Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 102 (1984)

Heft: 45

Artikel: Der Widerstand von Mauerwerk aus Backstein und Kalksandstein gegen Schubkräfte

Autor: Haller, Paul

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-75560

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Der Widerstand von Mauerwerk aus Backstein und Kalksandstein gegen Schubkräfte

Von Paul Haller, Zürich

Zweck der Versuche mit insgesamt 94 Versuchsmauern aus Backstein und Kalksandstein war die Bereitstellung von Versuchswerten zum Festlegen der zulässigen Scherspannungen in der Neufassung der SIA-Norm 113/177.
Die eine Rissbildung und damit den Bruch des Mauerwerkes auslösende Zughauptspannung steigt analog der mittleren Schubspannung bei höherer Normalspannung weniger steil an. Nach der Lösung der kohäsiven Verbindung von Stein und Mörtel beginnen Reibungsspannungen nach Coulomb proportional den Normalspannungen zu wirken. Die Schubspannungen erfahren dabei über die Mauerlänge eine Umlagerung von der parabolischen zur dreiecksförmigen Verteilung.
Die Verformungsmessungen in den vier Hauptrichtungen haben die Linearität nach Hooke zwischen Normalspannungen und den gemessenen Verformungsgrössen auch beim fachgemäss erstellten Zweistoffsystem-Mauerwerk schon 10 bis 20% unterhalb der Bruchspannungen feststellen lassen.

Einleitung

Bauwerke sind ausser der *vertikal* wirkenden Erdanziehung auch *horizontal* angreifenden Kräften ausgesetzt. Böenartiger oder längerfristig wirkender *Winddruck,* in unserem Land durch tektonische Vorgänge meist als *Oberflächenwellen* ausgelöste Erdbeben, auch *Schwingungen erzeugende Maschinen* beanspruchen die Bauwerke in horizontaler Richtung. Aber auch physikalische Vorgänge, wie *Temperaturänderungen, Trocknen schwindfähiger Baumaterialien,* verursachen schiebende Kraftwirkungen.

Im Gegensatz zu den vertikal wirkenden Eigen- und Nutzlasten, auch *Schneelasten,* die senkrecht zu den Lagerfugen des Mauerwerks nur *Druckspannungen* hervorrufen, erzeugen die Horizontalkräfte Schubspannungen, die ihrerseits in der $\pi/4$-Richtung zur Schubkraft Hauptzug- und -druckspannungen auslösen. Beim Bruch wird die intermolekulare Zugbindung, die bei den üblichen, spröden Baustoffen ohnehin nur einen Bruchteil der Druckfestigkeit beträgt, gelöst.

Mit einer Versuchsreihe A soll das Verhalten des Mauerwerks beim Wirken einer Kraft H in der Mauerebene untersucht werden. Vor allem sollen die Ursachen sowie die Art und Weise des Nachlassens des Widerstandes erkannt werden, nicht zuletzt um durch Verbesserungen am Aufbau der beiden Komponenten *Mauerstein* und *Mauermörtel* den Schubwiderstand des Mauerwerks steigern zu können. Die praxisnahen Versuche lassen den Kraftverlauf in der Mauer errechnen und geben mit dem Rissbild beim Bruch des Mauerwerks über dessen Ursachen weitgehenden Aufschluss. Zahlenmässig lassen sich jedoch die Bruchspannungen nur sehr angenähert berechnen.

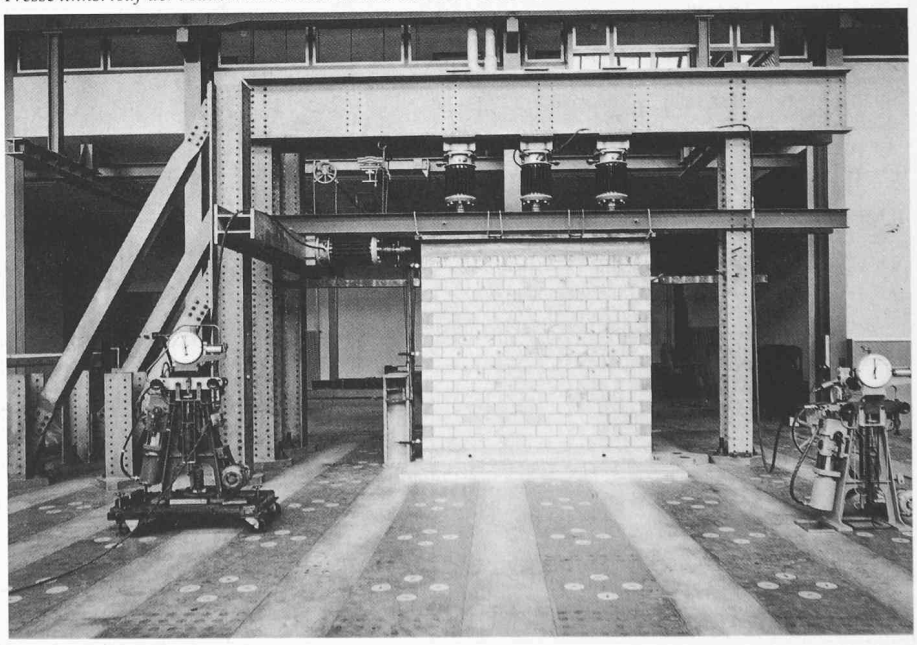
Mittels einer zweiten Versuchsreihe B können dagegen die Schubspannungen, sogar bei verschieden hohen Normalspannungen, zahlenmässig erfasst werden. Ein weiterer Anstoss für die Durchführung der zweiten Versuchsreihe war die *Kostenminderung* sogar bei der grösseren Anzahl der leichter zu handhabenden Versuchkörper. Die Untersuchung wurde an Backsteinen in Sonder- und Normalqualität und an gelochten und vollen Kalksandsteinen in normaler und hochwertiger Güte durchgeführt. Auch den Einfluss der Mauerdicke und der Steinhöhe auf den Widerstand des Mauerwerkes gegen schiebende Kräfte zu ermitteln war Gegenstand der Versuchsreihe B.

