtelarten zu verschiedenen, sinnvoll erscheinenden Auswertegruppen zusammengefaßt, soweit ein Einfluß auf die Biegezugfestigkeit von Mauerwerk deutlich erkennbar war. In den Tabellen sind der Bereich der Mauersteinfestigkeiten für die Biegezugversuche, Mörtelart und Mörtelgruppen, die Art der Stoßfugenvermörtelung (vermörtelt oder unvermörtelt), die Anzahl der Versuchsserien und die Biegezugfestigkeitswerte angegeben. Eine Versuchsserie besteht aus in der Regel 3 bis 6 Einzelversuchen. Bei den Biegezugfestigkeitswerten enthalten die Tabellen den Bereich der Mittelwerte der verschiedenen Versuchsserien, den Mittelwert aus allen Versuchsserien, einen Biegezugfestigkeitswert als 70 %-Wert der Mittelwertes sowie den Wert für das 5 %-Quantil. Der Biegezugfestigkeitswert  $0,7 \bar{x}$  entspricht in etwa der Herleitung der charakteristischen Biegezugfestigkeit nach EN 1052-2 für eine Prüfkörperzahl bis zu 5. In der EN wird der Mittelwert durch 1,5 geteilt bzw. mit 0,67 multipliziert, um den charakteristischen Wert der Biegezugfestigkeit zu erhalten (s. Abschn. 2.3). Dieser wiederum stellt den 5 %-Quantil-Wert dar.

Der 5 %-Quantil-Wert wurde hier, wie auch in EN 1052-2, unter Zugrundelegung einer logarithmischen Normalverteilung errechnet. Die Verfahrensweise entspricht der in der EN. Der näherungsweise Ansatz von 70 % des Mittelwertes als charakteristische Festigkeit berücksichtigt die erfahrungsgemäß größere Streuung der Einzelwerte im Vergleich zur Druckfestigkeit von Mauerwerk, bei der der charakteristische Wert näherungsweise zu 80 % des Mittelwertes angesetzt wird.

Zusätzlich zu den Auswertergebnissen in den Tabellen 2 und 3 wurden mögliche Einflüsse auf die Biegezugfestigkeit und Zusammenhänge anderer Eigenschaftskennwerte zur Biegezugfestigkeit grafisch dargestellt.

## **5.2 Bewertung der Versuchsergebnisse, Folgerungen**

### **5.2.1 Allgemeines**

### **5.2.2 Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen (s. a. Tabelle 2 und Bilder 7 bis 10)**

#### **(1) Mauerziegel**

Für Mauerziegel und großformatige Hochlochziegel (Steinhöhe 238 mm) ergaben sich keine wesentlichen Unterschiede sowohl hinsichtlich Bereich der  $\beta_{BZ}$ -Werte als auch in Bezug auf Mittel- und Quantilwerte (s. Zeilen 1, 2, 4 der Tabelle 2). Auch für den Leichtmörtel LM 36 in Verbindung mit HLz unterschieden sich die Ergebnisse nicht eindeutig von denen für Normalmörtel. Dagegen sind die Biegezugfestigkeitswerte für kleinformatische Hochlochziegel (2 DF) deutlich größer. Möglicherweise ist das auf die insgesamt höhere Steinfestigkeit sowie wirksamere Mörteldorne - das Lochbild ist dafür bei den 2 DF-Steinen günstiger - zurückzuführen. Die Versagensart ist - soweit angegeben - unterschiedlich und zwar handelt es sich sowohl um Stein- als auch um Verbundversagen.

Wie das Bild 7 zeigt, nimmt die Biegezugfestigkeit in der Tendenz mit der Haftzugfestigkeit zwischen Mauerstein und Mauermörtel zu.

#### **(2) Kalksandsteine**

Innerhalb der beiden Auswertegruppen (s. Zeilen 5 und 6, Tabelle 2) ließ sich kein wesentlicher Einfluß von Steinsorte, Steindruckfestigkeit und Mörtelgruppe feststellen. Ein großer - erwartungsgemäßer - Unterschied ergab sich zwischen den Biegezugfestigkeitswerten für Normalmörtel und denen für Dünnbettmörtel. Letztere waren mehr als 2mal so groß wie bei Mauerwerk mit Normalmörtel.

Das Bild 8 zeigt ähnlich wie bei den Mauerziegeln, bei allerdings großer Streuung, einen tendenziellen Zusammenhang zwischen der Biegezugfestigkeit und der Haftzugfestigkeit.

### (3) Porenbetonsteine

Wie bei den Kalksandsteinen ist auch hier der Unterschied zwischen Porenbetonsteinen mit Normalmörtel und Dünnbettmörtel sehr groß. Wird der unerklärlich niedrige Versuchswert von  $0,10 \text{ N/mm}^2$  (s. Zeile 8, Tabelle 2) außer Betracht gelassen, so ist die Biegezugfestigkeit von Porenbetonmauerwerk mit Dünnbettmörtel 3mal so groß wie die mit Normalmörtel. Im Bild 9 ist wiederum ein Zusammenhang zwischen der Biegezugfestigkeit und der Haftzugfestigkeit zu erkennen.

### (4) Leichtbetonsteine

Unterschiede ergeben sich vor allem zwischen Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen mit Normalmörtel und Leichtmörtel LM 36. Die Werte für Leichtmörtel sind etwa nur halb so hoch wie die für Normalmörtel, wobei allerdings die unterschiedliche Anzahl der Versuchsserien zu beachten ist. Die Biegezugfestigkeitswerte für Dünnbettmörtel sind insgesamt etwas niedriger als die für Normalmörtel.

In den meisten Fällen wurde bei den Biegezugversuchen ein Versagen im Steinbereich festgestellt. Es ist anzunehmen, daß die Steifigkeit die Biegezugfestigkeit nicht unerheblich beeinflußt. Aus den Auswertergebnissen ist dies jedoch nicht eindeutig zu ermitteln.

Der Zusammenhang zwischen Biegezug- und Haftzugfestigkeit ist in Bild 10 dargestellt.

### (5) Betonsteine

Für Mauerwerk mit Betonsteinen lagen nur insgesamt 3 Versuchsserien mit einer Steifigkeitsklasse vor. Eine weitergehende Auswertung ist deshalb nicht möglich.

### 5.2.3 Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen (s. a. Tabelle 3 und Bilder 11 und 12)

#### (1) Mauerziegel

Bei allen Versuchen waren die Stoßfugen vermörtelt. Die Biegezugfestigkeitswerte unterscheiden sich zwischen Mauerwerk aus kleinformatigen HLz (2 DF) und den großformatigen Leichtziegeln (Steinhöhe 238 mm) sehr wesentlich. Im ersten Fall beträgt die mittlere Biegezugfestigkeit 1,12, im zweiten Fall nur 0,22 N/mm<sup>2</sup>. Möglicherweise ist die Ursache für die vergleichsweise geringe Biegezugfestigkeit der großformatigen Hochlochziegel (in der Regel Leichtziegel) die gegenüber den kleinformatigen HLz deutlich geringere Längsdruckfestigkeit sowie die niedrige Biegezugfestigkeit der Steine. Dies führt bei relativ hoher Mörtelfestigkeit in den Lagerfugen und der Wirkung von Mörteldornen in den Steinlochungen in den meisten Fällen zu einem Steinversagen in der Biegezug- oder Biegedruckzone des Mauerwerkprüfkörpers. Die Biegezugfestigkeitswerte für den Leichtmörtel LM 36 unterscheiden sich nicht grundsätzlich von denen für Normalmörtel MG IIa.

#### (2) Kalksandsteine

Bei Mauerwerk aus Kalksandsteinen beeinflußt erwartungsgemäß der Feuchtegehalt der Steine beim Vermauern die Biegezugfestigkeit sehr stark (s. auch Bild 11). Dies zeigt der Vergleich der Biegezugfestigkeitswerte der Zeilen 4 und 5 sowie der Zeilen 6 und 7 in der Tabelle 3. Die Kalksandsteine für die Versuchsreihen der Zeile 5 hatten einen wesentlich höheren Feuchtegehalt als die der Zeile 4. Dies trifft auch für die Versuchsserie der Zeile 7 gegenüber den Versuchsserien der Zeile 6 zu. Die Biegezugfestigkeitswerte vergrößern sich etwa auf das Doppelte, wenn der Feuchtegehalt der Kalksandsteine hoch ist.

Die Biegezugfestigkeitswerte für Mauerwerk mit Dünnbettmörtel sind etwas höher als die mit Normalmörtel, wobei der Wertebereich für das Dünnbettmauerwerk sehr viel enger ist als für das Mauerwerk mit Normalmörtel. Wie die Ergebnisse für die Versuchsserien in Zeile 8 der Tabelle 3 mit unvermörtelten Stoßfugen zeigen, ist offensichtlich ein Einfluß der Stoßfugen vorhanden - die Biegezugfestigkeit ist geringer wenn die Stoßfugen unvermörtelt bleiben. Der Unterschied liegt - bezogen auf die Mittelwerte - bei etwa 20 %; die Unterschiede bei den direkt vergleichbaren Versuchsserien betragen meist rd. 30 % und mehr.

### (3) Porenbetonsteine

Der Unterschied zwischen den Biegezugfestigkeitswerten von Porenbetonsteinmauerwerk mit Normmörtel und Dünnbettmörtel ist gering. Da für Mauerwerk mit unvermörtelten Stoßfugen nur eine Versuchsserie vorliegt, kann dieser Einfluß nicht beurteilt werden.

### (4) Leichtbetonsteine

Es liegen nur insgesamt 7 Versuchsserien vor. Innerhalb der Gruppen mit jeweils 3 Versuchsserien (Zeilen 13 und 14, Tabelle 3) ist die Steindruckfestigkeit praktisch gleichgroß. In allen Fällen trat Steinversagen auf. Die Biegezugfestigkeit wird somit stark von der Steindruckfestigkeit beeinflusst (s. a. Bild 12), was offensichtlich auf die hohe Verbundfestigkeit zwischen Mauerstein und Lagerfugenmörtel zurückzuführen ist. Da die vorliegenden Versuchsserien hinsichtlich der Steineigenschaften nicht vergleichbar sind, lassen sich auch keine Schlußfolgerungen über den Einfluß des Mauermörtels auf die Biegezugfestigkeit ziehen.

### (5) Betonsteine

Es liegen nur 3 Versuchsserien mit einer Steindruckfestigkeit vor. Die Biegezugfestigkeit ist mit im Mittel  $0,74 \text{ N/mm}^2$  vergleichsweise hoch. Die Ursache dafür dürfte in der relativ hohen Verbundfestigkeit (Haftscherfestigkeit) zwischen Mauerstein und Mauermörtel liegen.

## 5.2.4 Zusammenhang zwischen Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht und parallel zu den Lagerfugen

Zur Darstellung des Zusammenhanges wurde der Verhältniswert der Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht und parallel zu den Lagerfugen gebildet. Er wird im folgenden mit  $\alpha_{\text{BZ}}$  bezeichnet. In den Bildern 13 bis 16 ist dieser Verhältniswert in Abhängigkeit von der Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen dargestellt.

Wie aus den Bildern ersichtlich, ist die Streuung der  $\alpha_{\text{BZ}}$ -Werte im allgemeinen groß. Wegen der sehr großen Streuung des Verhältniswertes bei Mauerwerk aus Mauerziegeln (Bild 13) ist keine weitere Bewertung möglich. Die Streuung des Verhältniswertes nimmt in der Reihenfolge Kalksandstein-, Porenbetonstein-, Leichtbetonstein- und Betonsteinmauerwerk

ab (s. Bilder 14 bis 16). Bei Dünnbettmauerwerk aus Kalksandsteinen und Porenbetonsteinen und vermörtelten Stoßfugen liegt der Mittelwert von  $\alpha_{BZ}$  nahe bei 1 (0,82 für Kalksandstein - und 1,09 für Porenbeton-Dünnbettmauerwerk). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, daß sich Dünnbettmauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen - zumindest für die hier betrachteten Mauersteinarten - hinsichtlich der Biegezugfestigkeit für beide Beanspruchungsrichtungen in etwa gleich verhält. In den anderen Fällen beträgt  $\alpha_{BZ}$  im Mittel rd. 0,4 bis 0,6.

Bei Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen und Betonsteinen (10 Versuchsserien) ergab sich  $\alpha_{BZ}$  im Mittel zu 0,6 bei vergleichsweise geringer Streuung der Einzelwerte (0,42 bis 0,79).

## **6 VERGLEICH VON VERSUCHSMÄßIG UND RECHNERISCH ERMITTELTEN BIEGEZUGFESTIGKEITSWERTEN VON MAUERWERK**

### **6.1 Allgemeines**

Rechenansätze für die Ermittlung der Biegezugfestigkeit für Mauerwerk existieren nur für den Beanspruchungsfall parallel zu den Lagerfugen (s. dazu Abschn. 4). Für die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen bietet sich der grundsätzlich bestehende Zusammenhang zur Haftzugfestigkeit zwischen Mauerstein und Lagerfugenmörtel an. Dazu bedarf es jedoch noch weiterer ergänzender Untersuchungen, die auch die Auswahl des am besten geeigneten Haftzug-Prüfverfahrens betreffen. Gut geeignet erscheint dafür nach den bisherigen Erfahrungen die sogenannte BondWrench-Methode (s. dazu auch in /6/). Bei diesem Prüfverfahren wird eine ähnliche Beanspruchung wie beim Mauerwerk unter Biegung aufgebracht.

