

IV-33. On the Mechanism of Failure of Central Loaded Brick Masonry

P. Probst

früher

Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München,

derzeit

CBP Cronauer Burkei Planung, Beratende Ingenieure GmbH München, W.-Germany

ABSTRACT

It is reported on the inner state of stresses in central loaded brick masonry and the interaction of bricks and mortar up to reaching the ultimate load. From this a failure criterion for central loaded brick masonry is derived.

L'état des tensions en maçonnerie sous pression centrique et l'interaction de la brique et du mortier jusqu' à charge limite sont enregistrés. A partir de là est dérivé un critère de rupture pour maçonnerie sous pression centrique.

Es wird der innere Spannungszustand im zentrisch gedrückten Mauerwerk und das Zusammenwirken von Stein und Mörtel bis zum Erreichen der Bruchlast erfaßt. Daraus wird ein Bruchkriterium für zentrisch gedrücktes Mauerwerk hergeleitet.

Si tratta dello stato di tensione interna di costruzioni in muratura a pressione centrica e dell'interazione di sassi e calcina fino al raggiungimento del peso di rottura. Ne deriva un criterio di rottura per costruzioni in muratura a pressione centrica.

EINLEITUNG

Die bisherigen Bruchtheorien über zentrisch gedrücktes Mauerwerk beruhen zumeist auf der Annahme, daß sich Stein ("masonry unit") und Mörtel ("mortar") elastisch verhalten. Festigkeitshypothesen unter Berücksichtigung des tatsächlichen Materialverhaltens liegen nur von Hilsdorf¹ und Khoo/Hendry² vor. Beide betrachten jedoch ausschließlich Mauerwerksprismen ohne Stoßfugen. Unberücksichtigt bleiben der Einfluß von Stoßfugen und Rissen auf den inneren Spannungszustand, das Verhalten eines Mauerwerksverbandes und ein eventueller verschieblicher Verbund zwischen Stein und Mörtel.

Aus einer umfangreichen Untersuchung des Verfassers über diese Probleme⁴ werden im folgenden die wichtigsten Ergebnisse mitgeteilt.

INNERER SPANNUNGSZUSTAND IM ZENTRISCH GEDRÜCKTEN MAUERWERK

Wie bekannt, setzt sich der Spannungszustand im zentrisch gedrückten Mauerwerk aus vertikalen Druckspannungen infolge äußerer Last und aus horizontalen Zwangsspannungen aufgrund der unterschiedlichen Verformungseigenschaften der Komponenten Stein und Mörtel zusammen. Dabei führt in der Regel die größere Verformbarkeit des Mörtels zu Querkzugspannungen im Stein und zu Querkdruckspannungen im Mörtel, d. h. der Stein unterliegt im Mauerwerk einer dreiachsigen Beanspruchung aus Druck-Zug-Zug und der Mörtel einer dreiachsigen Druckbeanspruchung.

Zur Untersuchung des inneren Spannungszustandes im Mauerwerk wurden vom Verfasser umfangreiche Berechnungen mit der Methode der finiten Elemente (MFE) und ergänzend dazu spannungsoptische Versuche durchgeführt. Die Berechnungen erfolgten zunächst für einen Scheibenspannungszustand und lineare Spannungsdehnungsbeziehungen.

Folgende Ergebnisse sollen hier dargestellt werden:

Im vertikal belasteten *Mauerwerksprisma ohne Stoßfuge* (Bild 1a) ergibt sich eine Verteilung der Horizontalspannungen nach Bild 2. Die aus der unterschiedlichen Querkdehnfähigkeit von Stein und Mörtel herrührenden Querkzugspannungen im Stein und Querkdruckspannungen im Mörtel werden durch die Schubspannung in der Berührungsfläche Mörtel-Stein übertragen. Die Eintragung beginnt am Rand und klingt nach einer bestimmten Länge ab. Die Schubspannungen werden dann zu Null und die Horizontalspannungen bleiben auf einem konstanten Wert. Auf einen "Eintragungsbereich" am Rand folgt also ein "ungestörter Bereich" in der Mitte, in dem konstante Querspannungen ("Grundspannungen") wirken.

Der Einfluß einer *Stoßfuge im Mauerwerksprisma* (Bild 1b) auf den inneren Spannungszustand ist aus Bild 3 zu erkennen. Die durch die Stoßfuge verursachten Abweichungen der Horizontalspannungen vom Fall ohne Stoßfuge sind schraffiert dargestellt. Der Bereich, in dem die Abweichungen auftreten, wird als "Einflußbereich Stoßfuge" definiert. Die Querkzugspannung im durchgehenden Stein unter der Stoßfuge sinkt in der Symmetrieachse ab und erhöht sich in geringem Abstand von der Symmetrieachse.

Im Mörtel der Stoßfuge tritt eine Querkzugspannung auf, die größer ist als bei einem durchgehenden Stein an derselben Stelle.

Zur Klärung des Einflusses eines *vertikalen Risses im Stein bzw. in der Stoßfuge* (Bild 1c) auf die innere Spannungsverteilung wurden die Fälle "Stein gerissen" und "Stoßfuge gerissen" berechnet. In beiden Fällen ergibt sich am durchgehenden Stein unter dem Riß ungefähr eine Verdoppelung der Querkzugspannungen des "ungestörten Bereiches". Die Abweichungen der Horizontalspannungen vom Fall ohne Riß sind für den Fall "Stein gerissen" in Bild 4 schraffiert dargestellt. Die Ausdehnung dieser Störungen wird als "*Einflußbereich Riß*" definiert.