Der Scherwiderstand des Mauerwerks

Eine Horizontalkraft H, in der Mauerebene wirkend, erzeugt im Mauerstein, in der Haftfläche und in der Mörtelschicht Schubspannungen, die in beiden Komponenten Stein und Mörtel unter dem Winkel $\pi/4$ zur Kraft wirkende Hauptzug- und -druckspannungen hervorrufen.

Gegen diese den Bruch des Mauerwerks auslösenden Hauptzugspannungen bieten die molekularen Bindekräfte zunächst Widerstand. Im Augenblick, da die Zugfestigkeit des Mörtels oder des Mauersteins überwunden wird, beginnt ein *Reibungswiderstand* zu wirken, sofern eine Normalkraft wirksam ist. Anstelle der Zugfestigkeit übernimmt die Reibung den Scherwiderstand, d.i. der Schubwiderstand bei gleichzeitiger Normalbelastung. Der Maximalwert des Haftreibungswiderstands ist in dem Augenblick erreicht, da ein Gleiten im Mauerwerkkörper einsetzt, dieser aufreisst und zerstört wird. Die für die Zerstörung des Mauerwerks massgebende Hauptzugspan-

Bild 1. Mauer Nr. 2 aus Backstein der Sonderqualität auf dem Aufspannboden der EMPA. Vertikallast: drei 1-MN-Presstöpfe, an rechts stehender Presse angeschlossen. Horizontalkraft: ein 1-MN-Presstopf, mit Presse links. Auf der Mauer: zwei Messrosetten mit vier Messstrecken von 20 Zoll



nung σ_z lässt sich im Festigkeitsbereich wie folgt berechnen:

$$\sigma_z = \frac{\sigma_n}{2}\left[\sqrt{4\left(\frac{\bar{\tau}}{\sigma_n}\right)^2 + 1} - 1\right]$$

σ_n = Normalspannung in [N/mm²]
$\bar{\tau}$ = mittlere Scherspannung in [N/mm²]

Im Reibungsbereich kommt anstelle von $\bar{\tau}/\sigma_n$ der *Haftreibungsbeiwert* μ zum Zug. In beiden Bereichen verkleinert sich die Hauptzugspannung mit steigender Normalspannung, weshalb der Bruch erst bei entsprechend höherer Scherspannung eintritt. Beim fliessenden Übergang vom Festigkeits- zum Reibungsbereich erfolgt eine Umlagerung der Spannungen. Die parabolisch verteilten Scherspannungen τ flachen sich zur gleichmässig verteilten Haftreibungsspannungen ab.

Versuchsanordnung und Aufbau der Versuchswände

Versuchsreihe A

Sechs Versuchsmauern, Grösse mit Verteilbalken: 2,90 · 2,90 m, Dicke: 15 cm, Verteilbalken am Fuss und Kopf der Mauer: 290 · 20 · 15 cm, Prüfort: Aufspannboden der EMPA, Vertikallast: drei 1-MN-Presstöpfe an der gleichen Presse angeschlossen, Horizontalkraft: in halber Höhe des Kopfbalkens angreifend (Bild 1).

Mauersteine
Grösse 25 · 15 · 13½ cm, Backsteine
Aus Ziegelei A: Sonderqualität
Aus Ziegelei B: Normalqualität
Aus Ziegelei C: Preton-Steine mit Nuten, Sonderqualität

Mörtel
Nr. 1, 2 und 5: Zementmörtel P 400
Nr. 3 und 4: Verlängerter Zementmörtel P 100 + HK 250
Nr. 6: im Werk erstelltes Preton-Mauerwerk, Zementbrei mit dünnen Fugen

Mauerwerk
In der EMPA erstellt und gelagert bei einer Temperatur von 20 °C ±1 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60% ± 2%.

Versuchsreihe B

86 Versuchsmauern, Grösse: Höhe 160 cm, Länge 140 cm, Dicke 12, 15 und 18 cm

Mauersteine (vgl. Tabelle 1)
Mörtel
MBS, MKN und MKH mit Zementmörtel P 400
MBN mit verlängertem Zementmörtel P 100 + HK 250

Mauerwerk
In der EMPA erstellt, gelagert und geprüft (wie das Mauerwerk von Versuchsreihe A). Prüfung: in der 20-MN-Presse, Versuchsmauer um $\pi/2$ gedreht, mittlerer Teil oben belastet aus fünf Steinlagen (h_s = 13,5); Randteile, Auflager aus je drei Steinlagen. Normallast senkrecht zu den Lagerfugen: zwei 1-MN-Presstöpfe.

Tabelle 1. Grösse der Mauersteine. HL Handloch

Art	*Werk*	*Qualität*	*Abmessungen in cm*			*Bemerkungen*
			Höhe	*Breite*	*Länge*	
Backstein	Paradies	Sonder	13,5	12,15,18	25	15+18 HL
Backstein	Tiergarten	Normal	13,5	12,15,18	25	15+18 HL
Backstein	Tiergarten	Normal	6	12	25	-
Kalksandstein	Hardwald	Normal	13,5	12,15,18	25,25,20	HL
Kalksandstein	Hardwald	Normal	6	12	25	voll
Kalksandstein	Hardwald	Hochwertig	6	15	29	voll

Versuchsergebnisse

Versuchsreihe A

Das Moment der 10 cm unterhalb des Mauerrandes angreifenden, parallel zu den Lagerfugen wirkenden Horizontalkraft H versucht die Mauer um die gegenüberliegende Ecke zu drehen. Mittels einer Vertikallast, Eigen- und Nutzlast, oder mittels eines zurückhaltenden Zugankers beim Auflager kann das Gleichgewicht erreicht werden. Die Verteilung der Reaktionskräfte ist zunächst unbekannt. Da aber, wie nachstehend ersichtlich, die Proportionalität zwischen Spannung und Verformung bis nahe an die Bruchgrenze gewährleistet ist, darf eine *dreieckige Auflagerkraftverteilung* als der Wirklichkeit nahekommende Annahme zugrunde gelegt werden. Das Rissbild (Bild 2), entstanden beim Erreichen der maximalen Horizontalkraft H, lässt eindeutig die Verlagerung der Reaktionskräfte zur Gegenecke erkennen.

