

# Untersuchungen zur Zugfestigkeit von Mauerwerk

(INVESTIGATIONS OF THE TENSILE STRENGTH OF MASONRY)

Dipl.-Ing. H.-P. Backes und Dipl.-Ing. P. Schubert  
Institut für Bauforschung, RWTH Aachen, Deutschland

## KURZFASSUNG

Hauptziel der Forschungsarbeit ist die versuchsmäßige Ermittlung der Zugfestigkeit, der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie und der Zugbruchdehnung von Mauerwerk. Geprüft werden Mauerwerkkörper und kleine Stein-Mörtel-Prüfkörper aus verschiedenen Mauersteinen und Mörteln unter Zug- bzw. Scherbeanspruchung. Berichtet wird über die Prüfvorrichtungen sowie über erste Versuchsergebnisse.

## SUMMARY

The aim of the research project is to investigate tensile strength, stress-strain curve and percentage elongation after fracture of masonry by testing. Masonry specimens made of combinations of different masonry units and mortars will be tested under tensile and shear stress. There will be presented the testing equipments and the first test results.

### 1. Einleitung

Die Rißsicherheit von Mauerwerk hängt ab von der Beanspruchung des Mauerwerks unter Einwirkung von äußeren Lasten, Temperatur und Feuchtigkeit sowie den Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Mauerwerks. Letztere werden im wesentlichen durch die Eigenschaften der Komponenten Mauerstein und Mörtel und deren Verbundeigenschaften im Mauerwerk bestimmt. Werden Formänderungen von Mauerwerkbauteilen behindert, so entstehen Spannungen. Wegen der verhältnismäßig geringen Zug-, Scher- und Schubbeanspruchbarkeit von Mauerwerk führen derartige Spannungen aus behinderten Formänderungen oft zu erhöhter Rißgefahr.

Gegenwärtig kann die Rißsicherheit von Mauerwerkbauten nur relativ grob anhand einiger, überwiegend empirisch begründeter Abschätzverfahren beurteilt werden. Die notwendige Verbesserung der Beurteilungsverfahren setzt unter anderem die vergleichende Betrachtung von Spannung und Festigkeit bzw. Dehnung und Bruchdehnung unter Berücksichtigung der Relaxation voraus. Derartige Festigkeits- und Verformungskennwerte liegen für Mauerwerk unter Zugbeanspruchung bislang nicht vor.

Für eine ausreichend genaue Beurteilung der Rißsicherheit ist die Kenntnis der Zugfestigkeit und des Verformungsverhaltens von Mauerwerk unter Zugbeanspruchung jedoch wesentliche Voraussetzung.

Deshalb ist das Hauptziel der Forschungsarbeit, die Zugfestigkeit, die  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie, die Bruchdehnung und die Relaxation unter Zugbeanspruchung versuchsmäßig zu ermitteln. Die Zugbeanspruchung soll

parallel zu den Lagerfugen erfolgen, weil diese Beanspruchungsart Ursache des häufig auftretenden Schadensfalls "vertikale Risse in relativ langen Mauerwerkwänden" ist (Verformungsfall: Formänderungen überwiegend in horizontaler Richtung; siehe auch Beitrag Glitza) und außerdem in DIN 1053 Teil 2 (Entwurf) als einzige Art der Zugbeanspruchung zugelassen ist.

## 2. Stand der Forschung zur Zugfestigkeit von Mauerwerk

Zur Zugfestigkeit und zum Verformungsverhalten von Mauerwerk unter Zugbeanspruchung sind bisher nur relativ wenige Untersuchungen durchgeführt worden. Im wesentlichen handelt es sich um Scherversuche an stockwerk hohen Wänden (Standard-Racking-Test) und um Versuche zur Diagonalzug- und Spaltzugfestigkeit an kleinen Mauerwerkkörpern.

Die Auswertung der zugänglichen Versuchsergebnisse wurde durch die verschiedenen Versuchsbedingungen und die zum Teil sehr unterschiedliche Terminologie erschwert. Insbesondere unterscheiden sich die Form der Prüfkörper sowie die Auflagerungs- und Belastungsart erheblich. Außerdem fehlen vielfach wesentliche Angaben zur Versuchs- und Meßeinrichtung, über das Prüfalter der Versuchskörper, zur Mörtelzusammensetzung sowie über Festigkeitseigenschaften der Mauersteine und der verwendeten Mörtel.

Nach Kenntnis der Verfasser liegen zur Zugfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen bisher lediglich Ergebnisse von Hedstrom u. A. /1, 2/ aus den Jahren 1966/68 vor.

Die Gesamtauswertung aller Versuchsergebnisse ergab, daß keine eindeutige Aussage über den Einfluß der Mauerstein- und Mörtel-druckfestigkeit auf die "Zugfestigkeit von Mauerwerk" möglich ist. Die Größe der versuchsmäßig bestimmten bzw. errechneten Zugfestigkeitswerte hängt wesentlich sowohl von materialspezifischen als auch von versuchstechnischen Faktoren ab, die jedoch in den meisten Berichten nicht näher beschrieben wurden.