Die Untersuchung der Spannungsverteilung in einer vertikal belasteten *Mauerwerkswand* erfolgte für verschiedene Verbände. Für den *Läuferverband* ergibt sich eine Abweichung der Horizontalspannungen von der "Grundspannung" des "ungestörten Bereiches" nach Bild 5. Als wichtigstes Ergebnis kann festgehalten werden, daß sich die Mauerwerksverbände im Innern ähnlich verhalten wie ein Mauerwerksprisma mit Stoßfuge. Die Horizontalspannungen im Bereich der Stoßfugen entsprechen den Horizontalspannungen im "Eintragungsbereich Stoßfuge" beim Mauerwerksprisma. Bei genügend großer Entfernung vom freien Rand und vom Einflußbereich der Stoßfugen (d. h. bei langen Steinen wie beim Läuferverband) werden die Querkzug- bzw. Querdrukspannungen des "ungestörten Bereiches" erreicht.

Die *spannungsoptischen Versuche* erfolgten an räumlichen Modellen von Mauerwerksprismen (Steine aus Araldit B und Mörtelfugen aus Kautschuk). Für die Analyse der Spannungen wurde das sogenannte "Einfrierverfahren" benutzt. Bild 6 zeigt die erhaltenen Isochromatenbilder für die Fälle Mauerwerksprisma ohne Stoßfuge, mit Stoßfuge und Stein gerissen. Die Ergebnisse aus der Berechnung mit MFE konnten bestätigt werden.

Der Einfluß eines *verschieblichen Verbundes zwischen Stein und Mörtellagen* auf den inneren Spannungszustand wurde unter Annahme einer linearen τ - Δ -Beziehung mit der Methode der finiten Elemente untersucht. Die sich ergebenden Horizontalspannungen sind in Bild 7 mit dem Ergebnis für unverschieblichen Verbund verglichen. Durch den verschieblichen Verbund werden die Querkzugspannungen im Stein und die Querdrukspannungen im Mörtel der Lagerfuge abgebaut. Mit zunehmender Entfernung vom freien Rand und dementsprechend abnehmender Relativverschiebung wird der Einfluß des verschieblichen Verbundes geringer. Trotz Annahme einer geringen Steifigkeit beim verwendeten Verbundgesetz werden im Mittelbereich die "Grundwerte" des "ungestörten Bereiches" nahezu erreicht.

Wie erwähnt, erfolgte die bisherige Berechnung mit einem Scheibenspannungszustand. Für einen einfachen Fall (Mauerwerksprisma ohne Stoßfuge) wurde durch die Berechnung mit MFE für einen räumlichen Spannungszustand der entstehende Fehler überprüft. Die ermittelten Abweichungen verändern den Verlauf der bisher gezeigten Spannungsverteilungen nur unwesentlich. Durch das *nichtlineare Materialverhalten*, besonders des Mörtels bei Annäherung an den Bruchzustand, erfolgt gegenüber den gezeigten Ergebnissen ein Abbau der Spannungsspitzen in

den Bereichen "Eintragungsbereich Rand," "Einflußbereich Stoßfuge" und "Einflußbereich Riß." Ein genauer rechnerischer Nachweis dieses Einflusses mit der Methode der finiten Elemente ist erst sinnvoll, wenn die Stoffgesetze für Stein und Mörtel bei mehrachsiger Beanspruchung durch eine ausreichende Zahl von Versuchsergebnissen belegt sind.

VERSUCHE ZUR DREIACHSIGEN FESTIGKEIT VON STEIN UND MÖRTEL

Zur Erfassung des Verhaltens von Stein und Mörtel im dreiachsigen Spannungszustand können mit der am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München vorhandenen dreiachsigen Prüfmaschine Versuche an Stein und Mörtel im Druck-Zug-Bereich bzw. Druck-Druck-Druck-Bereich durchgeführt werden. Es wurden dreiachsige Druckversuche an Mörtel der Gruppe IIa mit Probekörpern 10/10/10 cm durchgeführt. Die Ergebnisse (Bild 8) liegen im Bereich der Versuchsergebnisse von Khoo/Hendry². Bei den Steinversuchen konnte auf Ergebnisse von Linse/Stegbauer³ an Leichtbeton und Gasbetonsteinen zurückgegriffen werden (Bild 9, Leichtbetonsteine).

Diese Versuchsergebnisse wurden für die Diskussion des Bruchmechanismus herangezogen. Weitere Versuche für andere Mörtel- und Steinarten sind noch erforderlich.

VERSUCHE AN MAUERWERKSPRISMEN

Der bereits in den theoretischen Berechnungen untersuchte Einfluß der Stoßfugen auf den Bruchmechanismus und die Mauerwerksfestigkeit wurde für wesentlich gehalten, weil in der Regel die Rißbildung im zentrisch gedrückten Mauerwerk von den Stoßfugen ausgeht. Es wurden deshalb Tastversuche an Mauerwerksprismen ohne Stoßfugen, mit Stoßfugen und mit Stoßfugen ohne Mörtelfüllung ("enger Schlitz") durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 10 in einer Tabelle zusammengefaßt. Je nach Steinart führten die Stoßfugen zwar zu Abminderungen der Rißlast um maximal 40 %, aber nur zu einer Abnahme der Bruchlasten um maximal etwa 10 %.

DISKUSSION DES BRUCHMECHANISMUS

Die Erkenntnisse aus den verschiedenen genannten Teiluntersuchungen wurden auf einen nach Hilsdorf¹ und Khoo/Hendry² erneute Diskussion des Bruchprozesses angewendet.