Die bisherigen Tragfähigkeitsversuche an Mauerwerken haben feststellen lassen, dass eine Zugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen nicht mit der notwendigen Sicherheit gewährleistet ist. Die Gründe dafür sind: horizontale Rissbildung im Mauerwerk beim ungleichen Austrocknen und Schwinden der Lagerfugen und beim Bewegen anstossender Bauteile, verursacht durch Schwinden oder Temperaturänderungen.

Die *Festigkeit des Mörtels* und vor allem auch sein *Haftvermögen* am Mauerstein sind weitgehend von der Saugfähigkeit des Mauersteins beeinflusst. An wenig saugenden Mauersteinen haftet der erhärtete Mörtel dermassen stark, dass er innert nützlicher Frist auch mit Werkzeugen nicht zur Wiederverwendung ausreichend entfernt werden kann. Im Gegensatz dazu lässt sich der erhärtete Mörtel an Mauersteinen mit hoher Saugfähigkeit leicht vom Stein trennen.

Tabelle 2. Ergebnisse der Versuchsreihe A

Nr.	*Ziegelei*	*Bezeichnung*	*Steindruckfestigkeit* [N/mm²]	*Saugfähigkeit* [g/dm²min]	*Mörtel*	*G+P* [kN]	*H* [kN]	μ τ_b/σ_b	*Wanddicke* [cm]	*Wandlänge* [cm]	*Spannungen* [N/mm²] σ_o	σ_b	τ_b	*Mittlere Neigung Steinrisse rad*
1	A	MBS	49,4	18,3	P400	1298	473	0,364	15	290	2,98	11,45	4,17	-
2						647	278	0,430			1,49	8,66	3,72	0,848
3	B	MBN	<40	>40	P100	647	240	0,371	14,8	283	1,54	6,47	2,40	0,859
4					HK 250	747	268	0,359			1,78	6,99	2,51	0,857
5	C	MBS	56,8	17,7	P400	1298	493	0,380	15	290	2,98	12,49	4,74	0,845
6						1298	515	0,397			2,98	13,81	5,48	0,848

Solange in den Horizontalschnitten unterhalb der Horizontalkraft H keine vertikalen Zugspannungen auftreten, reisst das Mauerwerk nicht horizontal auf. Erst im Mauerteil unterhalb $y = l/6\ \mu$ ($\mu = H/P + G$) zeigen sich nach dem Erschöpfen der allfällig vorhandenen Zugfestigkeit des Mörtels oder in der Haftfläche zwischen Mörtel und Stein horizontale Einrisse.

Die Versuchsmauern werden zunächst mit einer der Qualität des Mauerwerkes angepassten, gleichmässig verteilten Vertikallast P belastet, und erst dann wird die in halber Höhe des Kopfbalkens angreifende Horizontalkraft H in Stufen bis zum Bruch gesteigert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt und können folgendermassen kommentiert werden: Die Scherkraft H steigt praktisch proportional zur Vertikalbelastung $P + G$ an. Die Versuchspunkte scharen sich um die mittels der linearen Regression errechnete Gerade: $H = 10{,}1 + 0{,}3718\ (P + G)$, Bild 3. Eine kohäsive Bindung ist bei der Vertikallast grösser als 500 kN kaum mehr wirksam; der Bruch erfolgt demnach im Reibungsbereich. Der Scherwiderstand im Augenblick des Überwindens der Haftreibung folgt dem Gesetz von Coulomb.

Die beiden Versuchsmauern Nr. 3 und 4, aus Backsteinen normaler Qualität und mit verlängertem Zementmörtel aufgemauert, die mit 647 bzw. 747 kN vertikal belastet waren, lieferten Versuchspunkte, die nur 16 Prozent unterhalb der Geraden für die Sonderqualität liegen. Die Steinqualität und der Mörtel mit geringerer Druckfestigkeit haben demnach einen kleinen Einfluss auf den Scherwiderstand.

Die *Behinderung der Querdehnung der dünnen Lagerfugen* des «Preton»-Mauerwerks aus Sonderbacksteinen hat den Scherwiderstand um 4,5% gegenüber dem Mauerwerk mit den üblichen Fugendicken erhöht. Die *Drucklinie* gibt Auskunft über den Verlauf der Hauptspannungen. Sie beginnt im Angriffspunkt der Horizontalkraft H, verbiegt sich unter der Vertikallast konkav gegen die Auflagerfläche, wechselt an der Spitze des Auflagerdreieckes die Richtung – Wendepunkt – und endet schliesslich in der Gegenecke (Bild 4).

Die *Rissbildung* vermittelt einen Einblick in die Vorgänge beim Eintreten des Bruches der Versuchsmauern. Die Zerstörung beginnt in der Gegenecke des Angriffspunktes der Horizontalkraft H, also dort, wo sich die Kraftlinien konzentrieren und sich der Mörtel entsprechend stärker als der Mauerstein querdehnt, weshalb in diesem Zugspannungen ausgelöst werden. Gleichzeitig und entsprechend der Normalbeanspruchung steigen auch die Reibungsspannungen und damit auch die Hauptzugspannungen. Mit zunehmender Vertikallast dreht sich die Hauptzugspannung mehr und mehr in die Richtung der Zugspannung, erzeugt durch die Behinderung der Querdehnung des Mörtels.