## 6.2 Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen

Voraussetzungen für einen Vergleich Versuchswerte-Rechenwerte sind:

- Es können nur diejenigen Versuchsreihen berücksichtigt werden, bei denen alle Eigenschaftswerte, die für die rechnerische Ermittlung notwendig sind, ermittelt wurden. Dies sind für die Fälle Mauerwerk mit unvermörtelten und vermörtelten Stoßfugen: die Steinzugfestigkeit (als Ersatz für die eigentlich zutreffendere Steinbiegezugfestigkeit) sowie die Haftscherfestigkeit.
- Für Mauerwerk mit unvermörtelten Stoßfugen werden die Gleichungen 1.1 und 1.2 (s. Abschn. 4) ohne Ansatz der Mörtelzugfestigkeit verwendet. Die Mörtelzugfestigkeit liegt nicht vor und es ist auch zudem nicht sicher, ob die Mörtelzugfestigkeit zusammen mit der Haftscherfestigkeit bzw. der Steinzugfestigkeit wirksam ist.
- Für Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen werden die Gleichungen 2.1 und 2.2 (s. Abschn. 4) verwendet. Den Vorschlägen in /2/ entsprechend werden in der Gleichung 2.2  $k = 0,5$  und  $\mu = 0,6$  angesetzt.

In den Bildern 17 bis 20 sind jeweils die berechneten ( $cal \beta_{BZ}$ ) und die versuchsmäßig ermittelten ( $obs \beta_{BZ}$ ) Biegezugfestigkeitswerte vergleichend gegenübergestellt. Wie aus den Bildern ersichtlich, ist die Übereinstimmung zwischen den rechnerisch und versuchsmäßig ermittelten Biegezugfestigkeitswerten nicht zufriedenstellend. Die Abweichungen von der 45°-Gerade sind meist sehr groß, zum Teil ergeben sich signifikante Unterschiede, die nur auf einen notwendigen Anpassungsbedarf der Rechenansätze zurückgeführt werden können. Dieser ist auch - wie bereits in Abschn. 4 ausgeführt - durch die Unterschiede zwischen der Scherbeanspruchung im Mauerwerk und bei der Prüfung der Haftscherfestigkeit sowie im unsicheren Ansatz einer Haftscherfestigkeit im Stoßfugenbereich begründet. Eine Scherkraftübertragung in der Stoßfuge erscheint - abgesehen von mit Dünnbettmörtel ausgeführten Stoßfugen - zweifelhaft, weil die Vermörtelung in der Regel nicht vollflächig erfolgt und ein Haftverbund durch das Schwinden des Mörtels beeinträchtigt wird.

Es wurde deshalb für einen weiteren Vergleich Versuchswerte - Rechenwerte bei Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen der Wert  $k = 0$  gesetzt und der Wert  $\beta_{Hs}$  mit einem Faktor  $a$  versehen. Dieser Faktor soll die Unterschiede bei der Scherbeanspruchung (s. vorherige Ausführungen) berücksichtigen.

Die ermittelten  $a$ -Werte streuten bei Mauerwerk aus Mauerziegeln und Kalksandsteinen mit Normal- und Leichtmörtel außerordentlich stark. Eine brauchbare Aussage ergab sich nicht.

Bei Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen mit Normal- und Leichtmörtel lagen die a-Werte bei insgesamt 7 Versuchsserien in einem relativ engem Bereich von 0,35 bis 0,52, im Mittel bei 0,44. Das bedeutet, daß in diesen Fällen mit dem errechneten a-Wert die Biegezugfestigkeit mit einer Genauigkeit von  $\pm 20 \%$  errechnet werden kann.

Bei Mauerwerk aus Porenbeton-Blocksteinen mit Normalmörtel wurde der a-Wert - bei allerdings nur 4 Versuchsserien - im Mittel zu 0,94 (Wertebereich: 0,82 bis 1,05) ermittelt. Bei diesem Mauerwerk scheint somit der Ansatz der Haftscherfestigkeitswerte zu ausreichend zutreffenden rechnerischen Biegezugfestigkeitswerten zu führen.

Bei Dünnbettmauerwerk aus Kalksandsteinen (8 Versuchsserien) wurde der a-Wert im Mittel zu 0,64 (Wertebereich: 0,45 bis 0,87) bestimmt. Möglicherweise ist dieser deutlich unter 1 liegende Mittelwert darauf zurückzuführen, daß eine Haftscherfestigkeit im Stoßfugenbereich nicht angesetzt wurde.

Bei den 3 Versuchsserien für Mauerwerk aus Betonsteinen und Normalmörtel ergab sich der a-Wert im Mittel zu 1,86. Offensichtlich ist hier die Scherfestigkeit des Mauerwerks bei Biegebeanspruchung wesentlich höher als die bei der Haftscherfestigkeitsprüfung ermittelte.

Die Auswertergebnisse zeigen, daß der vereinfachende Ansatz eines modifizierten Haftscherfestigkeitswertes im allgemeinen nicht zu einer zufriedenstellenden rechnerischen Ermittlung der Biegezugfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen führt. Bei bestimmten Mauerstein-Mauermörtel-Kombinationen ergeben sich aus dem a-Wert wertvolle Hinweise auf zusätzliche Einflüsse und Ursachen für die Unterschiede zwischen rechnerisch und versuchsmäßig bestimmten Biegezugfestigkeitswerten. Für eine rechnerische Bestimmung der Biegezugfestigkeit von Mauerwerk besteht jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf.



## 7 VORSCHLÄGE FÜR DIE FESTLEGUNG VON CHARAKTERISTISCHEN BIEGEZUGFESTIGKEITSWERTEN

### 7.1 Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen

Nach den Auswerteergebnissen in der Tabelle 2 und in Bild 21 ergibt sich bei den Biegezugfestigkeitswerten ein grundsätzlicher Unterschied zwischen Mauerwerk mit Normal- und Leichtmörtel sowie Mauerwerk mit Dünnbettmörtel. Wie aus der Tabelle 2 ersichtlich, betragen die 5 %-Quantil-Werte für Dünnbettmauerwerk aus Kalksandsteinen, aus Porenbetonsteinen (wenn der unerklärlich niedrige Wert von 0,10 N/mm<sup>2</sup> außer Betracht gelassen wird) und aus Leichtbetonsteinen 0,18 N/mm<sup>2</sup>. Der Mittelwert der Biegezugfestigkeit ist in allen 3 Fällen etwa doppelt so hoch wie der 5 %-Quantil-Wert.

Bei Mauerwerk mit Normal- und Leichtmörtel ergeben sich im allgemeinen sehr niedrige 5 %-Quantil-Werte, die in der Größenordnung von 1/5 bis 1/3 - in einem Falle sogar noch darunter - des jeweiligen Mittelwertes liegen. Dies ist auf die i. d. R. sehr großen Streuungen der Mittelwerte der verschiedenen Versuchsserien zurückzuführen.

Insgesamt betrachtet erscheinen folgende charakteristische Biegezugfestigkeitswerte vertretbar:

- Mauerwerk mit Normal- und Leichtmörtel

$$\beta_{\text{BZ},s (5\%)} = 0,05 \text{ N/mm}^2$$

- Mauerwerk mit Dünnbettmörtel

$$\beta_{\text{BZ},s (5\%)} = 0,15 \text{ N/mm}^2$$

Es wäre auch ein Wert von 0,20 N/mm<sup>2</sup> ansetzbar. Zu beachten ist, daß für Mauerwerk aus Mauerziegeln und Dünnbettmörtel noch keine Biegezugfestigkeitswerte vorliegen.

Wesentliche Voraussetzung für den Ansatz einer Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen ist die sachgerechte Ausführung des Mauerwerks nach DIN 1053-1, d. h. vor allem das vollflächige und vollfugige Vermörteln der Lagerfugen und die ggf. erforderliche Vorbehandlung der Mauersteine (vornässen) bzw. das Nachbehandeln des frischen Mauerwerks (s. a. Abschn. 3.3).

## 7.2 Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen

Die Festlegung von charakteristischen Biegezugfestigkeitswerten ist, wie die Auswertergebnisse in Bild 22 und Tabelle 3 zeigen, schwierig. Wird nicht nach Mauerstein- und Mörtelarten unterschieden, so kann nach den Auswertergebnissen für Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen einheitlich ein charakteristischer Wert der Biegezugfestigkeit von

- $\beta_{BZ,p (5\%)} = 0,10 \text{ N/mm}^2$

angesetzt werden.

Höhere Werte wären nach den Auswertergebnissen für Mauerwerk aus kleinformatischen Voll- und Hochlochziegeln sowie für Dünnbettmauerwerk mit Kalksandsteinen möglich. Für Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen könnte für beide Fälle die charakteristische Biegezugfestigkeit zu

- $\beta_{BZ,p (5\%)} = 0,30 \text{ N/mm}^2$

angesetzt werden. Für Kalksandsteinmauerwerk mit Dünnbettmörtel und unvermörtelten Stoßfugen ergäbe sich

- $\beta_{BZ,p (5\%)} = 0,20 \text{ N/mm}^2$ .

## 8 ZUSAMMENFASSUNG, AUSBLICK

Im Rahmen einer umfangreichen Auswertung wurden alle vorliegenden Untersuchungsergebnisse zur Biegezugfestigkeit von Mauerwerk an kleinen Mauerwerkswänden - entsprechend EN 1052-2 - bei Beanspruchung senkrecht und parallel zu den Lagerfugen erfaßt. Zusätzlich zu den Biegezugfestigkeitswerten wurden auch alle wichtigen Eigenschaftswerte der Mauersteine und der Mauermörtel in eine besondere Datenbank aufgenommen. Es handelte sich um insgesamt 93 Versuchsserien für die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen und 77 Versuchsserien für die Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen mit jeweils 3 bis 6 Einzelwerten.

Die Versuchsserien wurden nach Steinarten, Steinsorten und Mörtelgruppen zusammengefaßt, soweit innerhalb einer solchen Gruppierung keine weiteren Einflüsse auf die Biegezugfestigkeit erkennbar waren. Angegeben wurden der Bereich der Biegezugfestigkeitswerte, der Mittelwert für die jeweilig in Betracht gezogenen Versuchsserien sowie die charakteristische Biegezugfestigkeit als 70 % vom Mittelwert (Verfahrensweise in etwa nach EN 052-2) sowie der 5 %-Quantil-Wert unter Bezug auf eine logarithmische Normalerteilung. Die wesentlichen Einflüsse, die sich auf Grund der Auswertung auf die Biegezugfestigkeit ergaben, wurden beschrieben und - soweit möglich - grafisch dargestellt.

Unter Bezug auf die Auswertergebnisse werden Zahlenwerte für charakteristische Biegezugfestigkeiten vorgeschlagen. Die Benutzung solcher charakteristischer Biegezugfestigkeitswerte für die Bemessung von Mauerwerkbauteilen unter Biegebeanspruchung bedarf jedoch noch entsprechender Untersuchungen und Abklärungen.

Zu beachten ist, daß nach der Verfahrensweise in DIN V ENV 1996-1-1 die Biegezugfestigkeit von Mauerwerk aus der charakteristischen Festigkeit, abgeleitet aus Versuchen nach prEN 1052-2, zugrunde gelegt wird. Das bedeutet, daß im Einzelfall unter Bezug auf 5 Versuche an kleinen Mauerwerkswänden die charakteristische Biegezugfestigkeit zu 70 % des Mittelwertes angesetzt wird. Nach dem Nationalen Anwendungsdokument - als Voraussetzung für die Anwendbarkeit der DIN V ENV in Deutschland - ist die charakteristische Biegezugfestigkeit allerdings aus besonderen Versuchen oder nach DIN 1053-1 (Fassung 1996) herzuleiten. Unabhängig davon erscheinen Vergleichsrechnungen zwischen DIN V ENV und DIN 1053-1 unter Berücksichtigung der vorliegenden deutschen Auswertergebnisse in Hinblick auf eine zukünftige EN 1996 dringend erforderlich.

Versuche könnten vermieden, zumindest aber im Umfang stark eingeschränkt werden, wenn es gelänge, die Biegezugfestigkeit von Mauerwerk rechnerisch herzuleiten. Mann hat in /4/ dazu für die Beanspruchung parallel zu den Lagerfugen theoretisch fundierte Rechensätze hergeleitet. Für den Versagensfall Überschreiten der Verbundfestigkeit zwischen Mauerstein und Mauer Mörtel wird - mangels zutreffender Angaben bzw. Eigenschaftswerte - die nach DIN 18 555-5 ermittelte Haftscherfestigkeit für den Lagerfugenbereich und eine im Stoßfugenbereich abgeminderte Haftscherfestigkeit angesetzt. Der Vergleich der nach /4/ rechnerisch ermittelten Biegezugfestigkeitswerte mit den Versuchswerten ergab im allgemeinen keine zufriedenstellende Übereinstimmung. Durch Verzicht auf den Ansatz einer Haftscherfestigkeit im Stoßfugenbereich und Anpassung der Haftscherfestigkeit im Lagerfugenbereich mittels eines Faktors konnte zwar in einigen wenigen Fällen eine bessere Überein-

stimmung mit den Versuchswerten erzielt werden, eine ausreichend genaue rechnerische Ermittlung der Biegezugfestigkeit war jedoch grundsätzlich nicht möglich. Hinsichtlich der rechnerischen Ermittlung der Biegezugfestigkeit von Mauerwerk besteht somit noch erheblicher Forschungsbedarf.

## 9 LITERATUR

### Teil 1: Allgemeine Literatur

- /1/ DIN V ENV 1996-1-1 (Vornorm) 12.96: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln; Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk; Deutsche Fassung ENV 1996-1-1:1995
- /2/ prEN 1052-2: Prüfverfahren für Mauerwerk - Bestimmung der Biegezugfestigkeit. Fassung zur EN vom Januar 1996.
- /3/ Schubert, P.: Biegezugfestigkeit von Mauerwerk - Untersuchungsergebnisse an kleinen Wandprüfkörpern. Berlin : Ernst & Sohn. - In: Mauerwerk-Kalender 22 (1997), S. 611-626, 628
- /4/ Mann, W.: Zug- und Biegezugfestigkeit von Mauerwerk - theoretische Grundlagen und Vergleich mit Versuchsergebnissen. Verlag Ernst & Sohn, Berlin. - In: Mauerwerk-Kalender 17 (1992), S. 601-607
- /5/ Schubert, P.: Zur rißfreien Wandlänge von nichttragenden Mauerwerkswänden. Berlin: Ernst & Sohn - In: Mauerwerk-Kalender 13 (1988), S. 473-488
- /6/ Reunion Internationale des Laboratoires D'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions. Test of small wall specimens: determination of the bond strength using the bond wrench method. RILEM TC 79-LUM, B. 401.88, 1988.