Die beiden *Einzelkomponenten des Baustoffes Mauerwerk* unterscheiden sich grundsätzlich in ihrem Bruchverhalten. Der Wandbaustein ist in der Regel ein spröder Werkstoff, bei dem eine Grenzspannungskombination den Bruch herbeiführt. Der Mörtel kann ähnlich wie Beton näherungsweise als zäher Werkstoff angesehen werden, der vor dem Bruch plastisches Verhalten zeigt. Beim Bruchmechanismus von Mauerwerk stellt sich die Frage, wie sich die beiden Komponenten Wandbaustein und Mörtel beim Zusammenwirken im Mauerwerk verhalten und welche Vorgänge den Bruch des Mauerwerks auslösen.

Wie die bisherigen Untersuchungen zeigen, ist der innere *Spannungszustand im Mauerwerk nicht homogen*. Der

innere Spannungszustand soll in einem Gedankenmodell folgendermaßen unterteilt werden:

Man kann vom "ungestörten Bereich" mit den sogenannten "*Grundspannungen*" ausgehen, in dem die Querspannungen in Stein und Mörtel einen konstanten Wert besitzen. Die "*Grundspannungen*" werden durch "*Störungen*" überlagert, d. h. es gibt *systematische Abweichungen* von der Grundspannung wie den Randeinfluß mit dem Eintragungsbereich der Querspannungen, den Einfluß der Stoßfugen und den Einfluß von Vertikalrisen sowohl in den Stoßfugen als auch in den Steinen. Dieser "systematische" Spannungszustand wird wiederum überlagert durch *Spannungsabweichungen aufgrund von Streuungen* der Festigkeits- und Modulwerte von Stein und Mörtel, von Streuungen in den Steinabmessungen und Fugendicken und von Streuungen in der Qualität der Steinbettung.

Zur Erörterung des grundsätzlichen Zusammenwirkens von Stein und Mörtel wird zunächst von den "Grundspannungen", d. h. von einer konstanten Verteilung der Querspannungen ausgegangen. Unter dieser Voraussetzung läßt sich der Bruchprozeß nach Bild 11 darstellen.

Bild 11a zeigt das aus dreiachsigen Versuchen zu gewinnende Spannungsdehnungsgesetz für den Stein im Druck-Zug-Zug-Bereich. Dieses Diagramm kann aus Bild 9 hergeleitet werden. Im vorliegenden Fall wurden zur Verdeutlichung der Zusammenhänge nur qualitative Werte verwendet. Das Bild enthält für das Feld der möglichen Spannungs-kombinationen Linien gleicher Querdehnung sowie die einhüllende Bruchkurve.

Bild 11b zeigt die gleichen Zusammenhänge für den Mörtel im Druck-Druck-Druck-Bereich. Die an der vertikalen Achse erscheinende einachsige Druckfestigkeit ist beim Mörtel (Bild 11b) in der Regel kleiner als beim Stein (Bild 11a).

In Bild 11c sind die Spannungen im Stein (Bild 11a) und im Mörtel (Bild 11b) unter Berücksichtigung des horizontalen Kräftegleichgewichts im Mauerwerk miteinander verknüpft. Dabei müssen, wenn man als Bezugsgröße die Querzugspannungen des Steins wählt, die Querdruckspannungen im Mörtel (Bild 11b) mit dem Faktor h_m/h_s multipliziert werden.

Stellt man nun die Entwicklung der Spannungen im Stein bei Belastung bis zum Bruch unter den obengenannten Voraussetzungen dar, so ist außerdem die Verträglichkeit der Querdehnungen zu berücksichtigen. Damit verläuft der Spannungszustand im Stein (Bild 11c) entlang der gestrichelten Kurve, die die Verbindungslinie gleicher Querdehnungen in Stein und Mörtel darstellt. In Punkt B wird die Grenzspannungskombination für den Stein erreicht, die zum vertikalen Aufreißen des Steines führt.

Aufgrund der angenommenen gleichmäßigen Spannungsverteilung erfolgt der Bruch theoretisch an allen Punkten gleichzeitig. Durch die "systematischen" Spannungsabweichungen (z. B. Randeinfluß, Stoßfugen, vorhandene Vertikalrisse) und die Spannungsabweichungen aufgrund von Streuungen entsteht jedoch eine zeitliche Aufeinanderfolge von vertikalen Rissen an verschiedenen Stellen. Diese beeinflussen sich gegenseitig. Vorhandene Risse neigen durch die Spannungsstörung, die sie hervorrufen, zur Fortpflanzung im gegenüberliegenden Stein. Ist ein genügend großer Bereich durch fortgeschrittene Rißbildung in seiner Tragfähigkeit soweit erschöpft, daß der Restquerschnitt die Last nicht mehr tragen kann, so tritt der Bruch des gesamten Mauerwerks ein.

Durch die genannten Abweichungen wird die tatsächlich im Mauerwerk zu erreichende Druckfestigkeit etwas unter der theoretischen Druckfestigkeit des Punktes B liegen.

Ein gleichzeitiges Erreichen der Grenzspannungskombination im Stein und der Fließgrenze des Mörtels (Punkt A in Bild 11c) ist unwahrscheinlich. Die Querdruckspannung im Mörtel, die notwendig ist, um diese hohe Normalspannung zu erreichen, ist bereits mit Querdehnungen verknüpft, die der Stein nicht mehr ertragen kann. Primär wird immer die vertikale Rißbildung im Stein infolge der auftretenden Grenzspannungskombination sein. Ebenso ist ein eventuelles Querfließen des Mörtels aufgrund mangelnder Querdehnungsbehinderung über die Fugenhöhe nicht vorstellbar. Der Mörtel in der Lagerfuge muß wegen des günstigen Verhältnisses von Fugendicke zu Fugenbreite von $\leq 1/10$ als gleichmäßig umschnürt angesehen werden. Der nicht eingeschnürte Randbereich fällt im Vergleich zur Gesamtbreite nicht ins Gewicht.