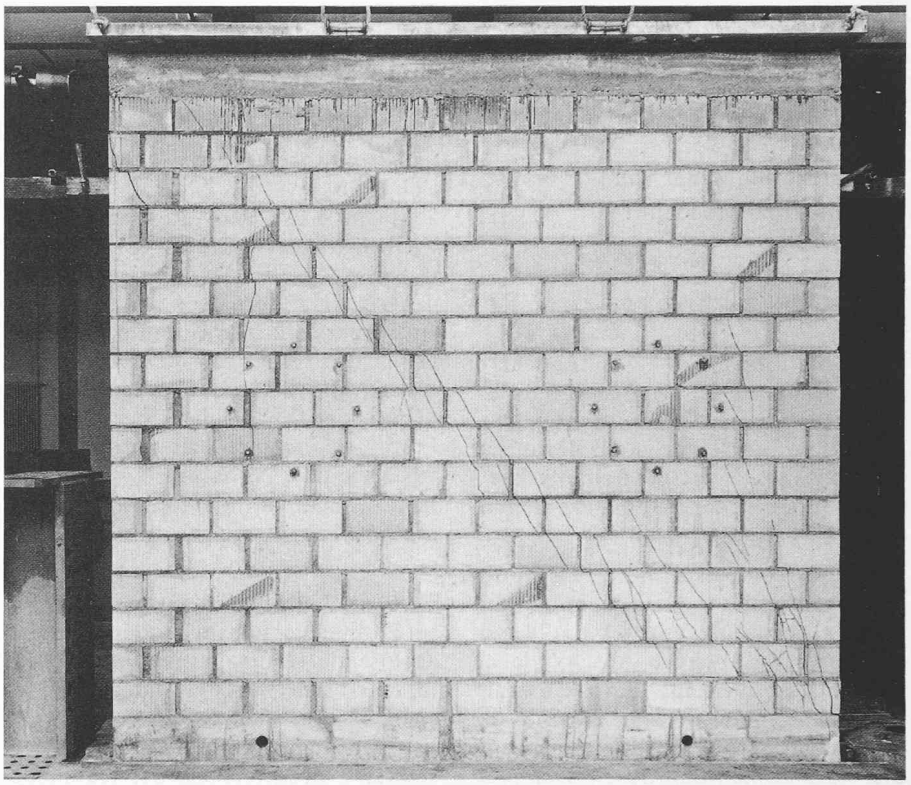


Bild 2. Mauer Nr. 5 aus Preton-Steinen, in der EMPA erstellt und gelagert, im Bruchzustand. Vertikallast: 1280 kN, Horizontalkraft: 493 kN

Beim Erreichen der Zugfestigkeit reissen die Mauersteine auf. Die Neigung der Risse gegen die Vertikale nimmt mit dem abnehmenden Abstand von dem Mauerrand bei wachsender Vertikal- und Reibungsspannung bis auf etwa rad 0,22 ab. Die Hohlräume der Mauersteine und die Stossfugen begünstigen die Rissbildung und beeinflussen auch die Richtung der Risse. Eine Verstärkung der Stege und die Rissfreiheit der Mauersteine erhöhen den Scherwiderstand.

Da die Verteilung der Normal- und der Scherspannungen im Bereich der in Rosetten angeordneten Messstrecken unbekannt ist, wird auf die Auswertung der Verformungsmessungen verzichtet.

Versuchsreihe B

Biegt sich der Mittelteil des Versuchskörpers unter einer gleichmässig verteilten Last P durch, so erfährt dieser eine volle Einspannung in den beiden Randstücken. Das Einspannungsmoment $M_e = (P \cdot a/6)$ wird durch eine Reibungskraft R, wirksam zwischen der Auflagerfläche der Randstücke und

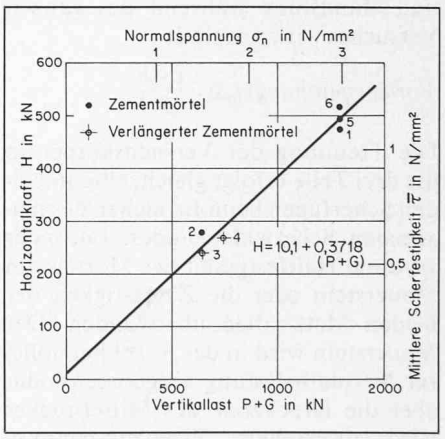
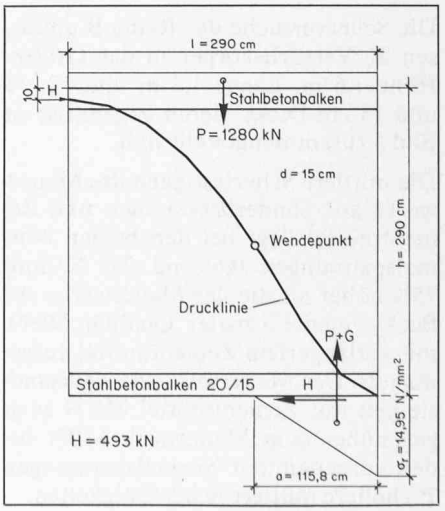


Bild 3. Versuchsergebnisse A. Horizontalkraft H in Abhängigkeit der Vertikallast P+G

Bild 4. Drucklinie = Hauptdruckspannung Wand Nr. 5. H = 493 kN = Bruchkraft



der Unterlage, der unteren Druckplatte der 20-MN-Presse, gewährleistet.

a = halbe Spannweite = 2½ Steinlagen

$R = \frac{14}{33} \bar{\tau}\ dh$ [N]

d = Dicke der Mauer [mm]

h = Höhe der Mauer [mm]

$R = \mu_R \frac{P}{2}$

$\bar{\tau}$ = mittlere Scherfestigkeit [N/mm²]

Die volle Einspannung ist gesichert, wenn der unter der Belastung P in der Kontaktfläche auftretende Reibungskoeffizient μ_R kleiner ist als der durch Versuche ausgewiesene Reibungskoeffizient μ der beiden in Kontakt stehenden Materialien: $\mu_R < \mu$.