## 3. Versuchsprogramm

Eine Übersicht über das gesamte Versuchsprogramm gibt die Tabelle 1. Es gliedert sich auf in drei Teile und zwar:

- a) Zugversuche an Mauerwerkkörpern mit den Abmessungen 490 mm · 115 mm · 485 mm (l·b·h) (Bild 1)
- b) Scherversuche an Stein-Mörtel-Prüfkörpern (Bild 2)
- c) Diagonalzugversuche an Stein-Mörtel-Prüfkörpern (Bild 3)

Als Steinarten wurden Kalksandvoll- und Kalksandlochsteine, Hochlochziegel, Leichtbetonvollsteine und Gasbetonsteine des Formates 2 DF (240 mm · 115 mm · 113 mm) gewählt. Die Versuche werden mit Mörteln der Mörtelgruppen II (Mörtel aus hochhydraulischem Kalk, mittlere 28 Tage-Mindestdruckfestigkeit 2,5 N/mm<sup>2</sup>) und III (Zementmörtel, mittlere 28 Tage-Mindestdruckfestigkeit 10 N/mm<sup>2</sup>) durchgeführt.

Tabelle 1: Versuchsplan - Zugversuche -

Steinart/ Kurzzeichen/ DIN	Stein- festig- keits- klasse (N/mm <sup>2</sup> )	Anzahl und Art der Prüfkörper <sup>1)</sup>					
		Mörtelgruppe					
		II			III		
		MWK	SMS	SMZ	MWK	SMS	SMZ
Kalksandvoll- steine/KS/106	12	3	3	3	3	3	3
	28		3	3		3	3
	36		3	3	3	3	3
Kalksandloch- steine/KSL/106	12	3	3	3	3	3	3
Hochlochziegel/ HLz/105	12	3	3	3	3	3	3
	28		3	3		3	3
	60		3	3	3	3	3
Leichtbetonvoll- steine/V/18152 (Zuschlag Natur- bims)	2	3	3	3		3	3
	12		3	3	3	3	3
Gasbetonsteine/ G/4165	2	3	3	3		3	3
	4		3	3	3	3	3

1) MWK: Mauerwerkkörper, SMS: Stein-Mörtel-Prüfkörper "Scherbeanspruchung"

SMZ: Stein-Mörtel-Prüfkörper "Diagonalzugbeanspruchung"