Eine detaillierte Darstellung der hier verkürzt vorgetragenen Bruchbeschreibung findet sich in.⁴

LITERATUR

1. Hilsdorf, H.: Investigation into the Failure Mechanism of Brick Masonry Loaded in Axial Compression, Proceedings of International Conference on Masonry Structural Systems, Texas, Nov. 1967
2. Khoo, C.L., Hendry, A.W.: Ein Bruchkriterium für zentrisch belastetes Ziegelmauerwerk, 3. Internationale Mauerwerkskonferenz, Essen, 1973, Dokumentation, S. 139–145
3. Linse, D., Stegbauer, A.: Festigkeit und Verformungsverhalten von Leichtbeton, Gasbeton, Zementstein und Gips unter zweiachsigen Kurzzeitbeanspruchungen, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 254, Verlag Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin, 1976
4. Probst, P.: Ein Beitrag zum Bruchmechanismus von zentrisch gedrücktem Mauerwerk, Bericht, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 1979

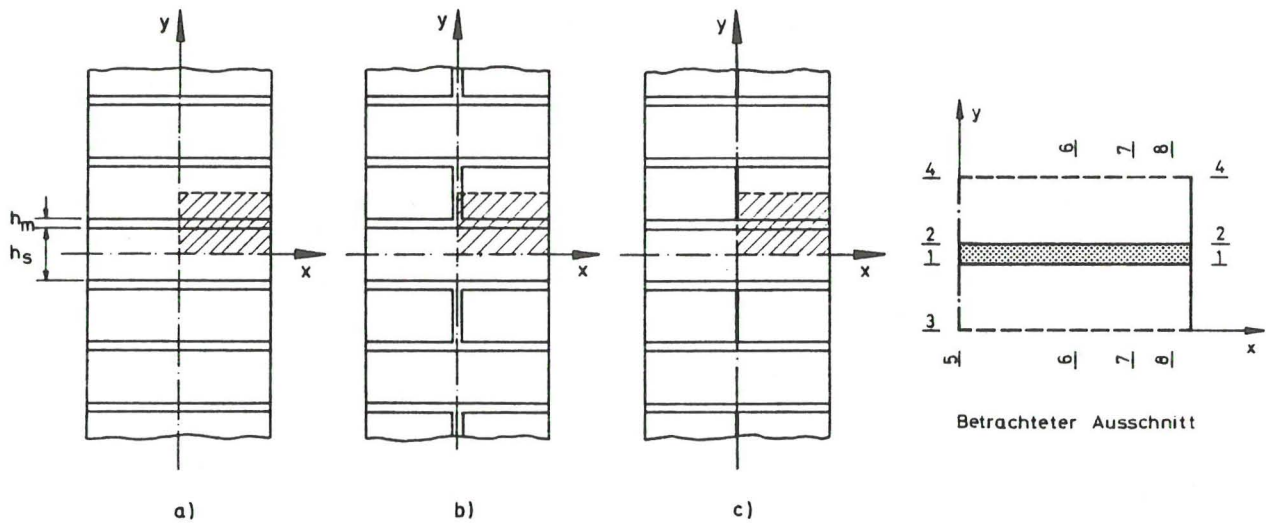


Bild 1. Mauerwerksprisma mit betrachtetem Ausschnitt

- a) ohne Stoßfuge
- b) mit Stoßfuge
- c) enger Schlitz (bzw. Stein gerissen)