Teil 2: Quellen der Untersuchungsberichte zu den Tabellen 2 und 3

- /1/ Schubert, P. ; Meyer, U.: Biegezug- und Zugtragfähigkeit von unbewehrtem und bewehrtem Kalksandstein-Mauerwerk. Aachen : Institut für Bauforschung, 1995. - Forschungsbericht Nr. F 417
- /2/ Schubert, P. ; Metzemacher, H.: Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht und parallel zur Lagerfuge. Aachen : Institut für Bauforschung, 1987. - Forschungsbericht Nr. F 275
- /3/ Schubert, P. ; Meyer, U.: Biegezugfestigkeit von Mauerwerk aus Hochlochziegeln. Aachen : Institut für Bauforschung, 1992. - Prüfbericht Nr. A 2387
- /4/ Richtwerte der Biegezugfestigkeit von Mauerwerk als Beitrag zur Baukostendämpfung. Institut für Ziegelforschung. Schlußbericht Forschungsprojekt BMBau, 1985
- /5/ Schubert, P. ; Metzemacher, H.: Biegezugfestigkeit von Mauerwerk aus Kalksandplansteinen und Dünnbettmörtel, Aachen : Institut für Bauforschung, 1990. - Prüfbericht Nr. A 1939
- /6/ Untersuchung der Flächentragwirkung bei geschoß- bzw. abschnittsweiser Verankerung von Vormauerschalen im Gebrauchs- und Bruchzustand. Institut für Ziegelforschung, Schlußbericht, AIF-Nr.: 7023
- /7/ Schwartz, J.: Mauermörtel/Mauerwerk, Grundlagenforschung, Versuchsbericht. Zürich : Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, 1992.- Sia-Dokumentation Nr. D 089 der SIA Kommission SIA 177/178-Mauerwerk
- /8/ Biegezugfestigkeit von Mauerwerk aus Porenbetonsteinen. Versuchsergebnisse Ytong, 1990.
- /9/ Prüfung der Biegetragfähigkeit von Porenbeton-Mauerwerk. AMPA Hannover, 1995. Prüfzeugnis-Nr. 562/95
- /10/ Anstötz, W.: Zur Ermittlung der Biegetragfähigkeit von Kalksand-Plansteinmauerwerk. Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung. - In: Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover (1990), Nr. 61 (Dissertation)

- /11/ Schubert, P. ; Meyer, U.: Biegeversuche an bewehrtem Porenbeton-Mauerwerk. Aachen : Institut für Bauforschung, 1996. - Prüfbericht Nr. A 2950
- /12/ Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen mit Dünnbettmörtel - Einfluß auf Tragfähigkeit und Wärmedämmung. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt Neuwied, Neuwied, 1988, Untersuchungsbericht Nr. 6558

**Tabelle 1:** Verwendete Kurzzeichen - Einheit, Bedeutung

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung
1	2	3
d	mm	Wanddicke, Prüfkörperdicke
$d_F$	mm	Dicke der Mörtellagerfuge
$h_{st}$	mm	Höhe Mauerstein
n	-	Anzahl der Versuchswerte
$n_v$	-	Anzahl der Versuchsserien
SF		Stoßfugenausführung
uv	-	unvermörtelt
vm		vermörtelt
ü	mm	Überbindemaß
$\bar{x}$	verschieden	Mittelwert
$x_{5\%}$	verschieden	5 %-Quantil, Aussagesicherheit S = 90 %
$\beta_{BZ,s}, \beta_{BZ,p}$	N/mm <sup>2</sup>	Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht, parallel zu den Lagerfugen
$\beta_{D,st}$	N/mm <sup>2</sup>	Steindruckfestigkeit nach Norm
$\beta_{HS}$	N/mm <sup>2</sup>	Haftscherfestigkeit Mörtel/Stein
$\beta_{HZ}$	N/mm <sup>2</sup>	Haftzugfestigkeit Mörtel/Stein
$\beta_{Z,mö}$	N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit Mörtel
$\beta_{Z,st}$	N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit der Mauersteine in Steinlängsrichtung
$\mu$	-	Reibungsbeiwert

**Tabelle 2:** Biegezugfestigkeit von Mauerwerk *senkrecht* zu den Lagerfugen  
 Zusammengefaßte Versuchs- und Auswertergebnisse  
 Kurzzeichen s. Tabelle 1

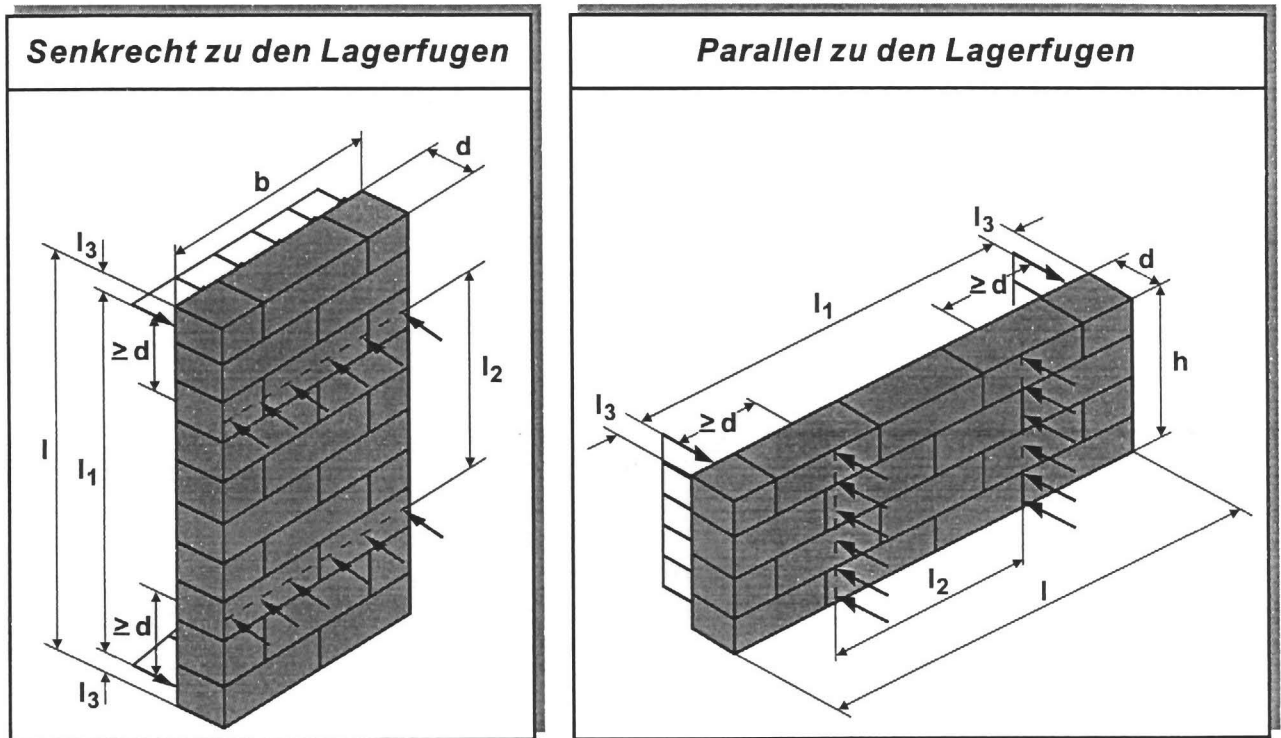
Zeile	Mauersteine		Mauermörtel	Mauerwerk					
	Art, Sorte	$\beta_{D,st}$ N/mm <sup>2</sup>		SF	$n_v$	$\beta_{BZ,s}$	$\bar{X}$	$0,7 \bar{X}$	$\bar{X}_{\%}$
						N/mm <sup>2</sup>			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Mauerziegel	30 ... 34 (79)	NM IIa ... IIIa	vm	13	0,11 ... 50 (0,74)	0,27	0,19	0,09
	Mz								
2		30 ... 34			12	0,11 ... 0,50	0,23	0,16	0,10
3	HLz (2DF)	25 ... 65	NM IIa, III	vm	8	0,19 ... 1,16	0,58	0,41	0,15
4	HLz ( $h_{st} = 238$ )	10 ... 16	NM IIa, III, LM 36	vm	8	0,07 ... 0,52	0,27	0,19	0,07
5	Kalksandsteine	18 ... 32	NM IIa ... IIIa	vm	18	0,04 ... 0,37	0,17	0,12	0,04
	KS, KS L								
6	KS, KS L, KSPE	11 ... 43	DM	vm/ um	11	0,19 ... 0,73	0,44	0,30	0,18
7	Porenbetonsteine	4 ... 10	NM IIa, III	vm	6	0,03 ... 0,33	0,12	0,08	0,01
	PB								
8					7	0,10 ... 0,57	0,33	0,23	0,09
9	PP	3 ... 10	DM	vm	6	0,25 ... 0,57	0,36	0,25	0,18
10	Leichtbetonsteine	2,5 ... 23	NM IIa, III	vm	14	0,09 ... 0,88	0,46	0,32	0,11
	V, Vbl, Hbl								
11	Vbl, Hbl	$\approx 3$	LM 36	vm	3	0,14 ... 0,30	0,20	0,14	-
12	Vbl, Hbl	2,5 ... 7	DM	vm	5	0,22 ... 0,44	0,33	0,22	0,18
13	Betonsteine	16	NM IIa, III	vm	3	0,34 ... 0,48	0,42	0,30	-
	Hbn								



**Tabelle 3:** Biegezugfestigkeit von Mauerwerk *parallel* zu den Lagerfugen  
 Zusammengefaßte Versuchs- und Auswertergebnisse  
 Kurzzeichen s. Tabelle 1

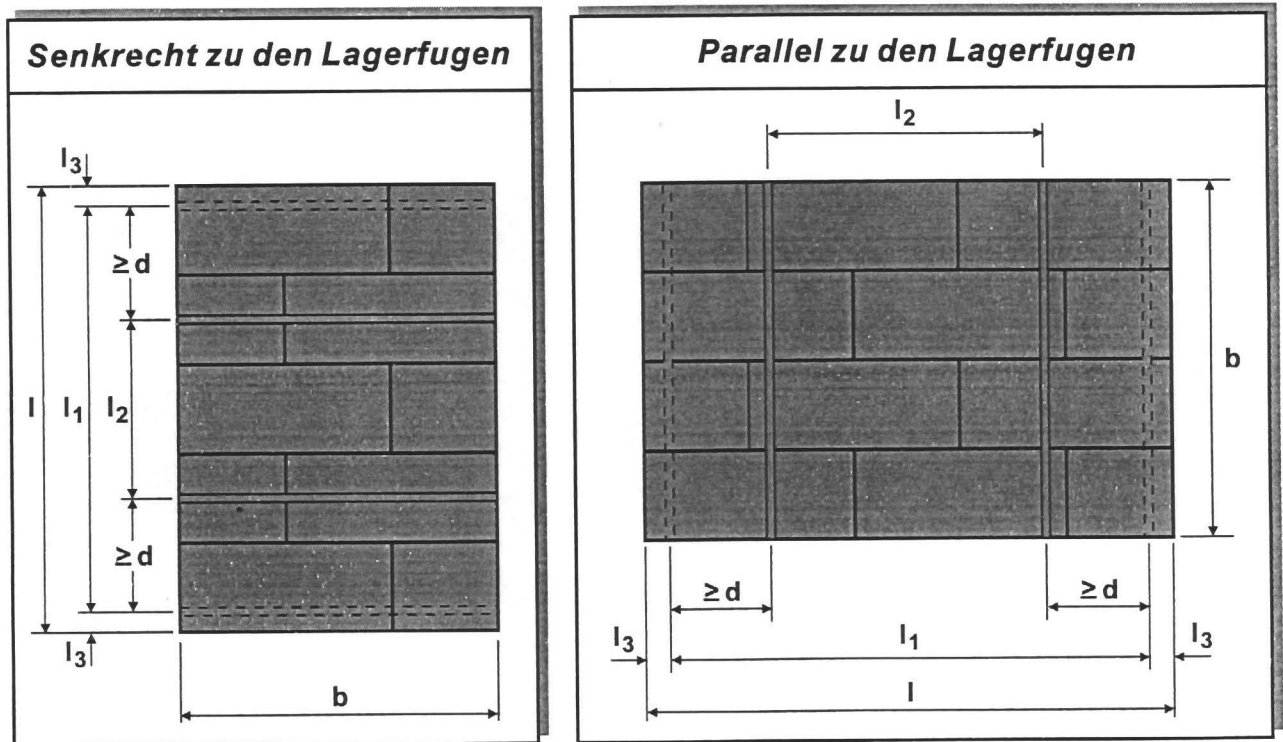
Zeile	Mauersteine		Mauermörtel	Mauerwerk																															
	Art. Sorte	$\beta_{D,St}$ N/mm <sup>2</sup>		SF	n <sub>v</sub>	$\beta_{BZ,p}$	$\bar{X}$	0,7 $\bar{X}$	$\bar{X}_{5\%}$																										
										N/mm <sup>2</sup>																									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																										
1	Mauerziegel	79	NM IIa	vm	1	1,78	-	-	-																										
	Mz																																		
2	HLz (2DF)	25 ... 65	NM IIa, III	vm	8	0,54 ... 2,18	1,12	0,78	0,33																										
3	Hz (h <sub>st</sub> = 238)	10 ... 16	NM IIa, III, LM 36	vm	8	0,11 ... 0,38	0,22	0,15	0,09																										
4	Kalksandsteine	18 ... 40	NM IIa ... III	vm	10 <sup>1)</sup>	0,10 ... 0,58	0,41	0,29	0,14																										
										KS, KS L	27 ... 31	NM IIa ... III	vm	4 <sup>2)</sup>	0,89 ... 1,11	1,00	0,70	-																	
																			KS, KS L,	18 ... 32	DM	vm	8 <sup>3)</sup>	0,45 ... 0,69	0,52	0,36	0,39								
																												KS, KS L,	37	DM	vm	1 <sup>4)</sup>	1,14	-	-
9	Porenbetonsteine	3,6 ... 10	NM IIa, III	vm	6	0,17 ... 0,42	0,26	0,18	0,10																										
10										PP	2,8 ... 10	DM	vm	7	0,17 ... 0,61	0,33	0,23	0,12																	
11																			5,8	DM	um	1	0,22	-	-										
12	Leichtbetonsteine	4,8	NM IIa	vm	1	0,53	-	-	-																										
										V	23	NM IIa, III	vm	3	0,91 ... 1,32	1,11	0,78	-																	
																			Hbl, Vbl	3,4 ... 3,6	LM 36	vm	3	0,28 ... 0,46	0,35	0,24	-								
15	Betonsteine	16	NM IIa, III	vm	3	0,73 ... 0,76	0,74	0,52	-																										
										Hbn																									