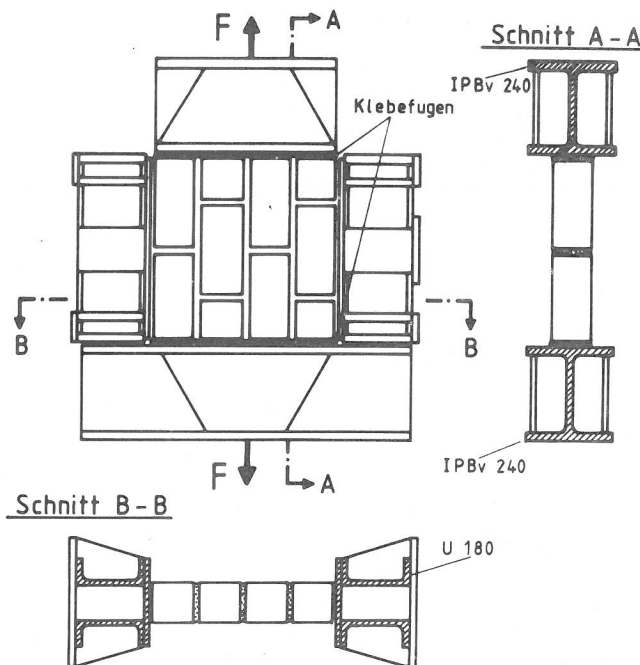


Bild 1: Aufbau der Zugversuchseinrichtung für kleine Mauerwerk-  
prüfkörper

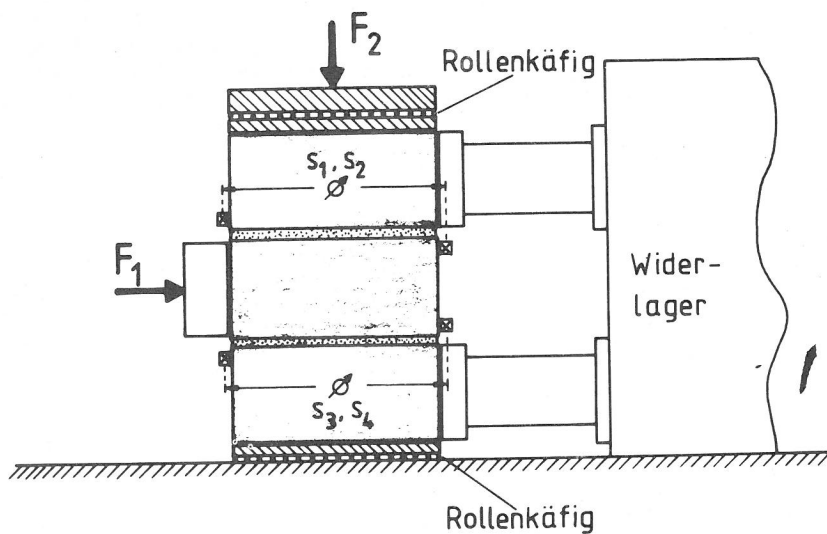


Bild 2: Aufbau der Versuchseinrichtung für Stein-Mörtel-Prüfkörper "Scherbeanspruchung"

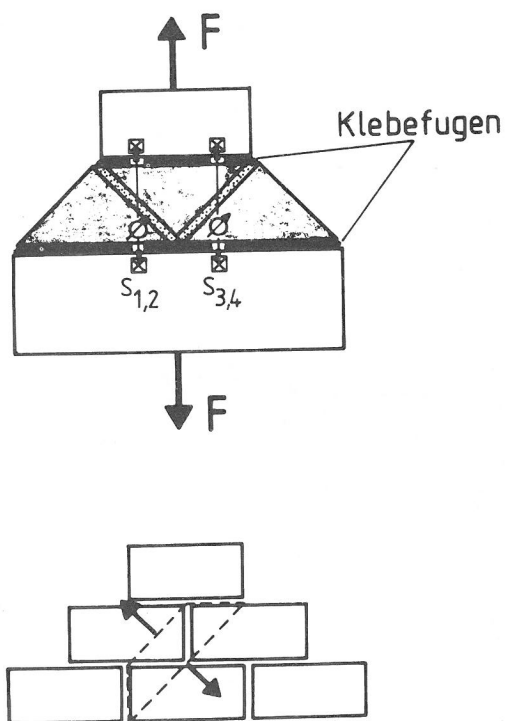


Bild 3: Aufbau der Versuchseinrichtung für Stein-Mörtel-Prüfkörper "Diagonalzugbeanspruchung"

Bei den Zugversuchen werden zunächst Prüfkörper aus Mauerwerk geprüft, für das extrem niedrige oder extrem hohe Zugfestigkeit zu erwarten ist. Außerdem erfolgen jeweils Prüfungen an Stein-Mörtel-Prüfkörpern der entsprechenden Stein-Mörtel-Kombinationen.

Die Ergebnisse sollen Aussagen über die wesentlichsten Einflußgrößen auf die Zugfestigkeit von Mauerwerk und vermutliche "Zugfestigkeits-Grenzwerte" ermöglichen.

Da es ein Ziel der Forschungsarbeit ist, aus den an Mauersteinen und Stein-Mörtel-Prüfkörpern unter Zug- bzw. Scherbeanspruchung ermittelten Festigkeits- und Verformungskennwerten diejenigen des Mauerwerks abzuleiten, werden verschiedene Untersuchungen an den Einzelkomponenten des Mauerwerks durchgeführt. An den Mauersteinen werden Abmessungen, Rohdichte und Druckfestigkeit nach der jeweils geltenden Norm, Spaltzugfestigkeit und Zugfestigkeit in Steinlängsrichtung sowie die Wasseraufnahme an Lager- und Stirnfläche bestimmt.

An den verwendeten Mörteln der Gruppen II und III werden Ausbreitmaß, Frischmörtelrohichte, Luftporengehalt und Trockenrohichte sowie Biegezug-, Druckfestigkeit (Alter etwa 3 d) und im Alter von 7 und 28 d geprüft. Die Mörtelprüfkörper lagern bis zum Alter von 7 d im Feuchtschrank und danach im Normalklima 20/65 nach DIN 50014.

#### 4. Versuche

##### 4.1 Vorbemerkung

Die in Bild 1 dargestellte Zugversuchseinrichtung wurde nach umfangreichen Voruntersuchungen entwickelt. Die Konzeption der Versuchseinrichtungen für die Untersuchungen an Stein-Mörtel-Prüfkörpern (Bilder 2 und 3) wurde aus früheren Untersuchungen (vgl. /3/) übernommen und zum Teil aufgrund neuerer Erkenntnisse verbessert (s. auch /4/).

Bisher wurden nur mit Mauerwerkkörpern aus Kalksandvollsteinen (Festigkeitsklasse 12 und 36), Kalksandlochsteinen (Festigkeitsklasse 12) sowie Leichtbetonvollsteinen (Festigkeitsklasse 2) Serienversuche durchgeführt.

##### 4.2 Versuchsdurchführung

Die Beschreibung der Versuchsdurchführung beschränkt sich aus dem vorgenannten Grunde auf die Mauerwerkzugversuche.