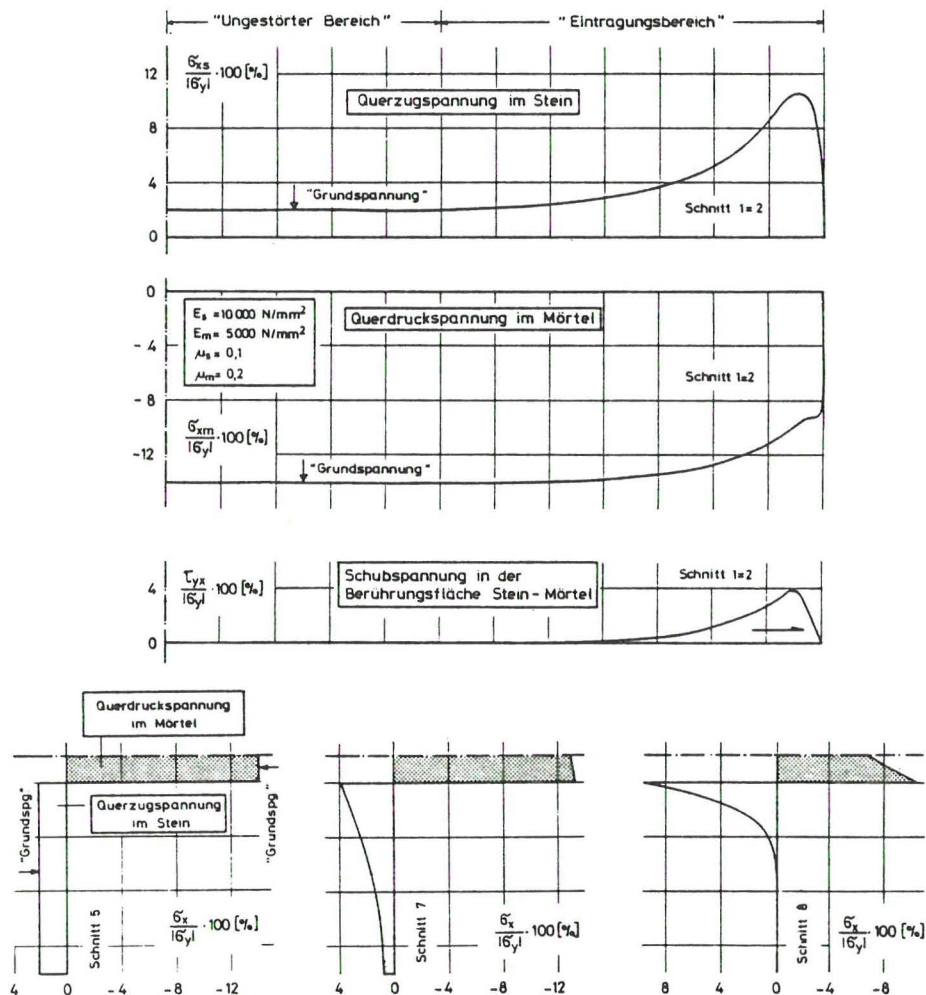


Bild 2. Verteilung der Horizontalspannungen im Mauerwerksprisma ohne Stoßfuge bei vertikalem Druck

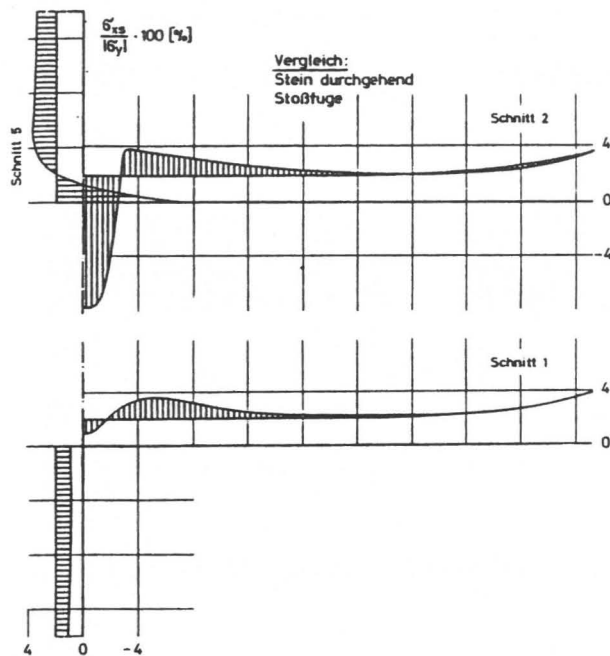


Bild 3. Differenz der Horizontalspannungen im Mauerwerksprisma bei vertikalem Druck für die Fälle ohne und mit Stoßfuge (Rechenannahmen wie in Bild 2)

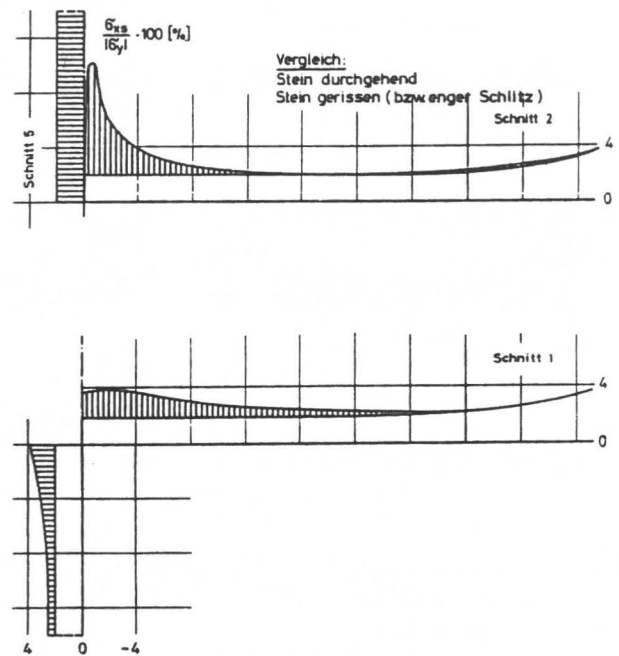


Bild 4. Differenz der Horizontalspannungen im Mauerwerksprisma bei vertikalem Druck für die Fälle "Stein" und "Stein gerissen", (Rechenannahmen wie in Bild 2)