- 1) Feuchtegehalt der Mauersteine: 1,5 bis 3,9 M.-%  
 2) Feuchtegehalt der Mauersteine: 8,2 bis 14,0 M.-%  
 3) Feuchtegehalt der Mauersteine: 3,2 bis 3,9 M.-%  
 4) Feuchtegehalt der Mauersteine: 6,8 M.-%



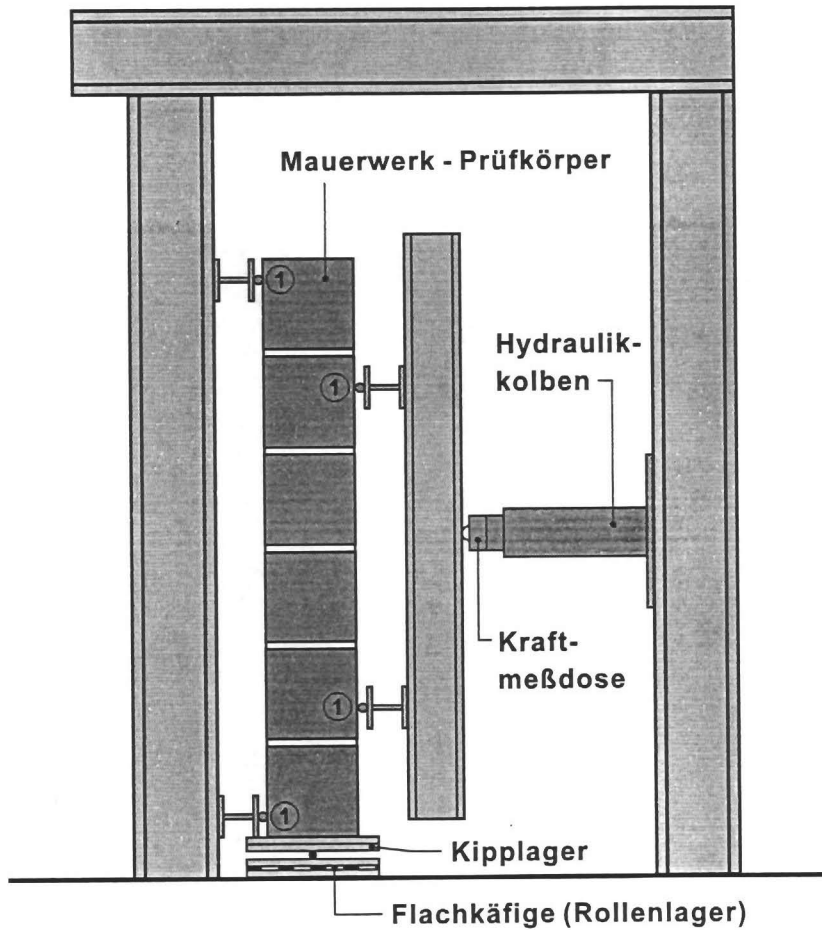
L91-1038/Sb/MK

**Bild 1:** Prüfung der Biegezugfestigkeit von Mauerwerk nach EN 1052-2 /2/



L91-1039/Sb/MK

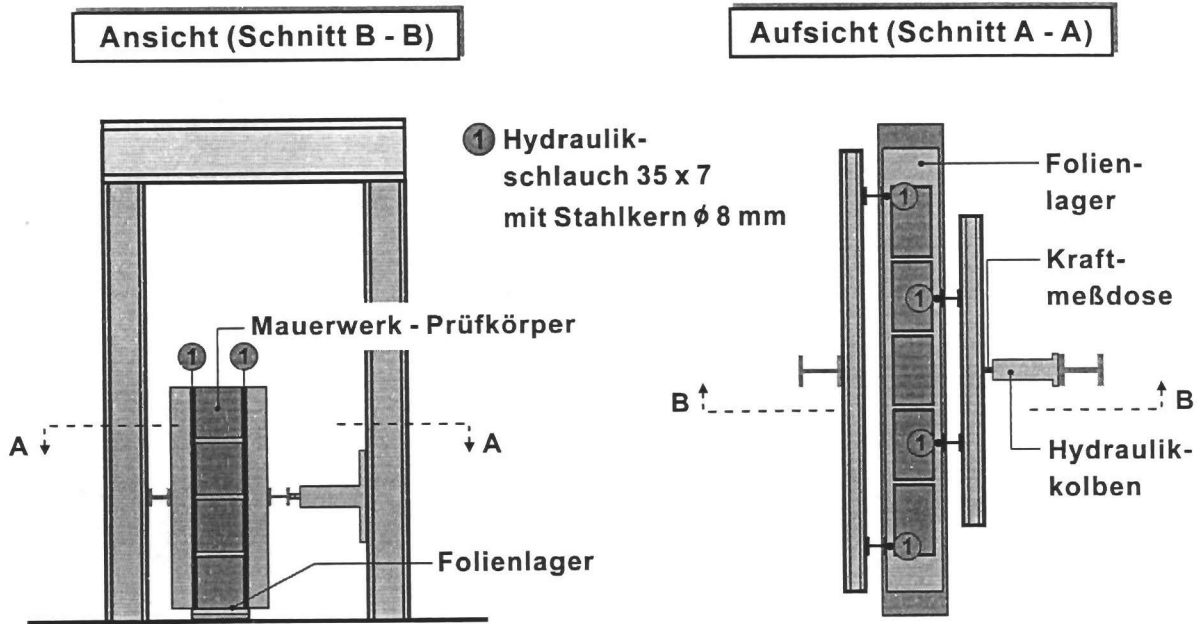
**Bild 2:** Prüfung der Biegezugfestigkeit von Mauerwerk nach EN 1052-2 /2/



① Hydraulikschlauch 35 x 7 mit Stahlkern  $\phi$  8 mm

L91-1034/Sb/MK

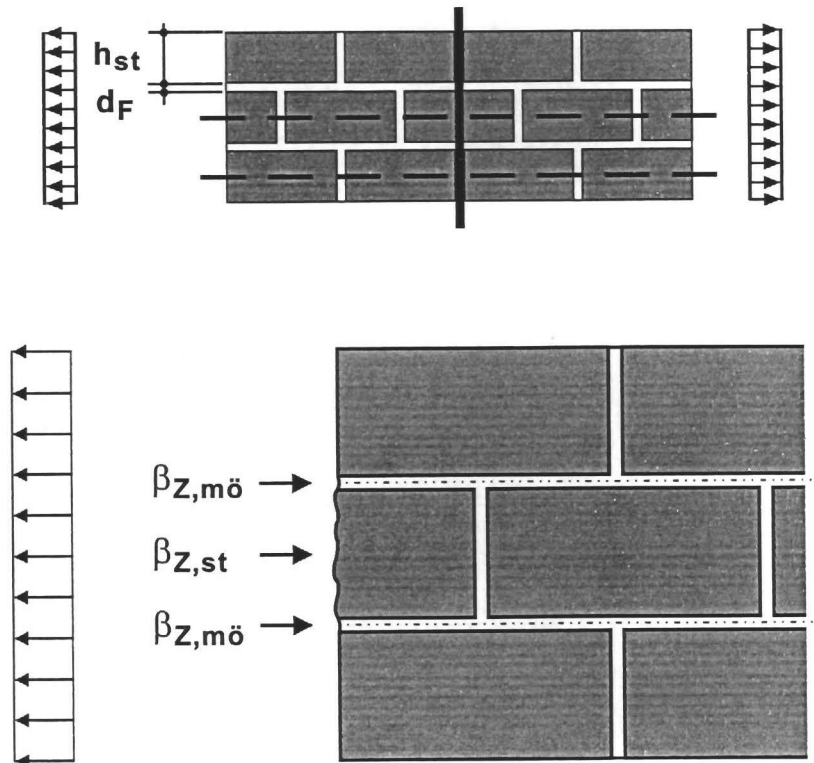
**Bild 3:** ibac-Prüfvorrichtung zur Prüfung der Biegezugfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen



L91-1037/Sb/MK

**Bild 4:** ibac-Prüfvorrichtung zur Prüfung der Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht zu den Lagerfugen

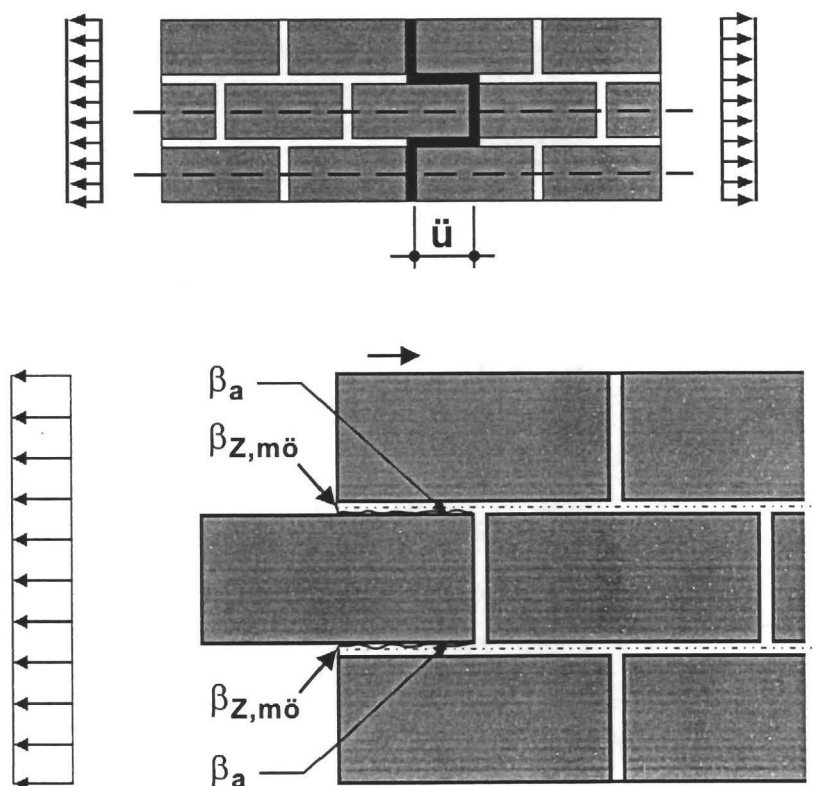
**Versagensfall 1:  
Überschreiten der Steinzug- (Mörtelzug-)  
festigkeit  $\beta_{Z,st}$  ( $\beta_{Z,mö}$ )**



L91-1042/Sb/MK

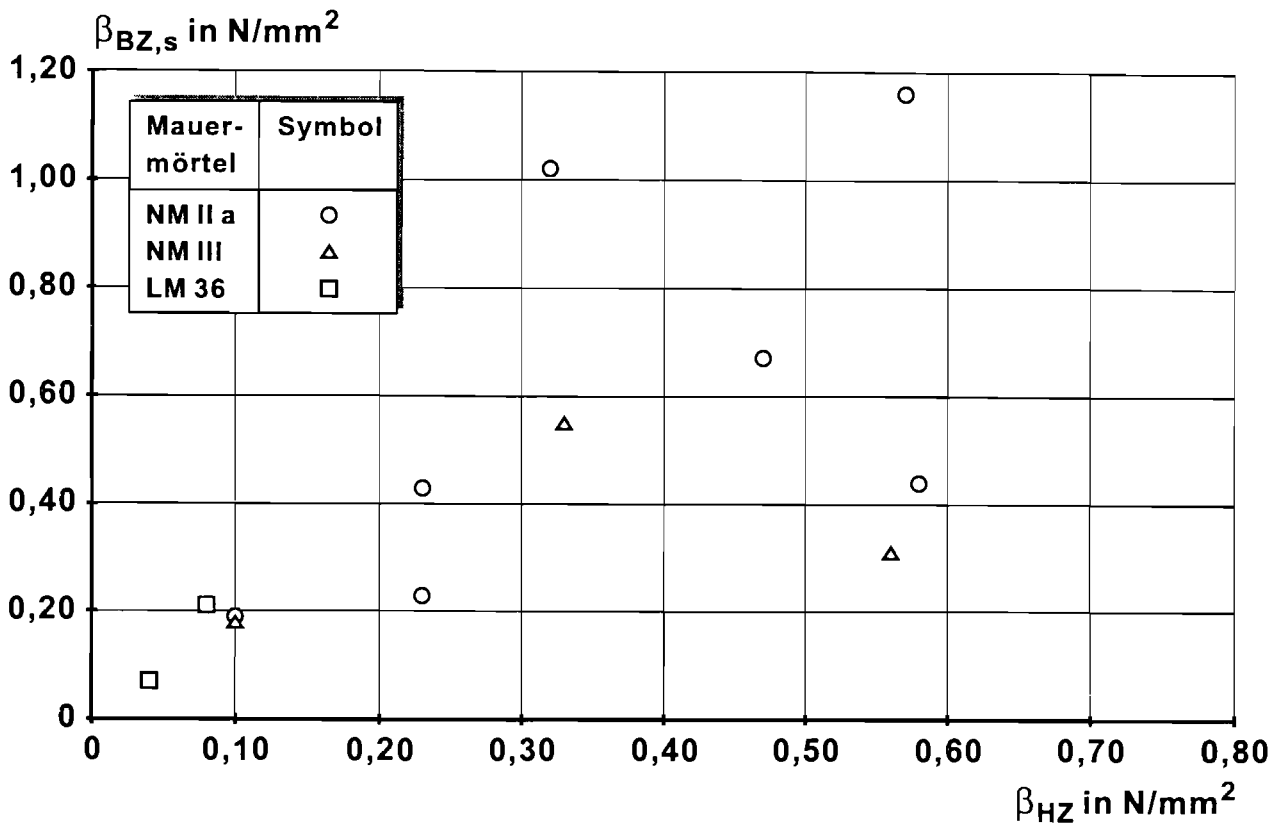
**Bild 5:** Zugfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen-Versagensfall 1