Die Mauerwerkkörper werden in vier Lagen im Läuferverband auf einen Stahlträger aufgemauert und nach zwei Tagen - der Mörtel hat etwa zwei Drittel seiner Mindestdruckfestigkeit erreicht - um 90° gedreht. In dieser Lage werden die Prüfkörper mit Epoxidharzmörtel zwischen oberes und unteres Krafteinleitungselement geklebt und in die Zugprüfmaschine eingebaut.

Bild 4 zeigt einen Mauerwerkkörper im eingebauten Zustand vor der Zugprüfung, rechts die Steuer-, Meß- und Registriereinrichtungen.

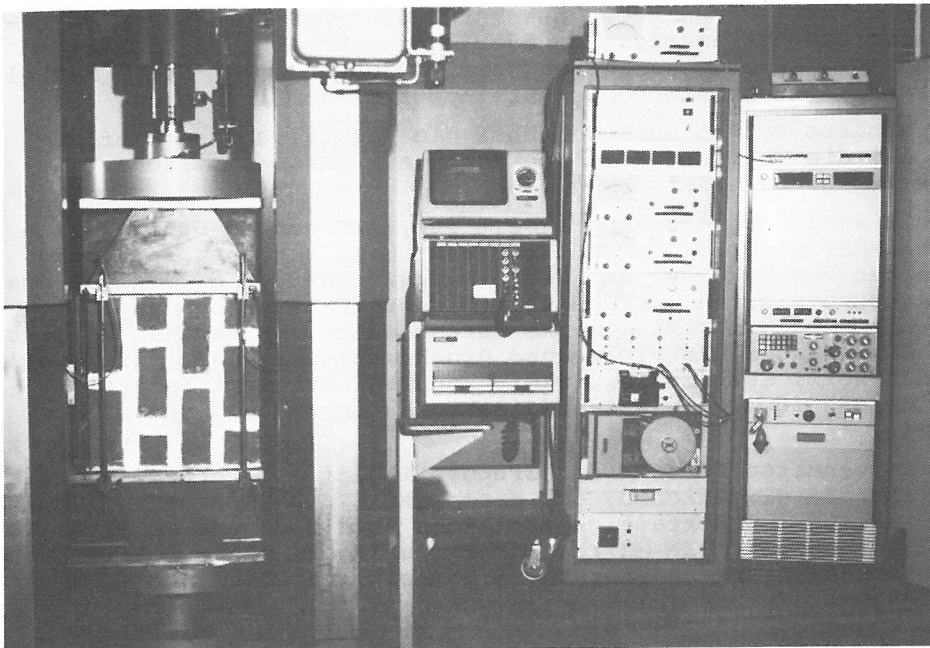


Bild 4: Gesamtansicht der Versuchseinrichtung für die Mauerwerkzugversuche

Nach dem rd. 24-stündigen Aushärten des Klebers und Anbringen der Meßvorrichtung werden die Mauerwerkkörper mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit (0,5 mm/m/min) belastet. Die Verformungen werden mit 4 induktiven Wegaufnehmern (siehe Bild 4), die aufgenommene Kraft mit einer 50 kN-Kraftmeßdose gemessen. Die verstärkten Meßsignale der induktiven Wegaufnehmer werden elektrisch gemittelt und dienen der Maschinenregelung als Steuersignal zur Einhaltung der konstanten Verformungsgeschwindigkeit.

Die Meßsignale werden direkt von einer Meßdaten-Erfassungsanlage auf Floppy-Disks gespeichert. Die Anlage erlaubt es weiterhin mit Hilfe eines umfangreichen, eigens für die Zugversuche erarbeiteten Softwarepaketes und entsprechenden Periphergeräten im Anschluß an jeden Versuch, Diagramme mit  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien und Tabellen mit allen gemessenen und errechneten Versuchsdaten auszugeben.

#### 4.3 Versuchsergebnisse

Die wesentlichsten, aus dem Berichtszeitraum vorliegenden Versuchsdaten und -ergebnisse sind in der Tabelle 2 zusammengestellt.

##### 4.3.1 $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie

Typische  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien sind beispielhaft in den Bildern 5 bis 7 dargestellt. Die  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien lassen sich hinsichtlich ihres Verlaufes grob in 2 Gruppen einteilen:

- $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien, die steil und weitgehend linear bis  $\max \sigma$  verlaufen und danach meist schnell bis auf eine annähernd konstante Spannung (Bilder 5 und 7) abfallen. Die starken Unstetigkeiten im abfallenden Ast (Bild 5) sind auf eine Unzulänglichkeit der servohydraulisch geregelten Prüfmaschine zurückzuführen.