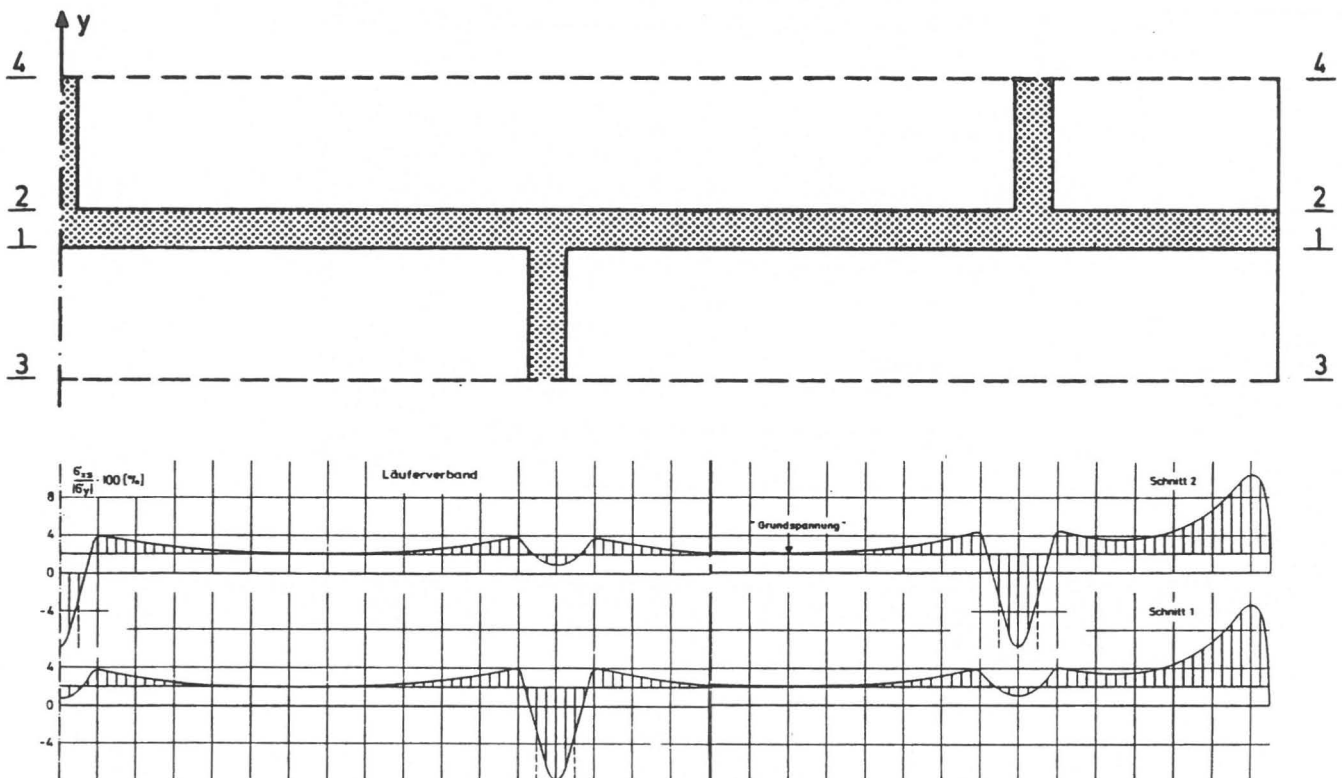


Bild 5. Abweichungen der Horizontalspannungen im Mauerwerksverband bei vertikalem Druck von der "Grundspannung," dargestellt für Läuferverband (Rechenannahmen wie in Bild 2)

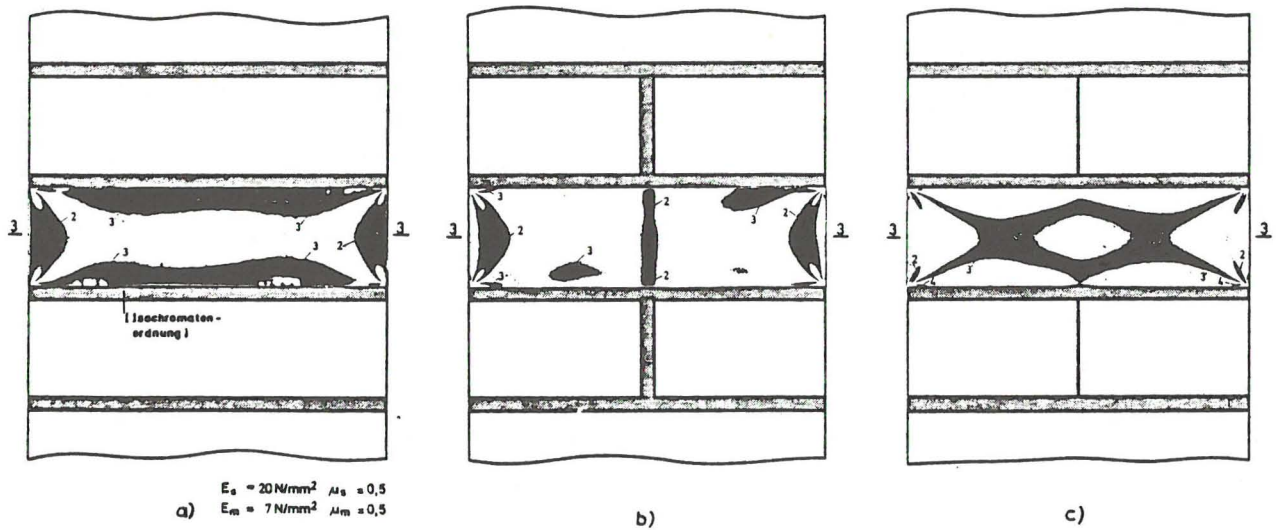


Bild 6. Isochromatenbilder aus den spannungsoptischen Versuchen an Mauerwerksprismen bei vertikalem Druck
a) ohne Stoßfuge
b) mit Stoßfuge
c) enger Schlitz (bzw. Stein gerissen)