**Versagensfall 2:  
Überschreiten der Scherfestigkeit zwischen  
Mauerstein und Mauermörtel  $\beta_a$   
(und der Mörtelzugfestigkeit  $\beta_{Z,mö}$ )**



L91-1043/Sb/MK

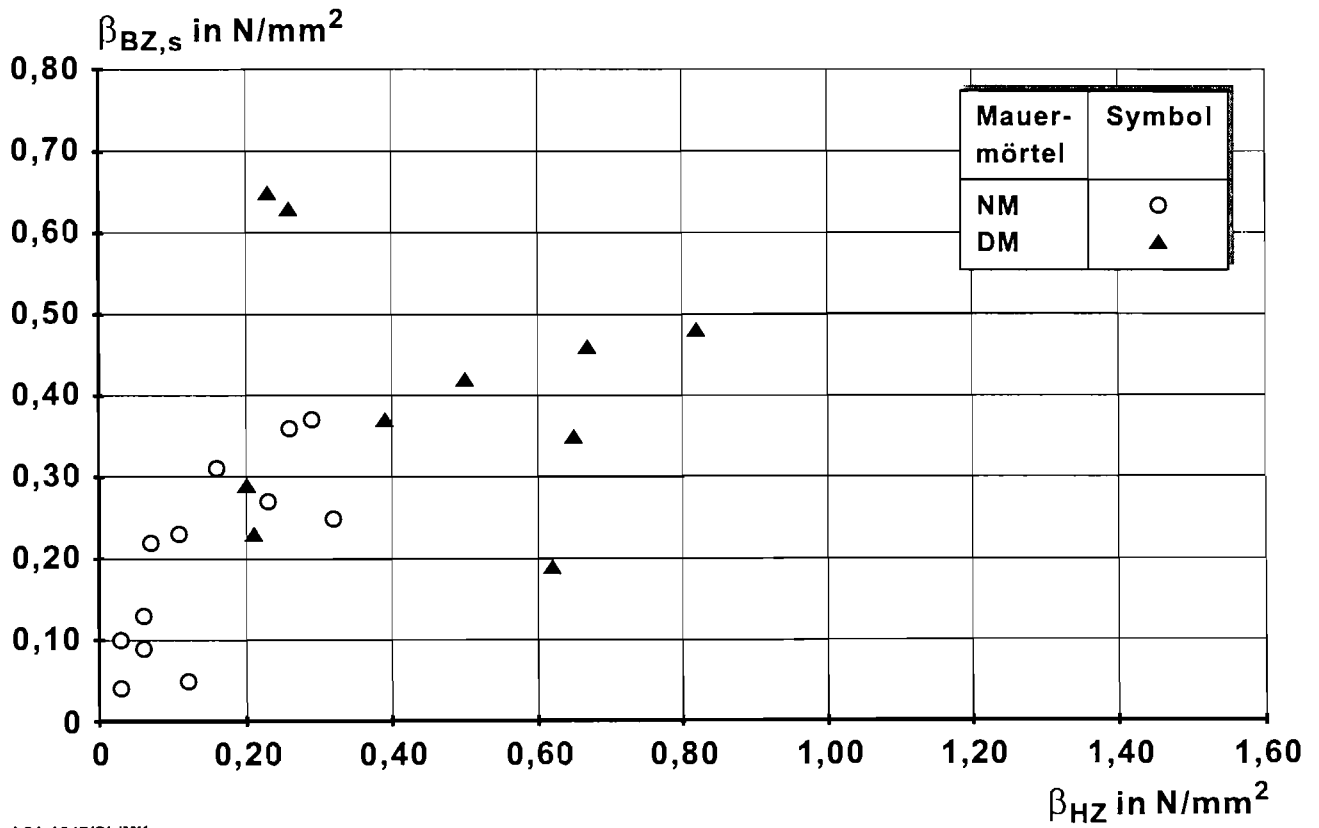
**Bild 6:** Zugfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen-Versagensfall 2



L91-1046/Sb/MK

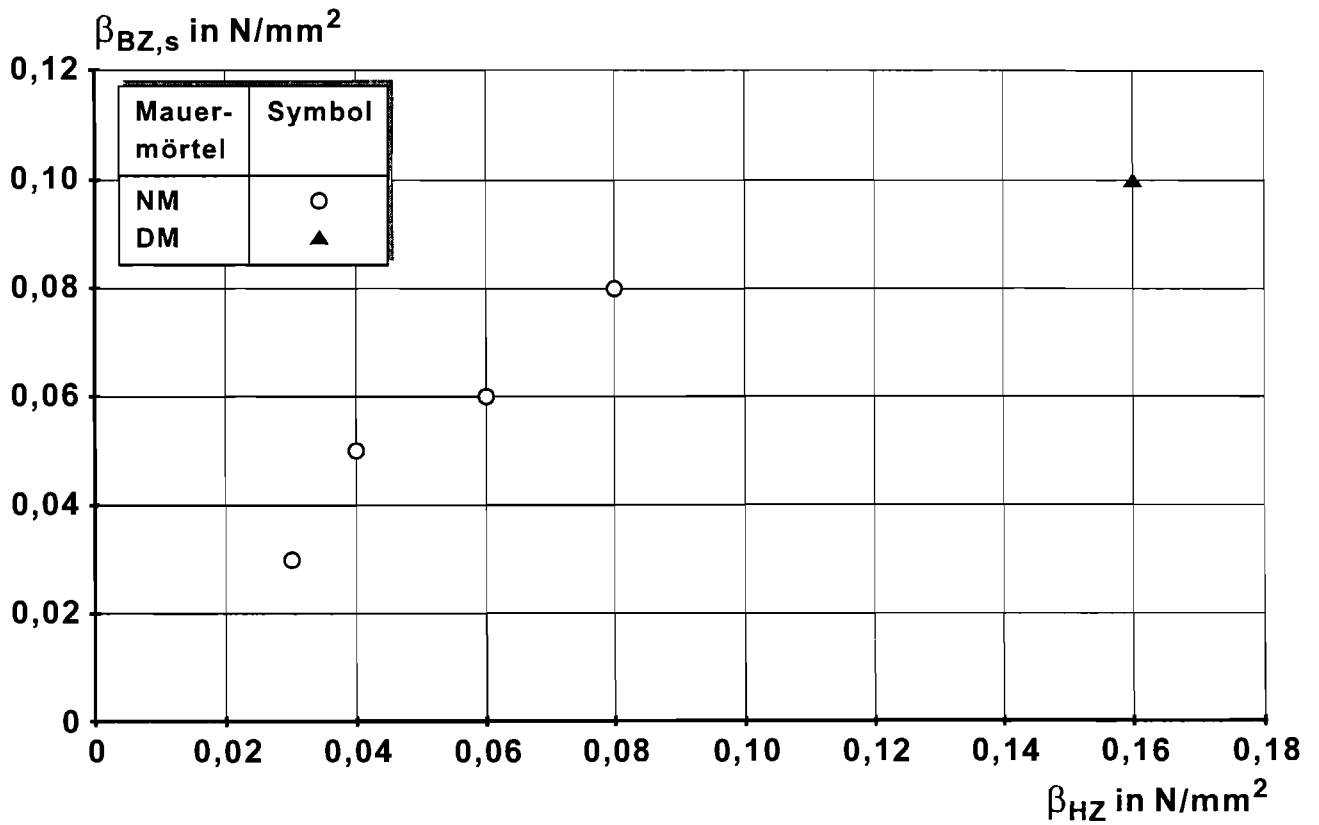
**Bild 7:** Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht zu den Lagerfugen  $\beta_{BZ,s}$  in Abhängigkeit von der Haftzugfestigkeit  $\beta_{HZ}$   
Mauerwerk aus Hochlochziegeln





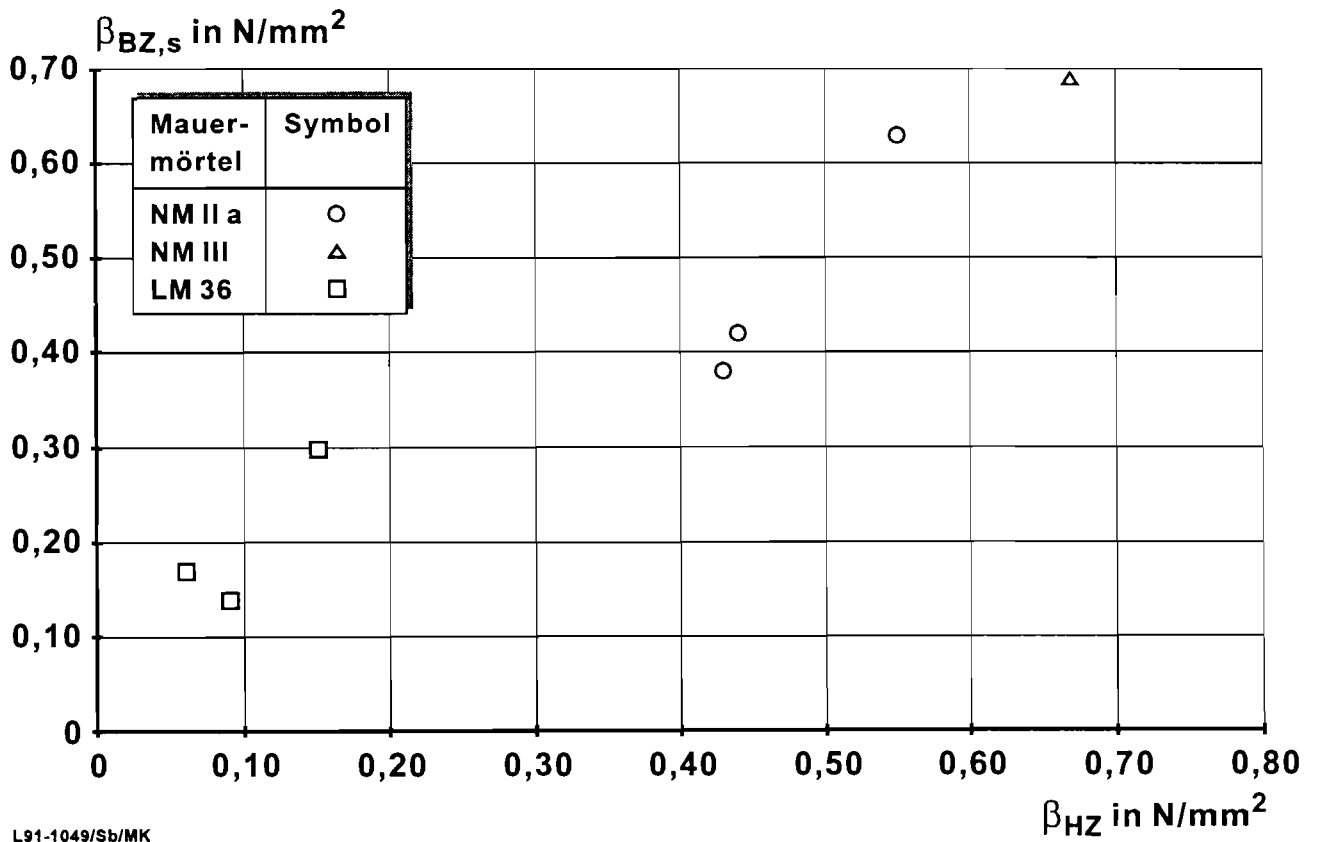
L91-1047/Sb/MK

**Bild 8:** Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht zu den Lagerfugen  $\beta_{BZ,s}$  in Abhängigkeit von der Haftzugfestigkeit  $\beta_{HZ}$   
Mauerwerk aus Kalksandsteinen