Tabelle 2: Ergebnisse der Mauerwerkzugversuche

Mauersteine					Mörtel			Mauerwerk									
Prüf- körper Nr.	Sorte (Format 2 DF)	$\beta_D$	$W_a$	$h$	MG	$\beta_D$		$\beta_Z$	$\epsilon_Z$	$\sigma_{Z,krit}$	$\epsilon_{Z,krit}$	$\frac{\sigma_{Z,krit}}{\beta_Z}$	$\frac{\epsilon_{Z,krit}}{\epsilon_Z}$	$E_Z = \frac{\sigma_{Z,krit}}{\epsilon_{Z,krit}}$	$E_D$	$E_Z/E_D$	
		N/mm <sup>2</sup>	g/(dm <sup>2</sup> ·min)	Vol.-%		3 d <sup>1)</sup>	28 d	N/mm <sup>2</sup>	mm/m	N/mm <sup>2</sup>	mm/m	N/mm <sup>2</sup>	mm/m	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
9 10 21	KS12-1,8	23,2	10,2	3,9 4,1 4,1	II	3,64 3,63 3,80	- 8,71 9,18	0,066 0,089 0,157	0,051 0,681 0,113	0,062 0,042 0,114	0,045 0,038 0,037	0,94 0,47 0,73	0,88 0,06 0,33	1380 1100 3070	5000	0,37	
11 17 19	KS12-1,8	23,2	10,2	4,2 4,1 3,9	III	9,25 10,63 9,57	26,5 27,8 27,8	0,172 0,259 0,146	0,047 0,072 0,100	0,168 0,171 0,145	0,044 0,031 0,054	0,98 0,66 0,99	0,94 0,43 0,54	3930 5510 2710	6000	0,68	
15 16 23	KS36-2,0	46,0	6,0	15,1 13,6 8,9	III	9,63 9,73 9,57	27,2 27,4 26,9	0,092 0,083 0,179	0,882 1,083 0,060	0,020 0,022 0,153	0,039 0,023 0,040	0,22 0,26 0,85	0,04 0,02 0,67	530 960 3810	11000	0,16	
7 8 20	KSL12-1,6	26,4	9,1 <sup>2)</sup>	4,5 4,5 4,7	II	4,29 3,47 3,62	9,44 8,61 9,49	0,061 0,078 0,076	1,379 2,093 0,048	0,006 0,017 0,067	0,010 0,023 0,032	0,10 0,22 0,88	0,01 0,01 0,67	570 770 2080	5000	0,23	
5 6 18	KSL12-1,6	26,4	9,1 <sup>2)</sup>	4,5 5,2 4,6	III	10,1 12,5 10,1	31,5 31,5 27,1	0,087 <sup>3)</sup> 0,087 <sup>3)</sup> 0,102	0,087 0,081 0,063	0,085 0,080 0,099	0,073 0,064 0,048	0,98 0,92 0,97	0,84 0,79 0,76	1160 1250 2040	6000	0,25	
12 13 22	V2-0,8	3,10	51,9	1,3 3,4 2,9	II	3,70 3,87 3,53	8,57 8,94 8,62	0,157 0,174 0,154	0,170 0,102 0,160	0,128 0,122 0,129	0,068 0,050 0,086	0,82 0,70 0,84	0,40 0,49 0,54	1880 2440 1500	1500	1,30	

1) Prüfalter des Mauerwerkkörpers

2) Deckelfläche

3) Verformungsgeschwindigkeit 2 mm/m/min

4) Rechenwerte nach /5/

 $\beta_D$  : Druckfestigkeit $h$  : Feuchtegehalt $\beta_Z$  : Zugfestigkeit $\sigma_{Z,krit}$  : Zugspannung, ab der vermutlich Makrorißbildung verstärkt einsetzt $\epsilon_{Z,krit}$  : Dehnung bei  $\sigma_{Z,krit}$  $E_Z$  : Sekanten-Zug-E-Modul,  $E_Z = \sigma_{Z,krit} / \epsilon_{Z,krit}$  $E_D$  : Sekanten-Druck-E-Modul bei  $\sigma_D \approx 1/3 \beta_D$  $W$  : Wasseraufnahme

MG: Mörtelgruppe

 $\epsilon_Z$  : Dehnung bei  $\beta_Z$

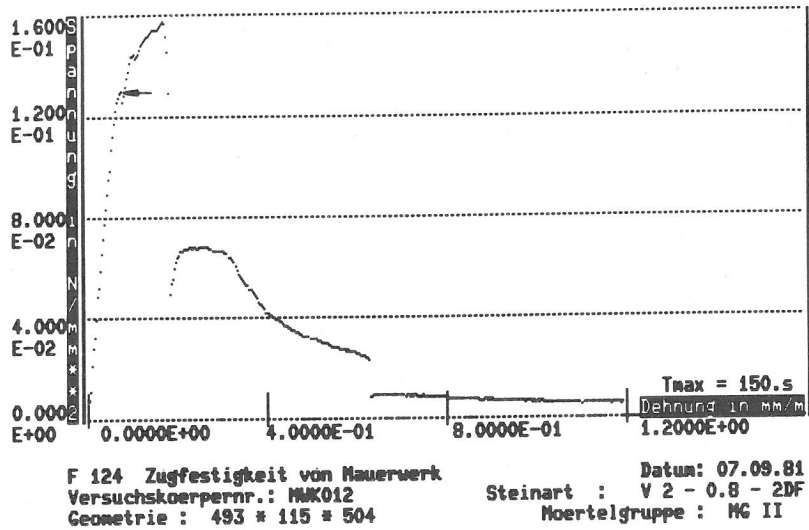


Bild 5:  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie von zugbeanspruchtem Mauerwerk