Nur bei voller Einspannung erfährt der Scherquerschnitt keine Drehung. Zudem ist der Auflagerdruck der Randstücke über die ganze Auflagerfläche gleichmässig verteilt. Eine einwandfreie Schubspannungsübertragung ist ausserdem dann gewährleistet, wenn die Normalspannung σ_n die Zugspannung am oberen Rand σ_e, erzeugt durch das Einspannmoment, abzudecken vermag, wenn also keine Zugspannungen im Scherquerschnitt zwischen Mittel- und Randstück während des ganzen Versuches wirksam sind:

Vorlastspannung $\sigma_0 \geqq \frac{\bar{\tau} \cdot h}{33\ l}$.

Die Trennung der Versuchskörper in die drei Teile erfolgt gleichzeitig in beiden Scherfugen beim Erreichen des maximalen Scherwiderstandes. Entweder wird die Haftfestigkeit des Mörtels am Mauerstein oder die Zugfestigkeit der beiden Materialien überwunden. Der Mauerstein wird in der Regel bei höherer Normalbelastung aufgerissen, oder aber die Druckzone des Mittelstückes wird ausgeschert. Eigenzugspannungen, Risse in den Stegen, grosse oder ungünstig liegende Hohlräume begünstigen ein frühzeitiges Aufreissen der Mauersteine.

Die Scherversuche der Reihe B umfassen 86 Versuchskörper in der Grösse: Höhe 1,6 m, Länge 1,4 m und 12, 15 und 18 cm Dicke, deren Ergebnisse in Bild 5 zusammengestellt sind.

Die mittlere Scherfestigkeit des Mauerwerks aus Sonderbacksteinen und Zementmörtel liegt bei den beiden Normalspannungen 0,6 und 2,0 N/mm² 75% höher als die des Mauerwerks aus Backsteinen normaler Qualität MBN, mit verlängertem Zementmörtel aufgemauert. Das Mauerwerk aus Kalksandsteinen mit Zementmörtel MKN zeigt gegenüber dem Mauerwerk MBN bei den vorgenannten Normalspannungen 7% höhere mittlere Scherfestigkeiten.

Die mittlere Scherfestigkeit $\bar{\tau}$ wächst mit der Vertikalbelastung σ_n (Bild 6), und zwar bei niedrigeren Normalspannungen rascher als bei höheren. Das Verhältnis $\bar{\tau}/\sigma_n$ nimmt bei kleinen Normalspannungen σ_n rasch ab und nähert sich bei σ_n = 4 bzw. 2 N/mm² der Horizontalen bzw. dem Reibungsbeiwert μ_R. Der Mörtel verliert nach und nach mit dem Anstieg der Normalspannungen σ_n an Haftvermögen und Festigkeit. Im Mauerwerk übernimmt beim Nachlassen der Adhäsions- und Kohäsionsbindekräfte laufend die Reibung den Scherwiderstand. Beim Übergang vom Festigkeits- zum Reibungsbereich wechselt das Verhältnis $\bar{\tau}/\sigma_n$ gegebenenfalls zum reinen Reibungsbeiwert μ_R, wobei eine Umlagerung der $\bar{\tau}$-Werte erfolgt.

Die bei schiebenden Kräften den Bruch im Festigkeits- wie im Reibungsbereich auslösende Hauptzugspannung σ_z vermindert sich bei steigender Normalspannung σ_n. Nach Bild 6 wird tatsächlich der Anstieg der mittleren Scherfestigkeit $\bar{\tau}$ entsprechend der Hauptzugspannung σ_z mit der Normalspannung nachgewiesen. Bei der höchsten Stufe der Normalspannung σ_n ist ein Nachgeben der $\bar{\tau}$-Werte bei allen Mauerwerksarten zu vermerken. Die stärkste Schwächung lässt das MKN, eine etwas kleinere Erschöpfung das MBN und das MBS gerade noch einen wahrzunehmenden Verlust an Scherfestigkeit feststellen.

Die *Verteilung der Scherspannungen* über dem Scherquerschnitt ändert sich beim allmählichen Übergang vom Festigkeits- zum Reibungsbereich. Solange die Adhäsions- und Kohäsionskräfte wirksam sind, verteilen sich die Scherspannungen des Einspannmomentes bis zum Bruch parabolisch über die Höhe des Scherquerschnittes. Der Grösstwert ist über der Nullinie 50% höher als der Durchschnittswert $\bar{\tau}$. Beim Überwinden der Bindekräfte kommt das Gesetz von Coulomb auch bei der Verteilung der Scherspannungen zum Zug. Entsprechend dem allmählichen Wechsel vom Festigkeits- zum Reibungsbereich flacht sich die parabolische zur trapezförmigen Verteilung ab.

Der stärker kapillar saugende Backstein normaler Qualität hat sich bei $\bar{\tau}_n$ = 1,8 N/mm² nur über eine Scherfestigkeit von 58% der des wenig saugenden MBS ausgewiesen. Die Ursache dieser Feststellung ist zum grösseren Teil in der wesentlich höheren Saugfähigkeit des Normalbacksteins, aber auch in der geringeren Festigkeit des Mörtels und des Mauersteins zu suchen. Der noch weniger saugende Kalksandstein als der BS hat bei σ_n = 1,8 N/mm² nur eine 8 Prozent grössere Scherfestigkeit als das MBN feststellen lassen. Offenbar hat sich die kleine Saugfähigkeit des KN-Steines auf das Haftvermögen des Mörtels an diesem Stein ungünstig ausgewirkt.

6 und 13,5 cm hohe Backsteine liefern im Mauerwerkverband praktisch die gleich grossen $\bar{\tau}$-Werte. Das MKN aus Vollsteinen mit 6 cm Höhe hat sich je nach Normalbelastung über zwischen 20 und 40% höhere Scherfestigkeiten als die leicht gelochten K-Steine ausgewiesen. Die hochwertigen, vollen Kalksandsteine (h_s = 6 cm, l = 29 cm, b = 15 cm) haben keine höhere Scherfestigkeit als der ebenfalls volle K-Stein mit normaler Qualität (h_s = 12 cm, l = 25 cm, b = 12 cm) ermitteln lassen.