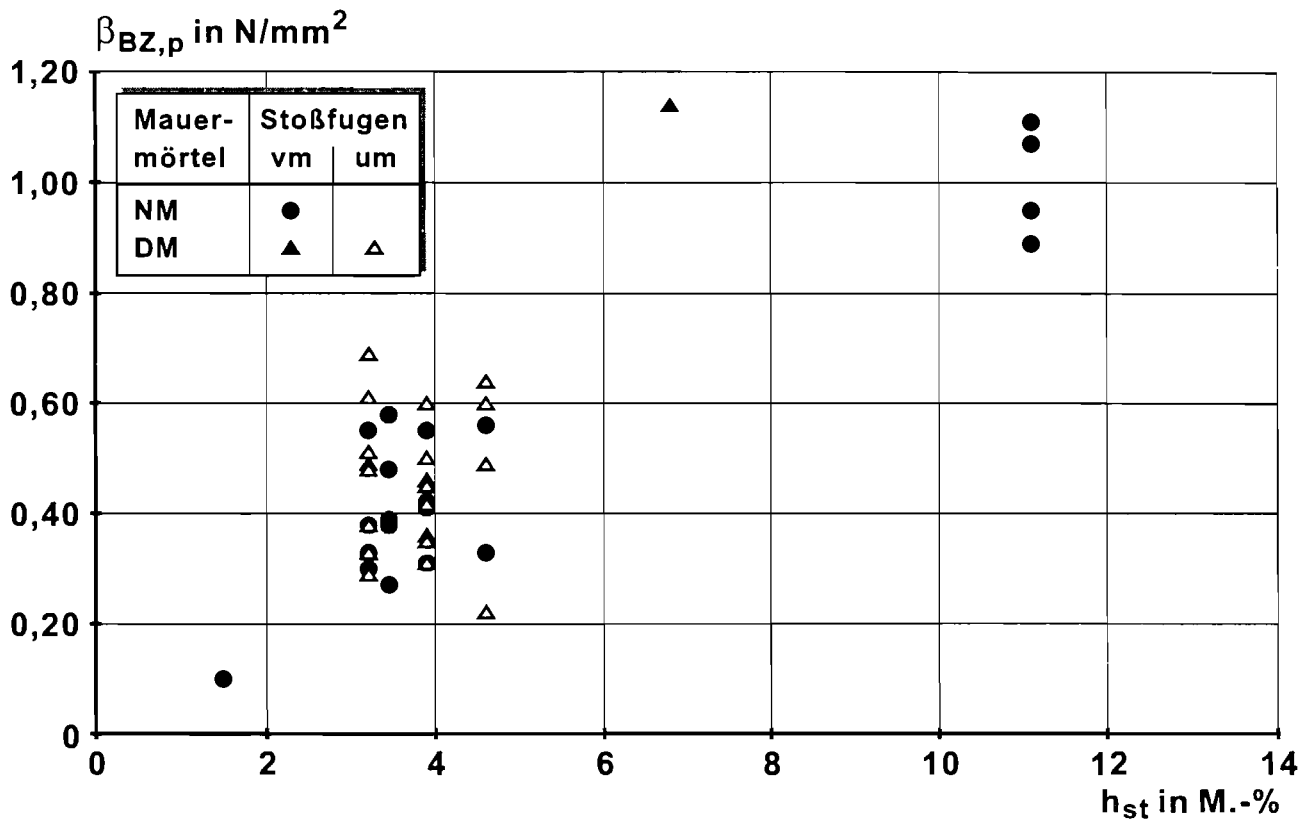
L91-1048/Sb/MK

**Bild 9:** Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht zu den Lagerfugen  $\beta_{BZ,s}$  in Abhängigkeit von der Haftzugfestigkeit  $\beta_{HZ}$   
Mauerwerk aus Porenbetonsteinen



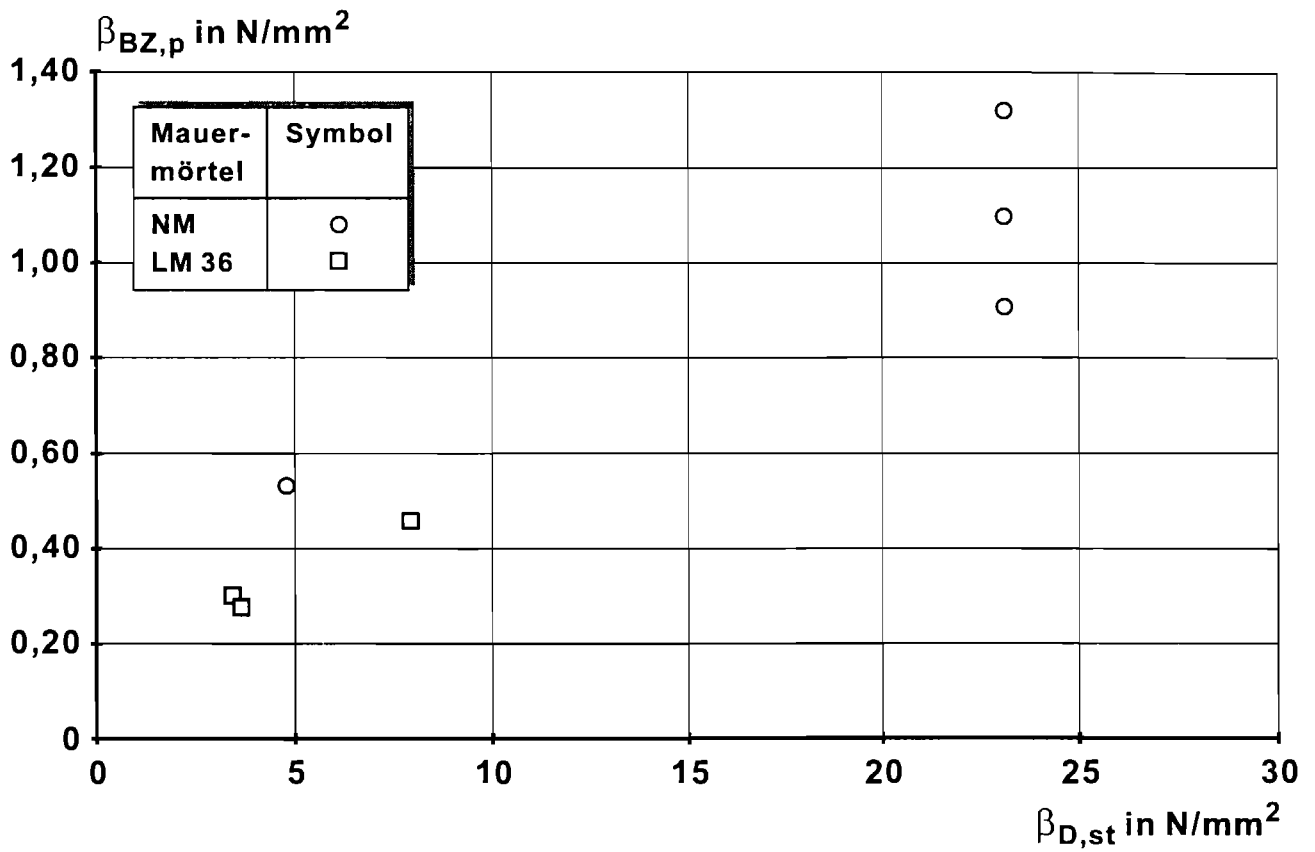
L91-1049/Sb/MK

**Bild 10:** Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht zu den Lagerfugen  $\beta_{BZ,s}$  in Abhängigkeit von der Haftzugfestigkeit  $\beta_{HZ}$   
Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen



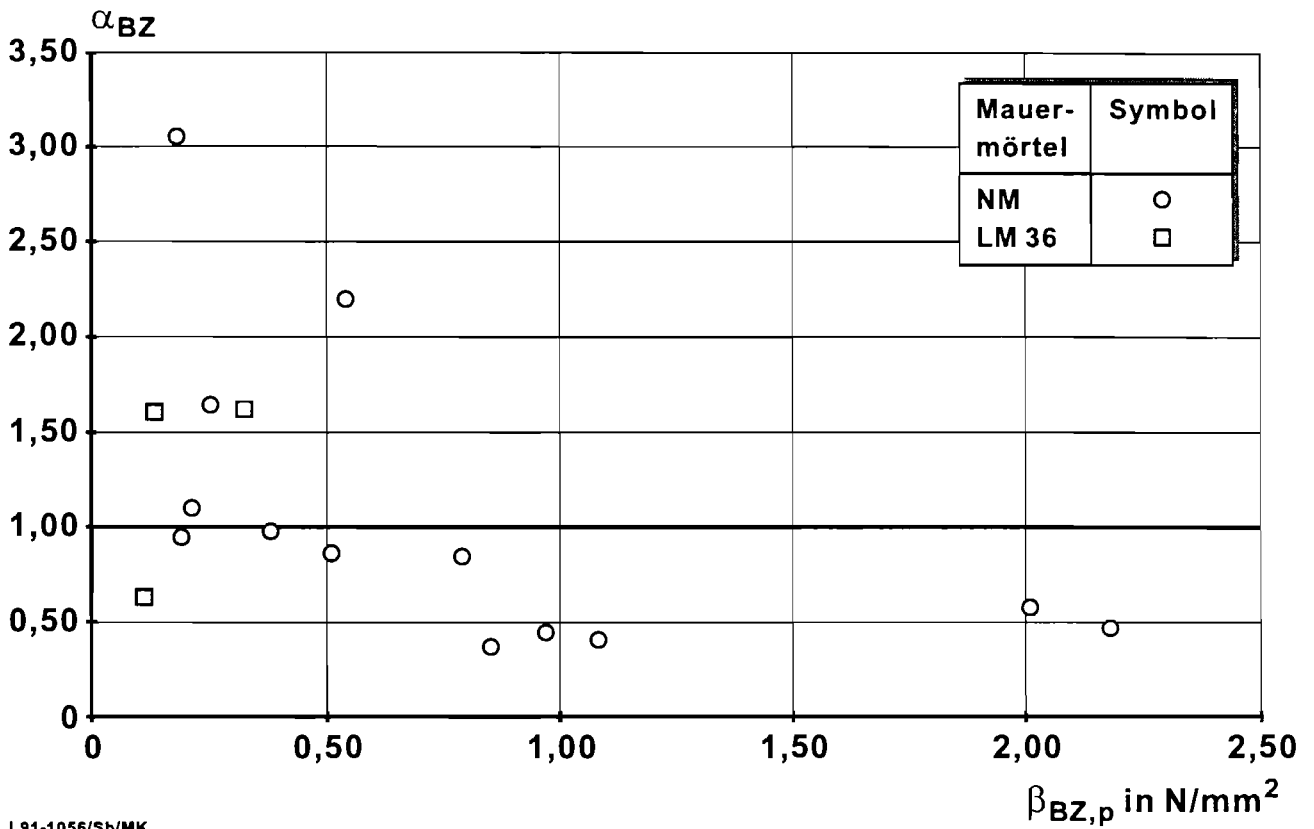
L91-1424/Sb/MK

**Bild 11:** Biegezugfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen  $\beta_{BZ,p}$   
 Einfluß des Feuchtegehaltes  $h_{st}$   
 Mauerwerk aus Kalksandsteinen



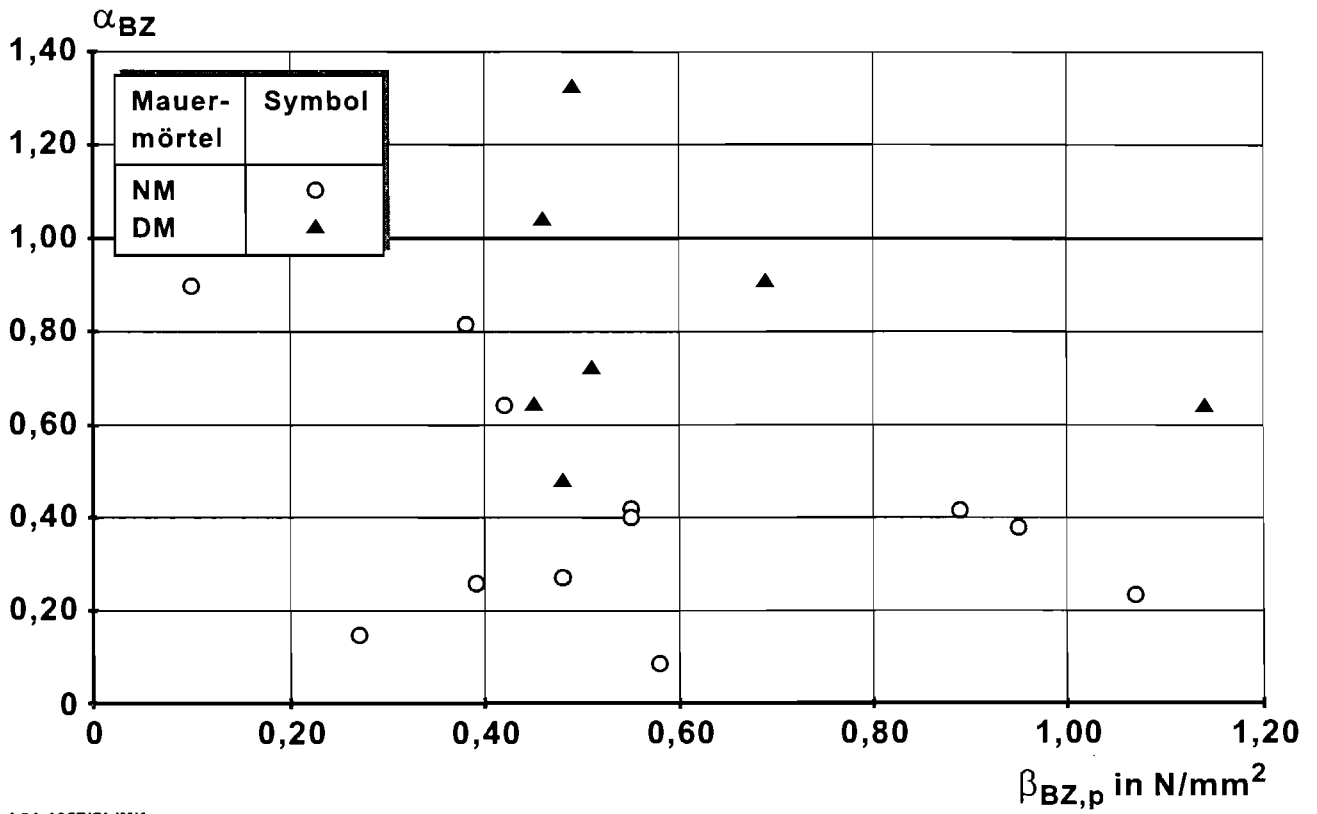
L91-1051/Sb/MK

**Bild 12:** Biegezugfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen  $\beta_{BZ,p}$   
Einfluß der Steindruckfestigkeit  $\beta_{D,st}$   
Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen



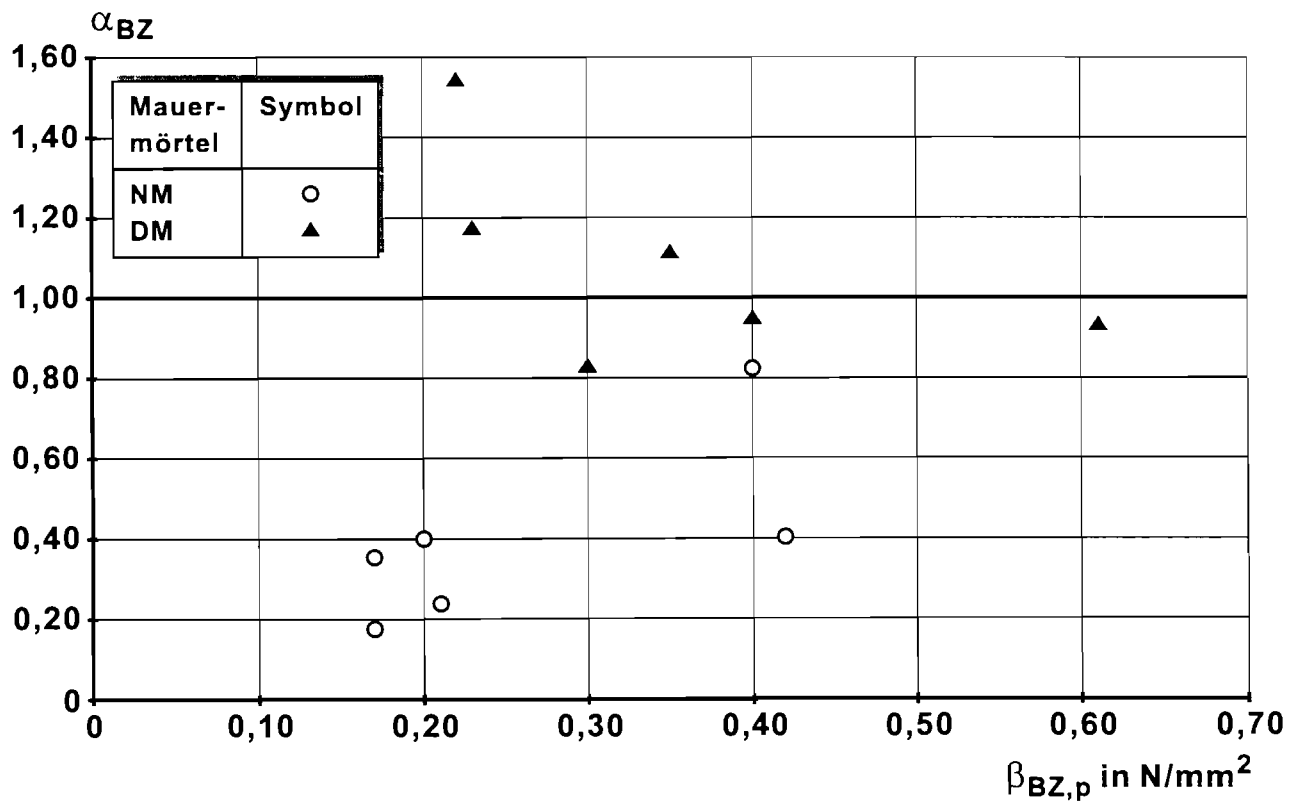
L91-1056/Sb/MK

**Bild 13:** Verhältniswert  $\alpha_{BZ}$  der Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht ( $\beta_{BZ,s}$ ) und parallel ( $\beta_{BZ,p}$ ) zu den Lagerfugen Mauerwerk aus Mauerziegeln



L91-1057/Sb/MK

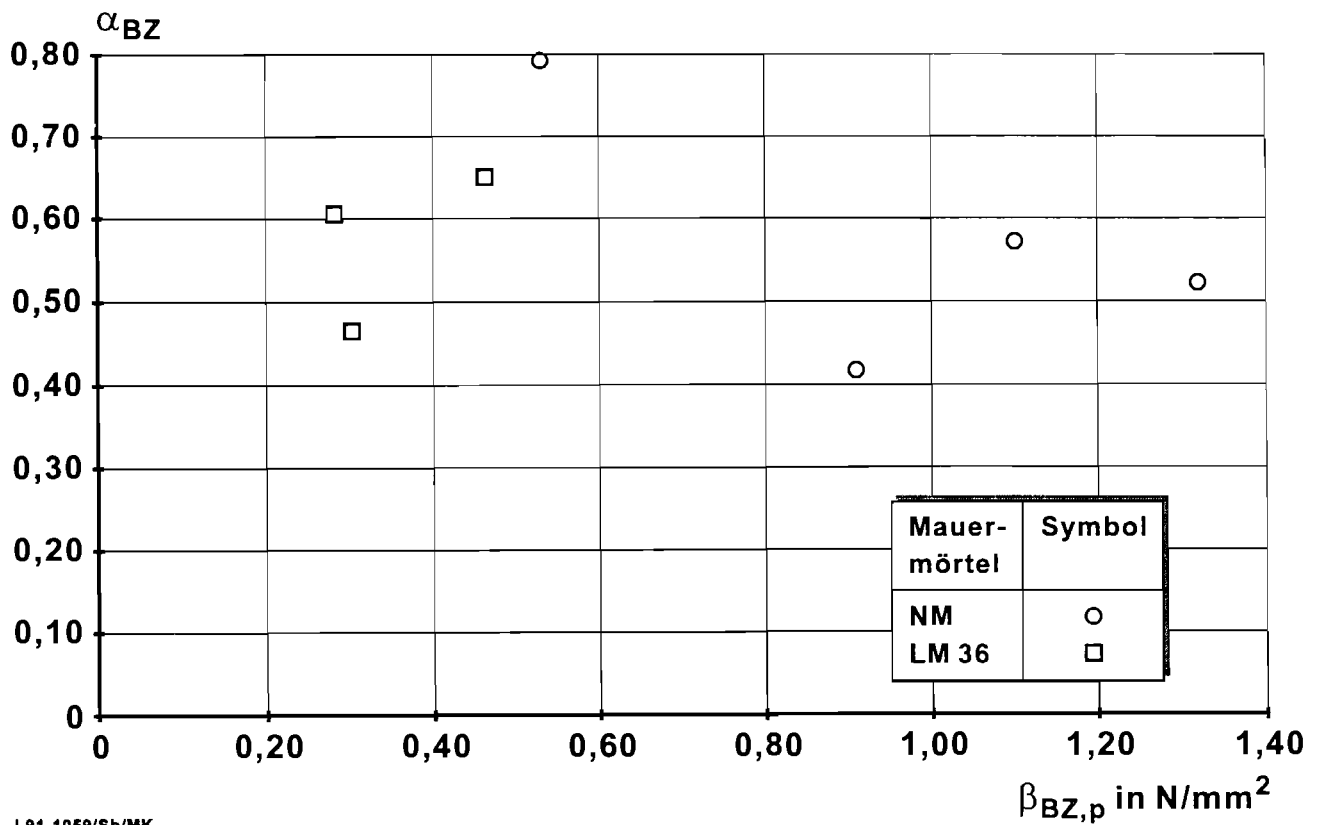
**Bild 14:** Verhältniswert  $\alpha_{BZ}$  der Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht ( $\beta_{BZ,s}$ ) und parallel ( $\beta_{BZ,p}$ ) zu den Lagerfugen Mauerwerk aus Kalksandsteinen



L91-1058/Sb/MK

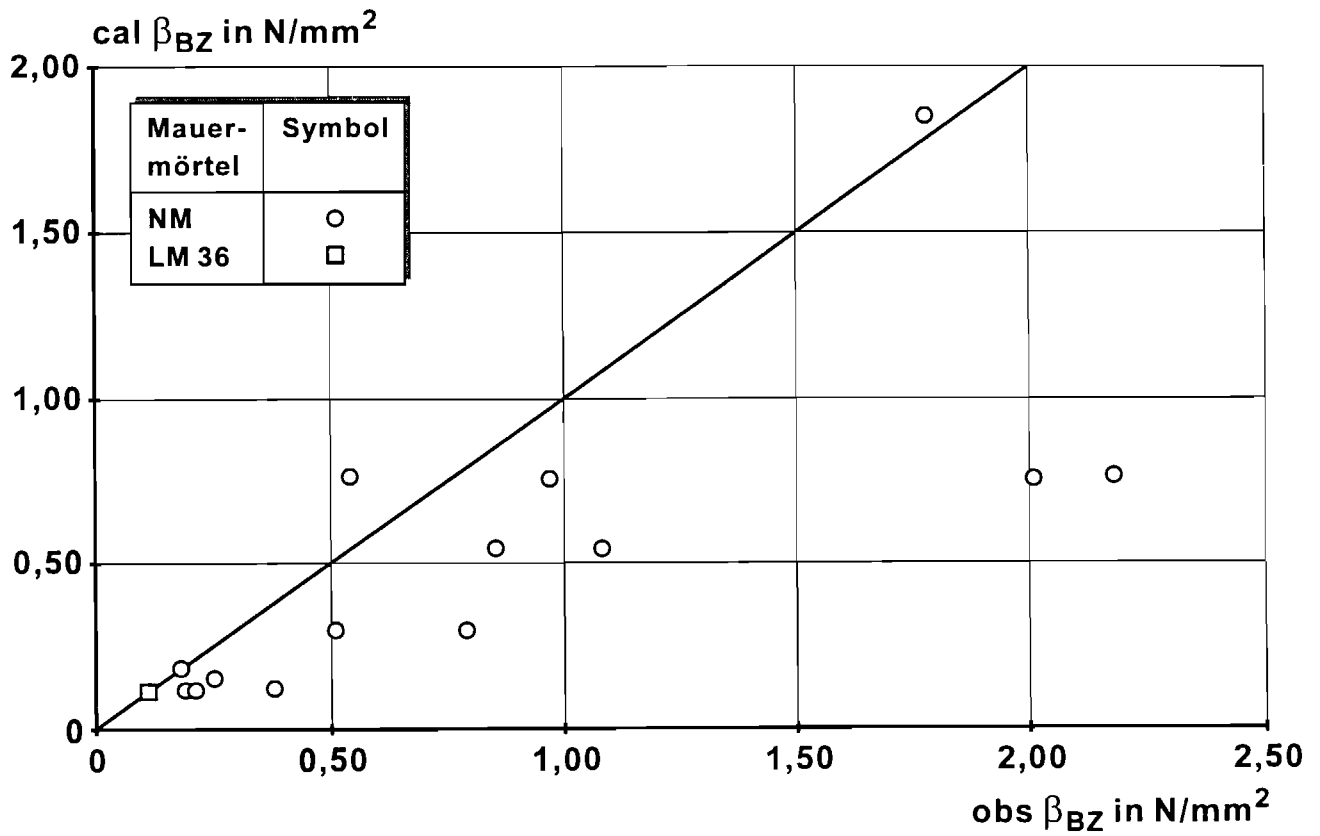
**Bild 15:** Verhältniswert  $\alpha_{BZ}$  der Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht ( $\beta_{BZ,s}$ ) und parallel ( $\beta_{BZ,p}$ ) zu den Lagerfugen  
Mauerwerk aus Porenbetonsteinen





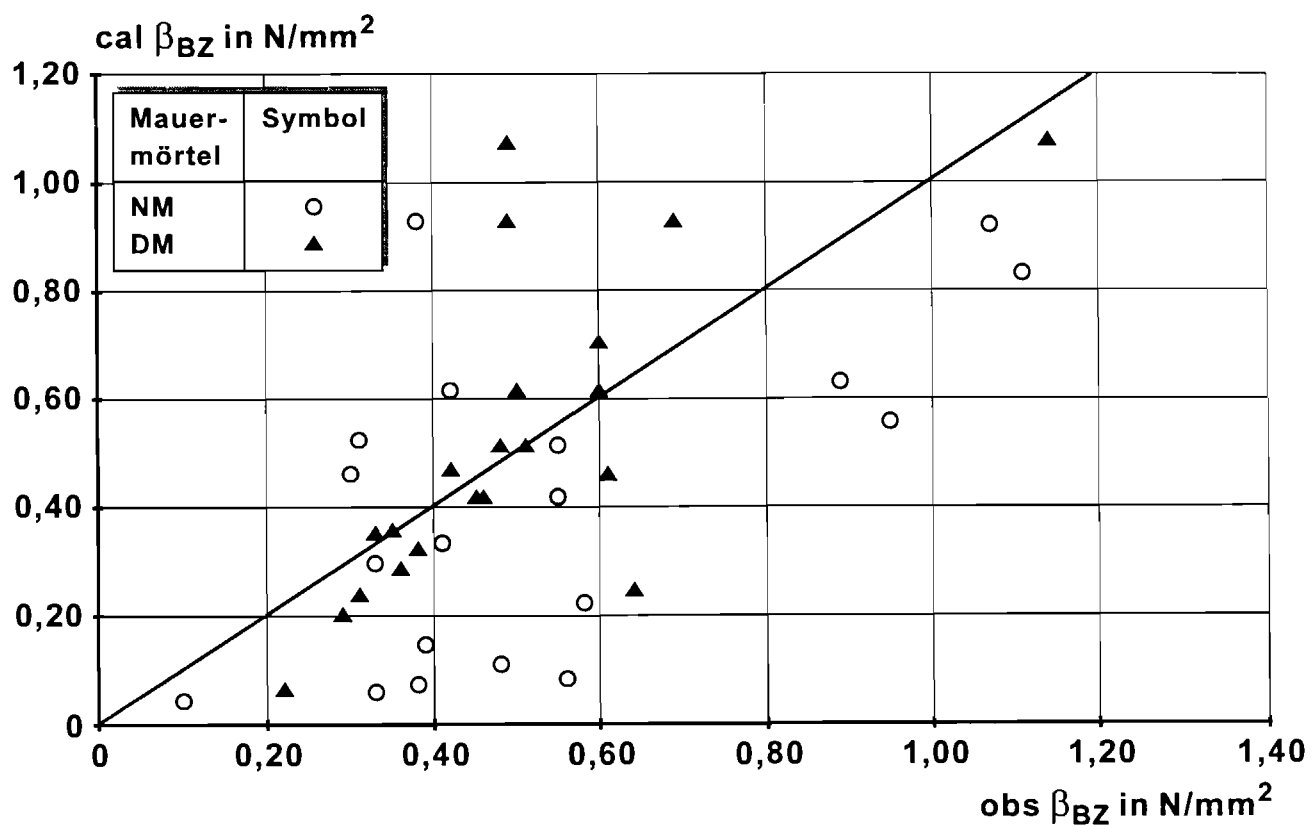
L91-1059/Sb/MK

**Bild 16:** Verhältniswert  $\alpha_{BZ}$  der Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht ( $\beta_{BZ,s}$ ) und parallel ( $\beta_{BZ,p}$ ) zu den Lagerfugen  
Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen

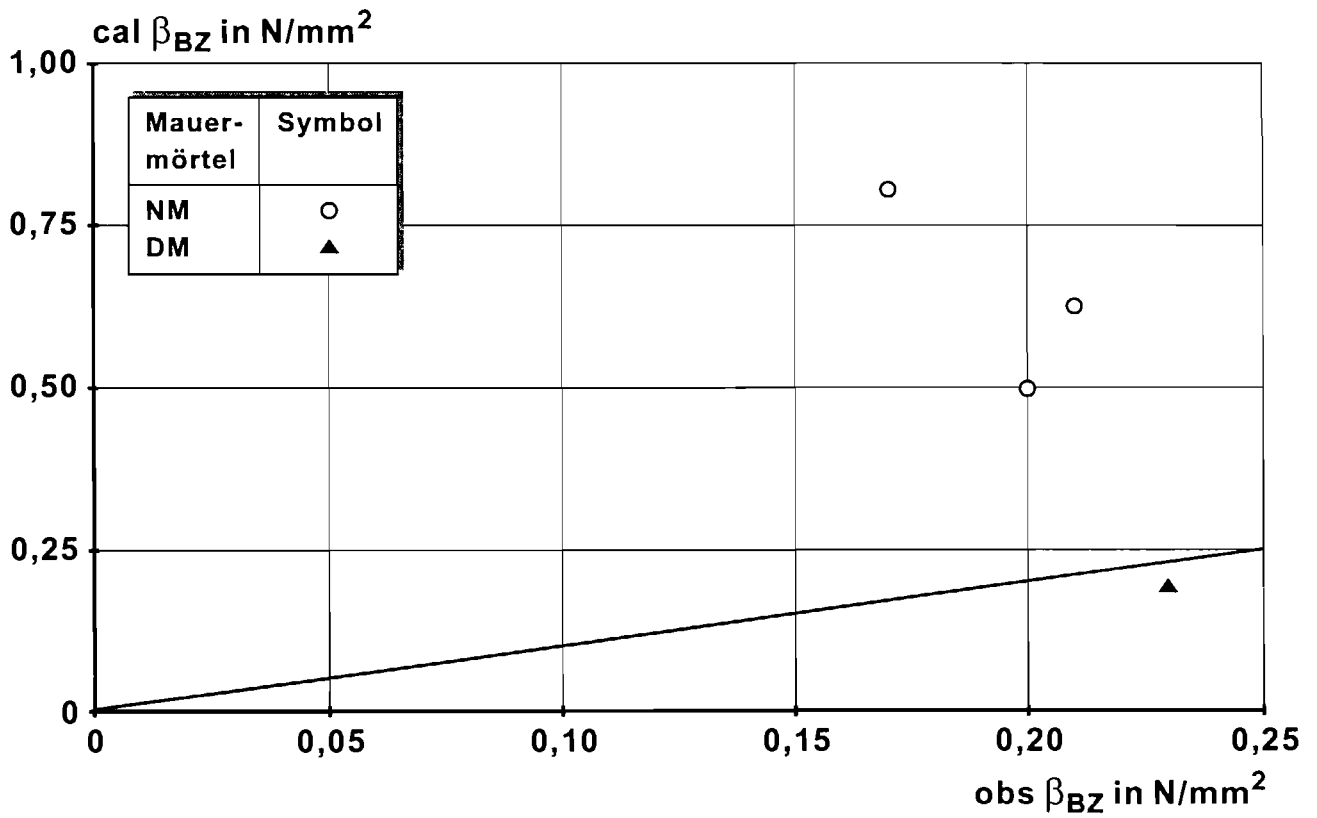


L91-1052/Sb/MK

**Bild 17:** Vergleich der berechneten ( $cal \beta_{BZ}$ ) und versuchsmäßig ( $obs \beta_{BZ}$ ) ermittelten Biegezugfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen  
Mauerwerk aus Mauerziegeln

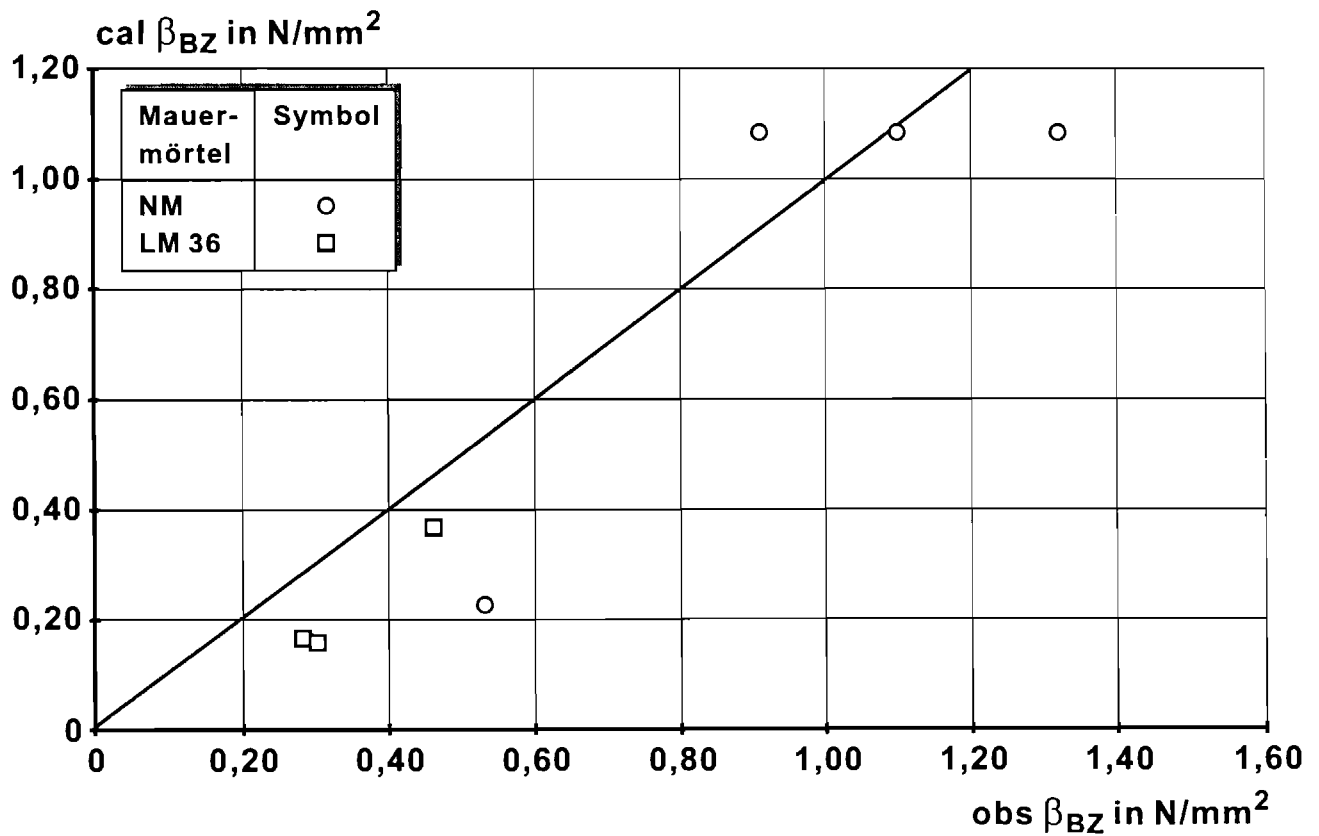


**Bild 18:** Vergleich der berechneten (cal  $\beta_{BZ}$ ) und versuchsmäßig (obs  $\beta_{BZ}$ ) ermittelten Biegezugfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen  
Mauerwerk aus Kalksandsteinen



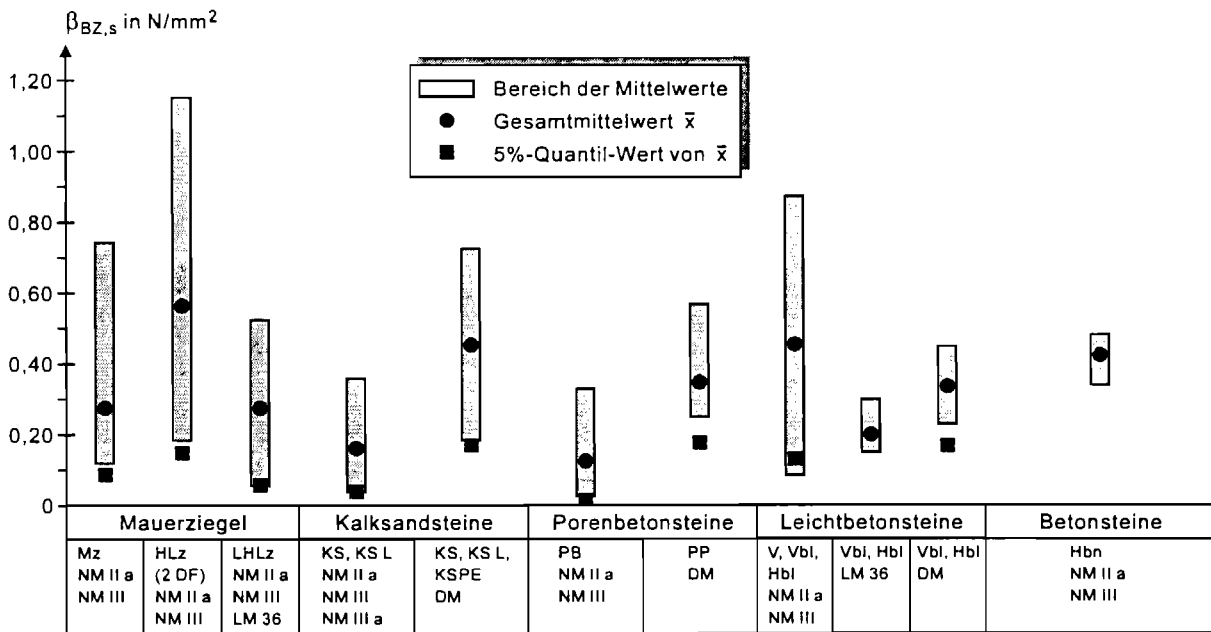
L91-1054/Sb/MK

**Bild 19:** Vergleich der berechneten ( $cal \beta_{BZ}$ ) und versuchsmäßig ( $obs \beta_{BZ}$ ) ermittelten Biegezugfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen Mauerwerk aus Porenbetonsteinen



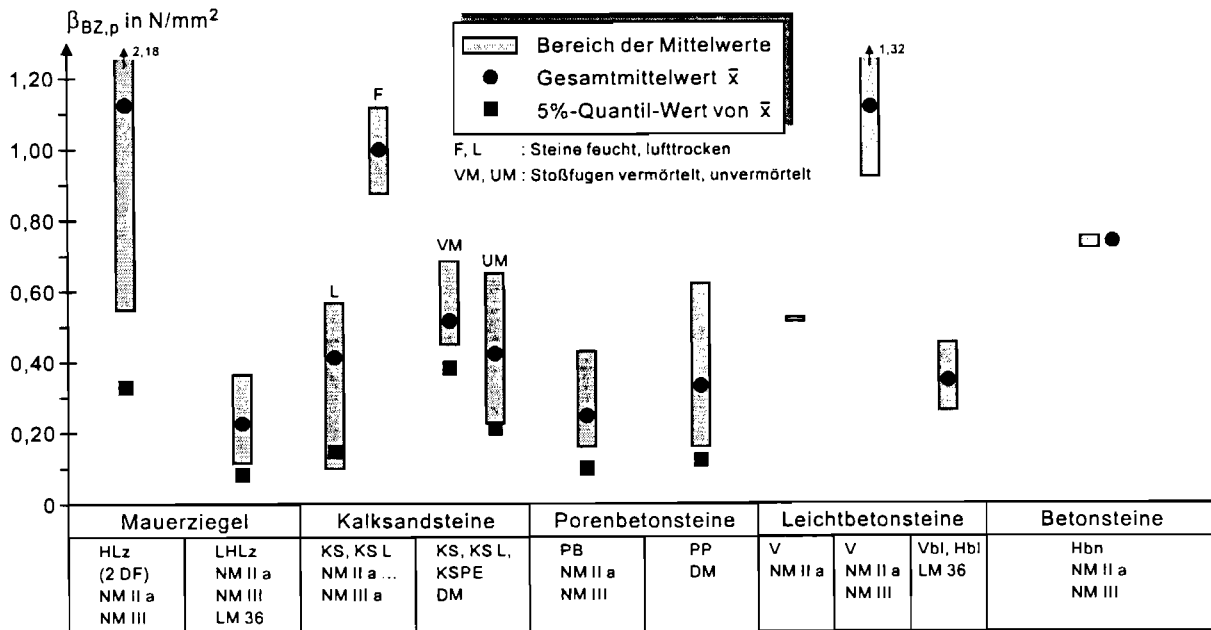
L91-1055/Sb/MK

**Bild 20:** Vergleich der berechneten (cal  $\beta_{BZ}$ ) und versuchsmäßig (obs  $\beta_{BZ}$ ) ermittelten Biegezugfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen  
Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen



L91-1044/8b/MK

**Bild 21:** Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht zu den Lagerfugen  $\beta_{BZ,s}$  zusammengefaßte Auswertergebnisse



L91-1045/Sb/MK

**Bild 22:** Biegezugfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen  $\beta_{BZ,s}$  zusammengefaßte Auswertergebnisse