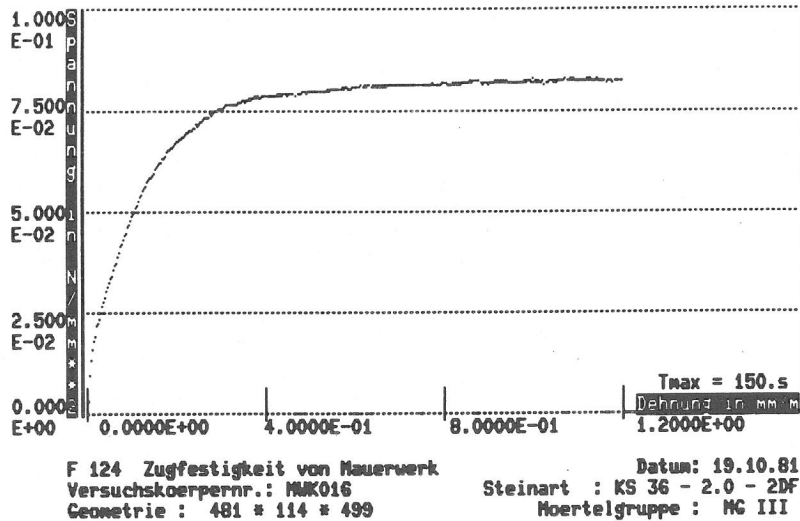


Bild 6:  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie von zugbeanspruchtem Mauerwerk



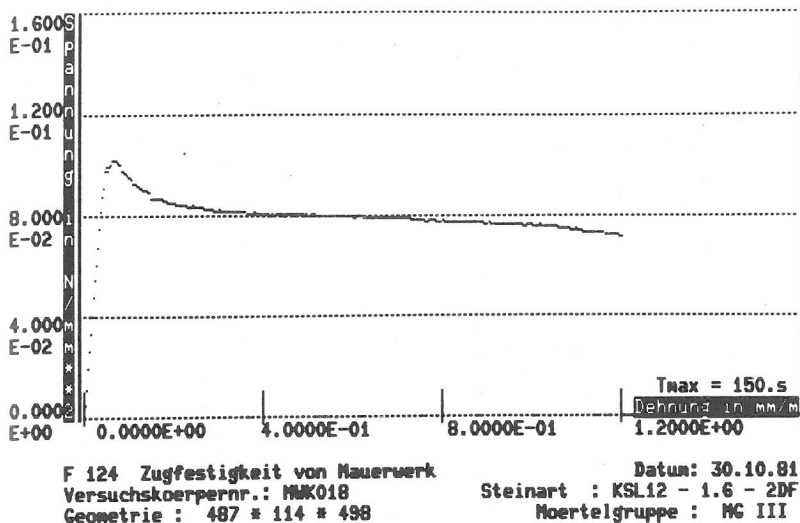


Bild 7:  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie von zugbeanspruchtem Mauerwerk

- b)  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien, die von Beginn an leicht gekrümmt sind und keinen ausgeprägten Maximalwert  $\max \sigma$  aufweisen (Bild 6).

Die  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien der Gruppe a) treten vorwiegend bei Prüfkörpern aus Lochsteinen auf sowie in den Fällen, wo die Steinzugfestigkeit maßgebend ist (Risse durch die Steine).

#### 4.3.2 Zugfestigkeit

Die mittleren Zugfestigkeitswerte des geprüften Kalksandsteinmauerwerks liegen zwischen 0,07 und 0,19 N/mm<sup>2</sup>. Wie auch aus Bild 8 ersichtlich, ergaben sich höhere Zugfestigkeitswerte, wenn Mörtelgruppe III statt Mörtelgruppe II verwendet wurde. In allen Fällen verlief der Bruch im Fugenbereich, d. h. die Scherfestigkeit zwischen Stein und Mörtel  $\beta_a$  war bestimmend für die Zugfestigkeit des Mauerwerks (s. Bild 9). Die Zugfestigkeitswerte streuen zum Teil beträchtlich.

Vergleichsweise hoch sind die Zugfestigkeitswerte des Mauerwerks aus den Leichtbetonsteinen V2 mit im Mittel 0,16 N/mm<sup>2</sup>. Die Risse verliefen durch den Stein- und Fugenbereich, d. h. die Steinzugfestigkeit  $\beta_{Z,st}$  bestimmte die Mauerwerkzugfestigkeit (s. Bild 10).