Die beiden Mauerdicken 15 und 18 cm des MBS sind mit einem Handloch ausgestattet. Sie lassen nur bei den beiden oberen Laststufen: σ_0 = 1,47 und 2,45 N/mm² eine 8 und 20% kleinere Scherfestigkeit als bei der Mauerdicke von 12 cm nachweisen. Ein weiterer wesentlicher Einfluss der Mauerdicke auf die Scherfestigkeit ist nicht auszumachen.

Die Verformungsmessungen wurden aus beiden Seiten der Versuchskörper und über beiden Scherfugen in vier Richtungen mit dem Deformeter mit einer Messlänge von 20 Zoll stufenweise gemessen: Nr. 1 längs der Scherfuge auf dem Mittelstück des Versuchskörpers, Nr. 2 unter einem Winkel $\pi/4$ zu Nr. 1, in der ungefähren Richtung der Hauptdruckspannung, Nr. 3 in der Richtung der Normalspannung und Nr. 4 senkrecht zu Nr. 2, also in der ungefähren Richtung der Hauptzugspannung. Der Mittelpunkt der Rosette liegt 68 cm unter dem oberen Rand des Versuchskörpers.

Bei der Vorbelastung der Versuchsmauern, z.B. der MBS d = 18 cm, senkrecht zu den Lagerfugen bis zu einer Normalspannung σ_n = 2,45 N/mm² zeigt die Messstrecke Nr. 1 eine Querdehnung von ε_1 = 0,06 ‰ an. Bei der darauffolgenden Querkraftbelastung wird nun zunächst die Querdehnung eliminiert; die darauffolgende Stauchung verläuft bis nahe an den Scherbruch gradlinig.

Weniger steil erfolgt die Stauchung ε_2 in der ungefähren Richtung der Hauptdruckspannung. Die bei der Vorlast gestauchte Messstrecke Nr. 3 erfährt durch die Querkraftbelastung zufolge der Querdehnung deutlich eine Ermässigung der Druckverformung. Die Messstrecke Nr. 4 in der ungefähren Richtung der Hauptzugspannungen lässt ein geringes Nachlassen der bei der Vorbelastung gemessenen Druckverformung erkennen. Die zufolge der

ansteigenden Reibungskraft R zunehmende Normalspannung kompensiert nahezu vollständig die Zugbeanspruchung bei der Scherbelastung.

Die Versuchswerte, nach dem linearen Regressionsverfahren ausgewertet, scharen sich um eine Gerade (MBS: $\varepsilon_1 = 0{,}4933\ \sigma_n - 1{,}2646$, $\varepsilon_2 = 0{,}3847\ \sigma_n - 0{,}8489$, $\varepsilon_3 = 0{,}4479 - 0{,}0943\ \sigma_n$, $\varepsilon_4 = 0{,}8787 - 0{,}00672\ \sigma_n$), die bis etwa 90% der Bruchgrenze Gültigkeit hat. Das Zweistoffsystem folgt demnach mit der Scherfestigkeit bis nahe an die Scherbruchgrenze dem Gesetz von Coulomb (Bild 7).

Die Messung Nr. 3 erlaubt die Ermittlung des Verformungsmoduls senkrecht zu den Lagerfugen mittels der Belastungsstufen von σ_0 (Tabelle 3). Der Mittelwert aus 18 Versuchsmauern der drei Belastungsstufen und der drei Mauerdicken des MBS beträgt 11 400 N/mm². Der Mittelwert des MBN aus 12 Versuchskörpern der beiden Belastungsstufen und der drei Mauerdicken ist 8mal kleiner als der des MBS. Das MKN, mit Zementmörtel erstellt, lässt einen 40% kleineren Verformungsmodul ermitteln.

Die intakten Randteile der Versuchskörper wurden in der 20-MN-Presse parallel zu den Lagerfugen der Druckfestigkeitsprüfung und der Verformungsmessung unterworfen (Tabelle 4). Bei der Belastung parallel zu den Lagerfugen können die obersten Steinlagen mangels wirksamer Querverbindung vorzeitig ausknicken, weshalb die Druckfestigkeit und die Verformungs-