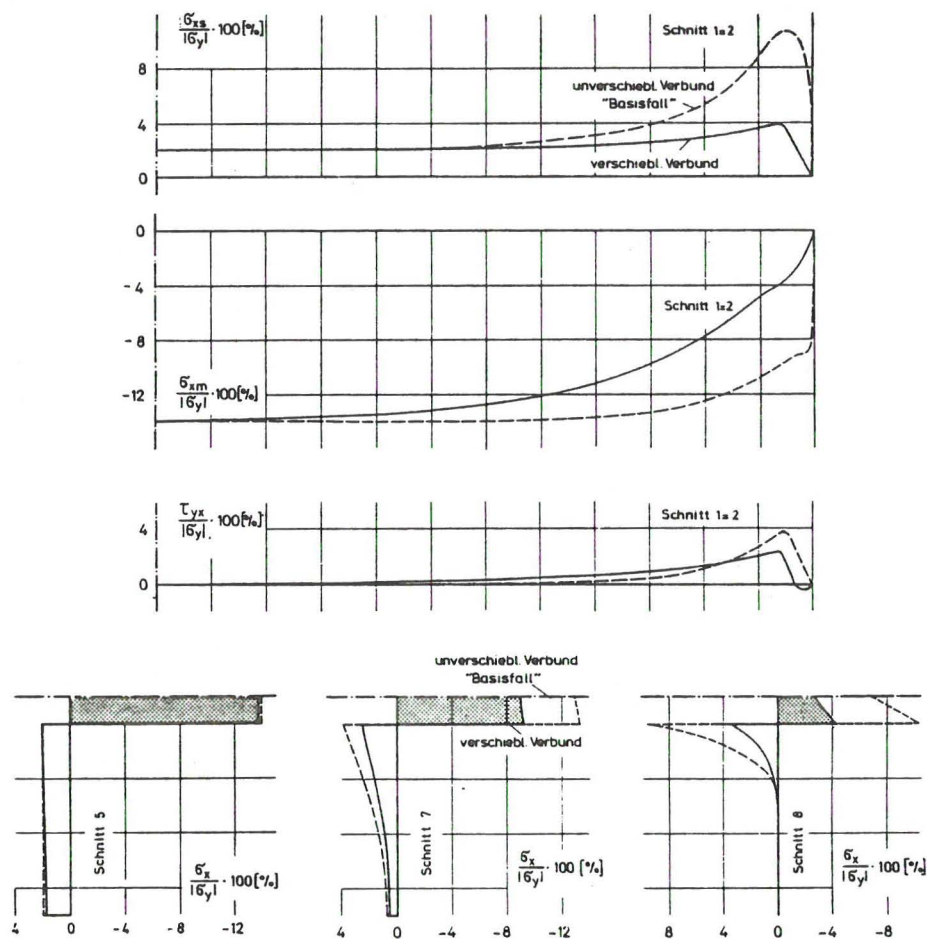


Bild 7. Verteilung der Horizontalspannungen im Mauerwerksprisma bei vertikalem Druck für einen verschieblichen Verbund zwischen Stein und Mörtelfuge (Berechnung mit MFE)

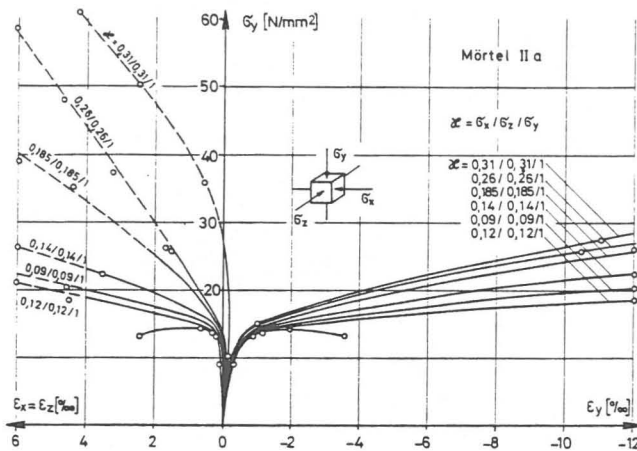


Bild 8. Spannungsdehnungslinien für Mörtel MG IIa bei dreiachsiger Druckbeanspruchung und verschiedenen Spannungsverhältnissen

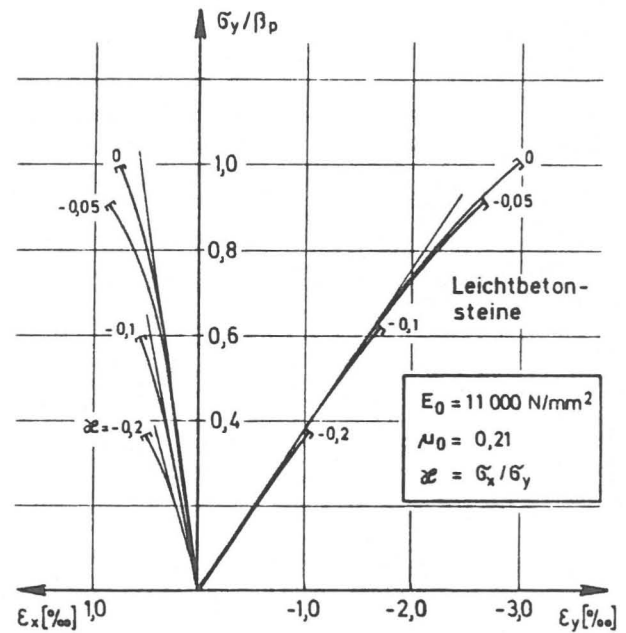


Bild 9. Spannungsdehnungslinien von Leichtbetonsteinen bei Druck-Zug-Beanspruchung und verschiedenen Spannungsverhältnissen, nach Linse/Stegbauer [3] (Druck-Zug-Beanspruchung kann näherungsweise mit Druck-Zug-Zug-Beanspruchung gleichgesetzt werden)

Steinart	Steinform der 2. und 4. Lage	Steinfestigkeit 1) N/mm ²	Mörtelfestigkeit 1) N/mm ²	Mauerwerksfestigkeit 2) N/mm ²	auf Typ a bezogene Bruchlast %	1. Riß an Sollstelle 2) N/mm ²	Verhältnis Rißlast/Bruchlast %
Vollziegel	a	56,95	1,81	17,85	100,0	-	100
Vollziegel	b	56,95	1,81	17,16	96,0	-	100
Vollziegel	c	56,95	1,81	17,17	96,0	-	100
Kalksandstein	a	10,90	2,06	6,95	100,0	-	100
Kalksandstein	b	10,90	2,06	6,24	90,0	4,56	73
Kalksandstein	c	10,90	2,06	6,21	89,4	5,90	95
G 50	a	4,94	2,27	3,77	100,0	-	100
G 50	b	4,94	2,27	3,50	92,8	2,00	57
G 50	c	4,94	2,27	3,48	92,4	-	-