Wird  $\beta_{Z,mw}$  nach /6/ aus  $\beta_a$  bzw.  $\beta_{Z,st}$  abgeleitet, so ergeben sich für das Kalksandsteinmauerwerk 0,16 (MG II) und 0,21 N/mm<sup>2</sup> (MG III), für das Leichtbetonmauerwerk 0,11 N/mm<sup>2</sup>. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die verwendeten  $\beta_a$ - und  $\beta_{Z,st}$ -Werte aus /6/ stark pauschaliert sind, so daß davon ausgegangen werden kann, daß die Versuchswerte für  $\beta_{Z,mw}$  im Schwankungsbereich der "errechneten"  $\beta_{Z,mw}$ -Werte liegen.

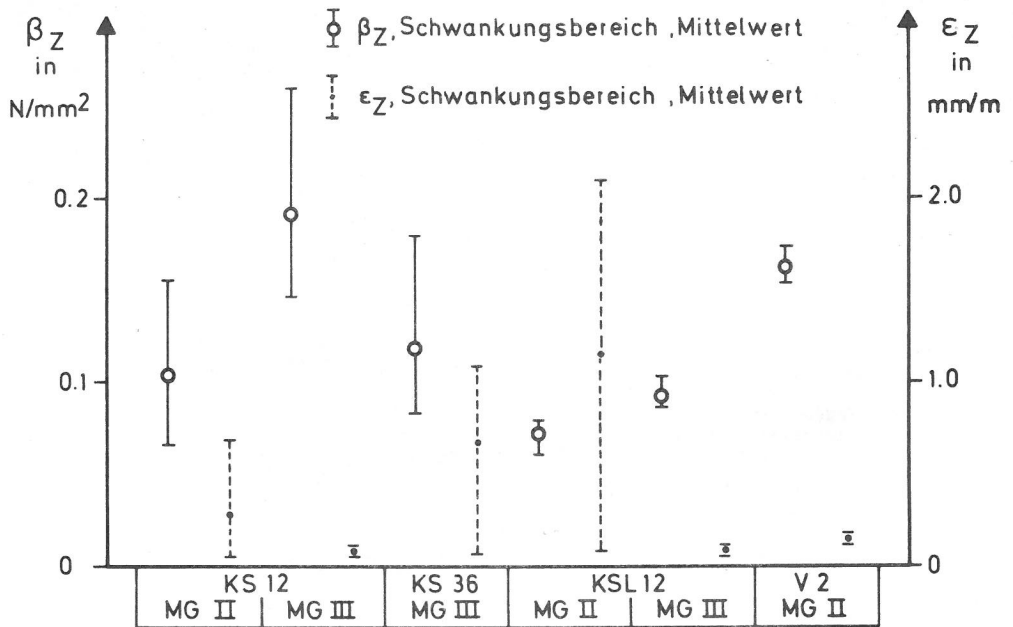


Bild 8: Zugfestigkeit  $\beta_Z$  und Dehnung  $\epsilon_Z$  bei  $\beta_Z$

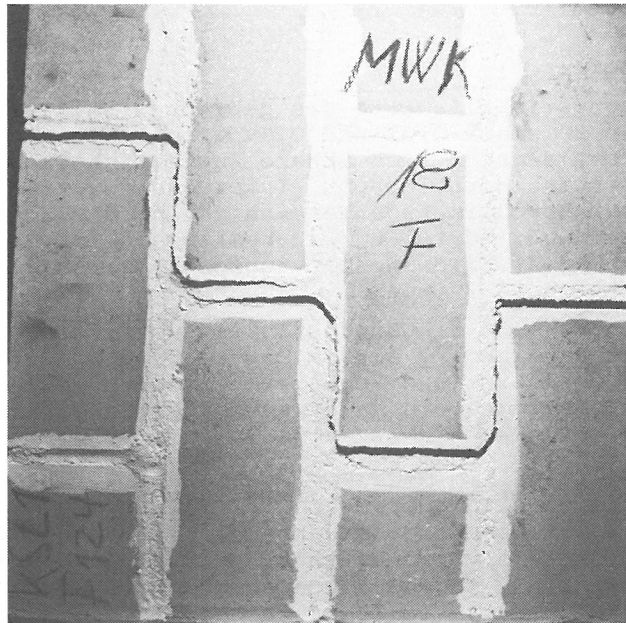


Bild 9: Rißbild eines Mauerwerkkörpers aus KSL12 und MG III

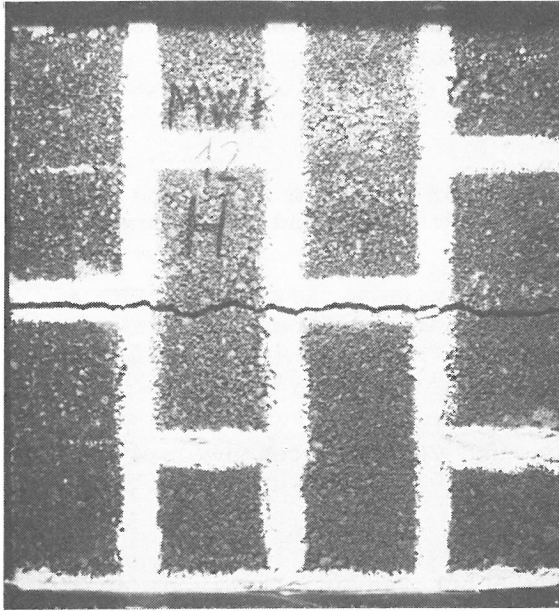


Bild 10: Rißbild eines Mauerwerkkörpers aus V2 und MG II

Wie die einzelnen  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien zeigen, treten im oberen Zugspannungsbereich mehr oder weniger ausgeprägte Unstetigkeiten auf (Bild 5, Pfeil), die vermutlich auf beginnende Makrorißbildung zurückzuführen sind. Die Spannung bei Beginn dieser Unstetigkeiten wird mit  $\sigma_{z,krit}$  bezeichnet. Oberhalb von  $\sigma_{z,krit}$  weicht die  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie meist deutlich vom vorausgegangenen annähernd linearen Verlauf ab. Die Werte für  $\sigma_{z,krit}$  und der dazugehörigen Dehnung sind mit in der Tabelle 2 angegeben. Der Verhältniswert  $\sigma_{z,krit}/\beta_z$  ist meist größer als  $2/3$ , zum Teil aber auch deutlich kleiner. Durch  $\sigma_{z,krit}$  wird vermutlich der annähernd lineare Bereich der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie nach oben begrenzt.

#### 4.3.3 Dehnung bei $\beta_z$ , E-Modul

Die bei  $\beta_z$  ermittelten Dehnungswerte  $\epsilon_z$  streuen sehr stark (Bild 8). Sie liegen zwischen  $0,05$  und  $2,09$  mm/m, meist unter  $0,2$  mm/m. Die große Streuung ist offensichtlich auf die Unterschiede im Bruchbereich zurückzuführen. So ist der Streubereich der  $\epsilon_{krit}$ -Werte mit  $0,01$  bis  $0,09$  mm/m wesentlich kleiner.