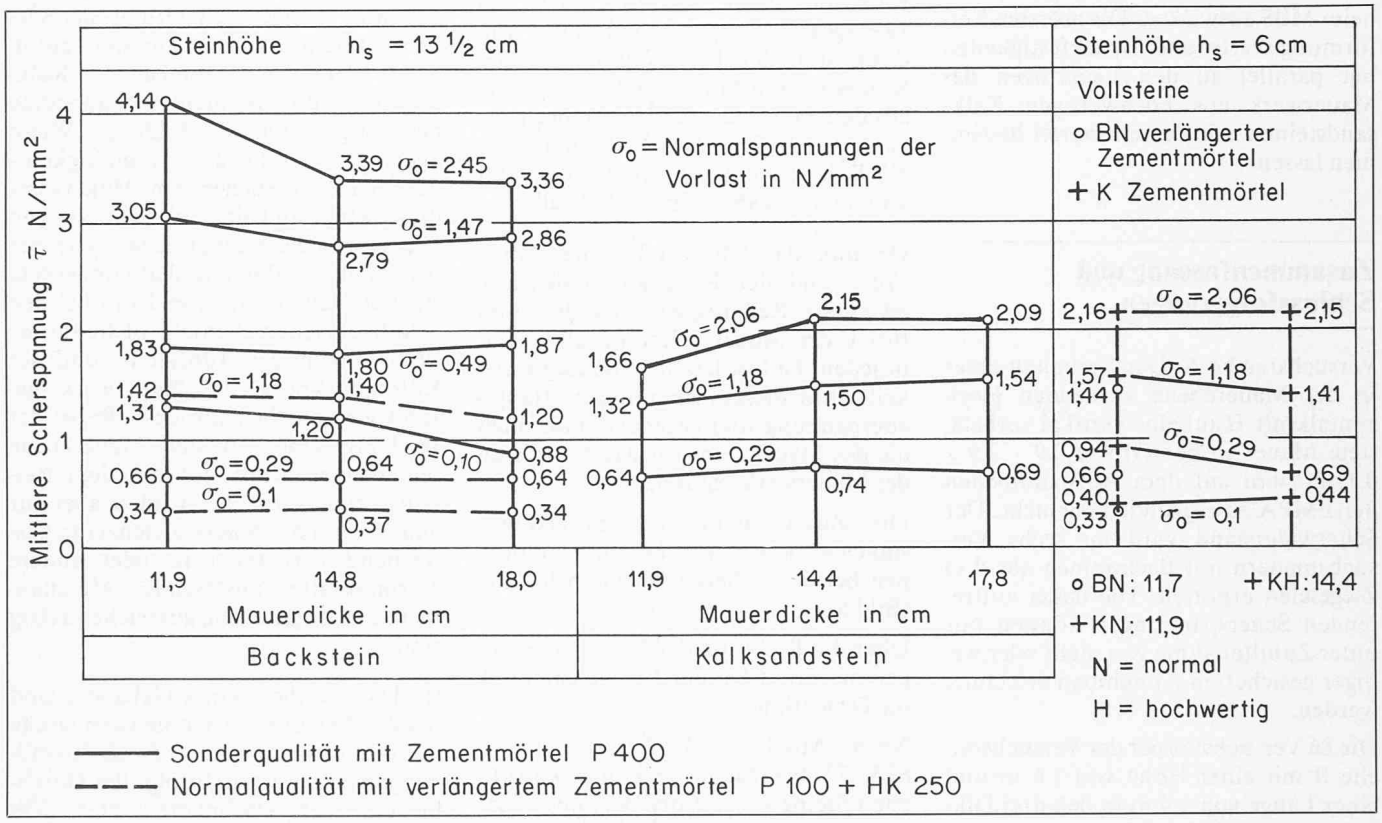
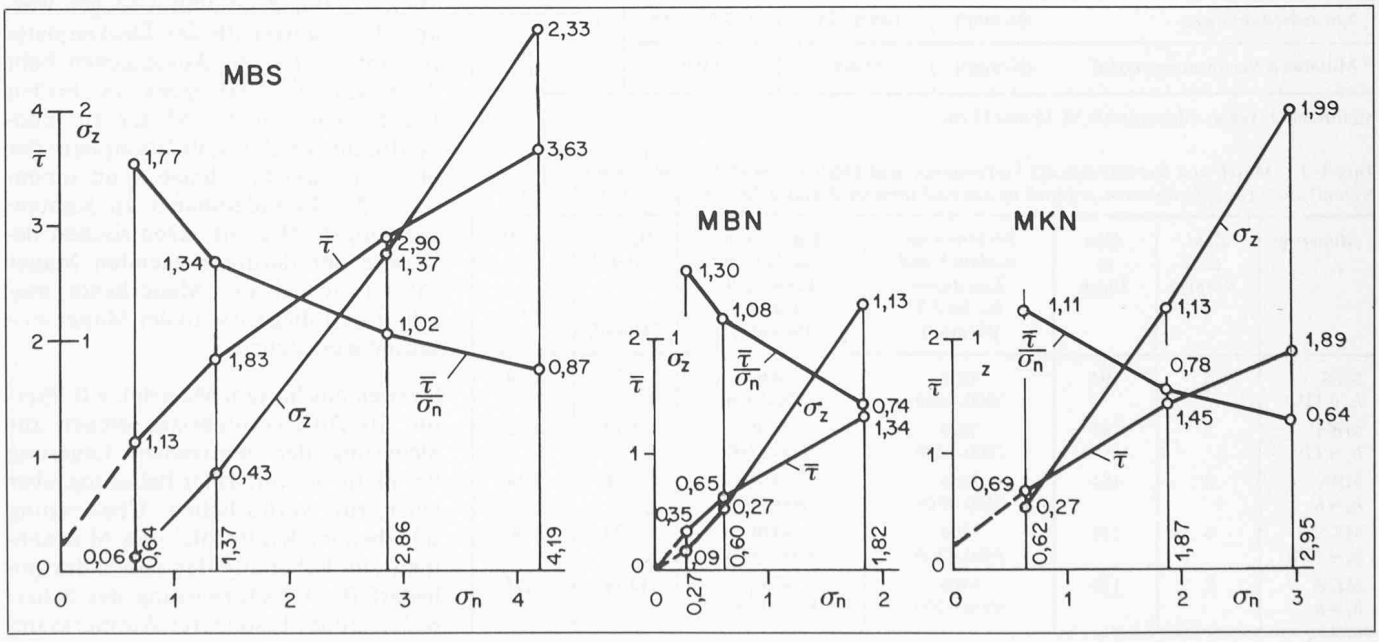


Bild 5. Ergebnisse der Versuchsreihe B. Mittlere Scherwiderstände $\bar{\tau}$ (Doppelversuche, 86 Versuchskörper)

Bild 6. Versuchsergebnisse der Reihe B. Mauerwerkkörper aus Backsteinen der Sonder- und Normalqualität sowie aus Kalksandsteinen normaler Qualität. Mittelwerte der Doppelversuche der drei Mauerdicken 12, 15 und 18 cm. Berechnete Hauptzugspannungen. Alle Werte in N/mm²



werte des MBS gegenüber den Werten aus der Belastung senkrecht zu den Lagerfugen kleiner ausfallen. Die Elastizitäts- und die Verformungsmoduln verhalten sich angenähert proportional zur Mauerwerkfestigkeit (Bild 8). Da die Verformungswerte des MBN bei der Belastung vertikal zu den Lagerfugen kleiner als die der Parallelbelastung sind, so muss vermutet werden, dass die Festigkeit des Mörtels und die Folgeerscheinungen der Saugfähigkeit und des Schwindens auf die Verformungsfähigkeit des Mauerwerks sich stärker als beim MBS auswirken. Die grössten Verformungswerte und Druckfestigkeiten hat parallel zu den Lagerfugen das Mauerwerk aus hochwertigen Kalksandsteinen mit Zementmörtel bestimmen lassen.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Versuchsreiche A. Das Verhalten einer in der Mauerebene wirkenden Horizontalkraft H auf eine vertikal vorbelastete Mauer in der Grösse 2,9 · 2,9 · 0,15 m wird auf dem Aufspannboden der EMPA zu ergründen versucht. Der Scherwiderstand wird an sechs Versuchsmauern mit Backsteinen aus drei Ziegeleien ermittelt. Die dabei auftretenden Scherspannungen können nur unter Zuhilfenahme von mehr oder weniger gesicherten Annahmen errechnet werden.