1) Mittelwerte aus 6 Einzelwerten

2) Mittelwerte aus 3 Einzelwerten

Bild 10. Tabelle der Versuchsergebnisse an Mauerwerksprismen (5-Stein hoch)

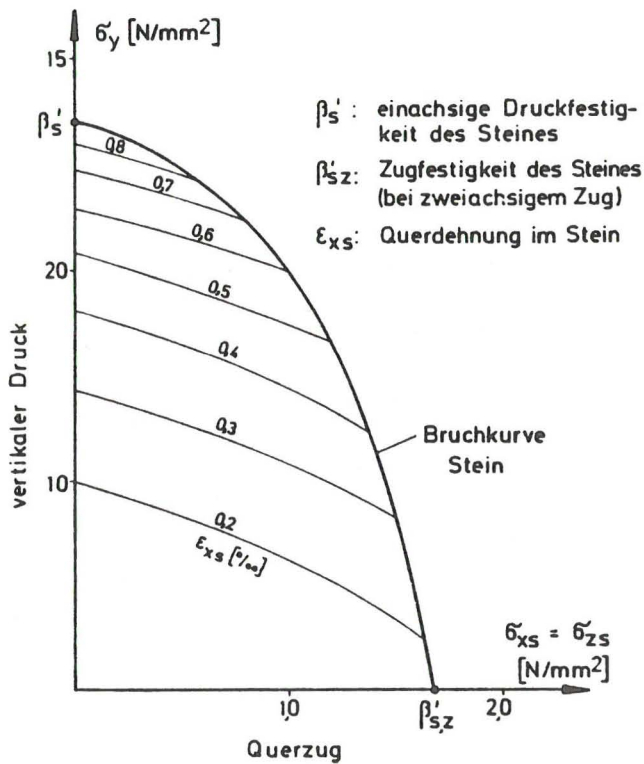


Bild 11a. Hauptspannungsbeziehungen für den Stein unter Druck-Zug-Zug-Beanspruchung bei verschiedenen Dehnungszuständen (qualitativ)

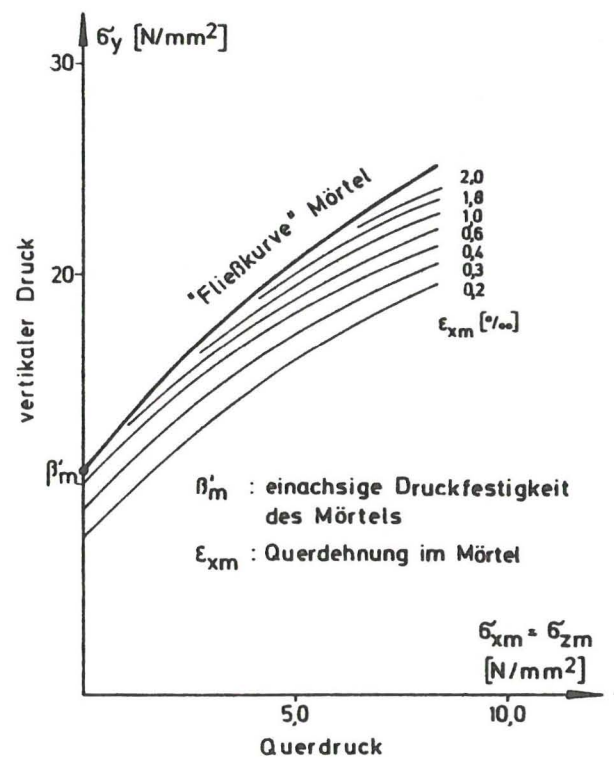


Bild 11b. Hauptspannungsbeziehungen für den Mörtel unter Druck-Druck-Druck-Beanspruchung bei verschiedenen Dehnungszuständen (qualitativ)

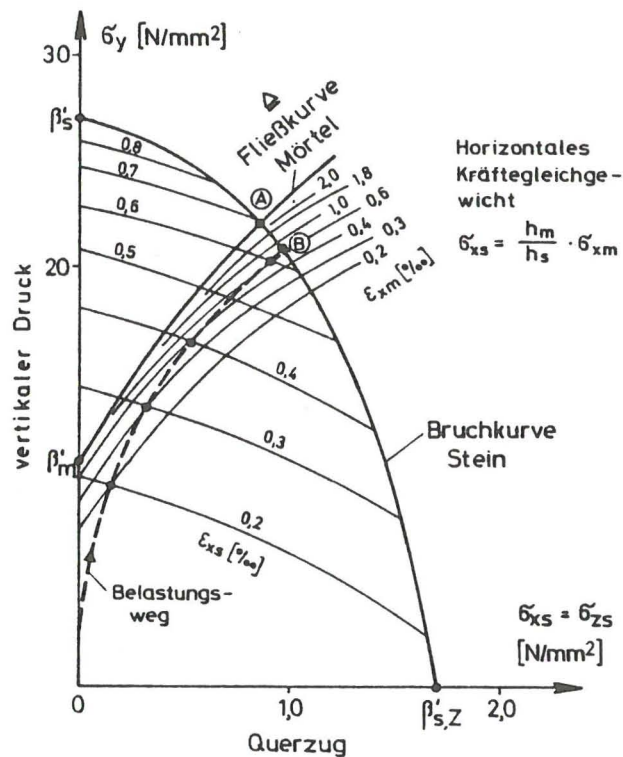


Bild 11c. Theoretische Spannungsentwicklung im Stein bei vertikaler Druckbelastung des Mauerwerks bis zum Bruch