Starke Streuungen ergeben sich auch für die  $E_z$ -Modulwerte, die aus  $\sigma_{z,krit}/\epsilon_{z,krit}$  also für den annähernd linearen Bereich der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie errechnet wurden. Ein Vergleich mit den Druck-E-Moduln  $E_D$  aus /5/ bzw. /6/ zeigt, daß  $E_z$  bei Kalksandsteinmauerwerk erheblich kleiner als  $E_D$  ist. Die Verhältniswerte  $E_z/E_D$  betragen im Mittel  $0,16$  bis  $0,68$ . Beim Leichtbetonmauerwerk ist  $E_z/E_D$  dagegen  $1,30$ . Dieser Unterschied ist wahrscheinlich auf die größere Verformbarkeit im Fugenbereich zurückzuführen, wenn  $\beta_a$  für  $\beta_{z,mw}$  maßgebend ist.

Insbesondere die vorgenannten Ergebnisse dürften von großer Bedeutung für die rechnerische Abschätzung der Rißsicherheit von Mauerwerk sein, wo bislang mangels Versuchsergebnissen  $E_Z = E_D$  angesetzt wurde.

#### Literaturhinweise

- /1/ Hedstrom, R. O.:  
Tensile Testing of Concrete Block and Wall Elements, Journal of the PCA. Research and Development Laboratories, May 1966, S. 42...52.
- /2/ Hedstrom, R. O.; Litvin, A.; Hanson, J. A.:  
Influence of Mortar and Block Properties on Shrinkage Cracking of Masonry Walls, Journal of the PCA Research and Development Laboratories, January, 1968, S. 34...51.
- /3/ Schubert, P.; Glitza, H.:  
Festigkeits- und Verformungskennwerte von Mauersteinen und Mauermörtel. Die Bautechnik 56 (1979), H. 10, S. 332...341.
- /4/ Stöckl, E.:  
Versuche zum Schubtragverhalten von Mauerwerk. Proceedings of the V. International Brick Masonry Conference, Washington, USA, 1979, S. 176...178.
- /5/ Schubert, P. und Glitza, H.:  
E-Modul-Werte, Querdehnungszahlen und Bruchdehnungswerte von Mauerwerk. Die Bautechnik 58 (1981), H. 6, S. 181...185.
- /6/ Schubert, P. und Wesche, K.:  
Verformung und Rißsicherheit von Mauerwerk. Mauerwerk-Kalender 1982, S. 111...144. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.