Die 86 Versuchskörper der Versuchsreiche B mit einer Höhe von 1,6 m und einer Länge von 1,4 m in den drei Dicken 12, 15 und 18 cm erlauben den mittleren Scherwiderstand $\bar{\tau}$ unmittelbar zahlenmässig festzustellen. Die Backsteinmauern wurden erstellt mit Steinen von normaler und Sonderqualität und die Mauern aus Kalksandsteinen mit solchen von normaler und hochwertiger Qualität. Die Verformungen werden in Rosetten über den beiden Scherflächen mit dem Deformeter gemessen.

Der Widerstand gegen schiebende Kräfte von Mauerwerk aus Back- und Kalksandsteinen rekrutiert sich aus zwei Quellen: 1. aus der kohäsiven Bindung, d.h. der Festigkeit der beiden Komponenten Mörtel und Stein, sowie aus dem Haft- oder Klebevermögen der beiden in der Kontaktschicht und 2. aus der Reibung, entweder in der Kontaktschicht der beiden oder im Mörtel.

Ob nun das Überwinden der Adhäsions- und der Kohäsionsbindekräfte oder des Reibungswiderstandes zum Bruch der Mauer führt, ist irrelevant, in jedem Fall ist letztlich die Zugfestigkeit des Mörtels in Richtung der Hauptzugspannung und gegebenenfalls auch die des Mauersteins für das Aufreissen des Mauerwerks kausal.

Die Zuwachsquote des Scherwiderstands ermässigt sich bei allen Steintypen bei der höheren Normalbelastung (Bild 6).

Über die Richtung der Hauptspannungen orientiert bei der Versuchsreihe A die Drucklinie.

Nach Abschnitt 3.2.2.1 der Norm SIA 177 für Mauerwerk aus künstlichen Steinen bleibt die Wirkung einer allfälligen Zugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen unberücksichtigt. Das langsame Austrocknen und Schwinden des Mörtels der Lagerfuge, von der Oberfläche des Mauerwerkes ausgehend und zur Mittelebene fortschreitend, erzeugt Zugspannungen senkrecht zu den Lagerfugen, die meist bis zur Haft- oder Zugfestigkeit des Mörtels ansteigen. Horizontale Risse an den Kontaktflächen oder in der Mörtelschicht sind dann die Folgen. Gefügelockerung beim Entwässern des Mörtels durch stark saugende Backsteine oder aber mangelnde Haftung oder Klebewirkung des Mörtels am Stein zufolge zu kleiner Saugfähigkeit der Kalksandsteine und der dichten Natursteine begünstigen die Rissbildung. Wenn aber auf Grund der Tragfähigkeits- oder Knickversuchen am Mauerwerk diese Zugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen als nicht gesichert wirksam festgestellt wird und deshalb unberücksichtigt bleiben muss, so kann bei den Schubversuchen ebenfalls nicht auf die Wirksamkeit der Adhäsions- und der Kohäsionskräfte im Mauerwerk gezählt werden. Es kann deshalb bei der Wirkung einer in der Mauerebene schiebenden Kraft nur mit dem Reibungseffekt gerechnet werden, aber nur dann, wenn die Mauer gleichzeitig ausreichend vorbelastet ist oder andere Normalkräfte auslösende Massnahmen, z.B. Zugstangen, ausreichend tätig sind.

Im Dachgeschoss eines Gebäudes sind seit der Ausführung der obersten Decke in Stahlbeton, anstatt in Holz, Rissbildungen zu erwarten. Infolge der Durchbiegung der Dachplatte unter dem Eigengewicht und der Dachlast, aber vor allem wegen des Werfens der einseitig armierten Platte durch Schwinden und Kriechen verdreht sich die Decke am nur wenig belasteten Auflager, woraus Risse unterhalb der Deckenplatte resultieren. In den Aussenecken hebt diese infolge Verbiegens in beiden Richtungen von der Mauer ab. Endverdrehungen der Stahlbetonplatte der obersten zwei Geschosse kann innenseitig der Fassadenmauer zu Kantenpressungen, also zur exzentrischen Belastung der darunterliegenden Mauer führen, wobei die Mauerkante ausschert und Biegerisse in der Mauer aussenseitig entstehen.

Streifen aus hartem Material, z.B. Eternit, als Auflagerunterlage dienen zur Sicherung der zentrischen Lagerung der Platte bei vertikaler Belastung, aber auch zur verlässlichen Übertragung schiebender Kräfte. Bei den Massnahmen zur Behebung der Rissbildungen bedarf die Gewährleistung des Scherwiderstandes besonderer Aufmerksam-

Tabelle 3. Verformungsmoduln, aus Messwerten der Strecke Nr. 3, senkrecht zu den Lagerfugen bei der Vorbelastung σ_0

Mauertyp		MBS	MBN	MKN
Normalspannung σ_0	[N/mm²]	0,49 bis 245	0,29 bis 1,18	0,29 bis 1,18
Mittelwert Verformungsmodul	[N/mm²]	11 400	1480	6500

Steinhöhe: 13½ cm; Mauerdicke: 12, 15 und 18 cm

Tabelle 4. Mittel- und Extremwerte der Verformungs- und Elastizitätsmoduln parallel den Lagerfugen in N/mm² sowie Druckfestigkeiten, ermittelt an den noch intakten Randstücken, Dicke: 12, 15 und 18 cm

Mauertyp	*Zahl der Körper*	*Alter in Tagen*	*Verformungsmoduln V und Laststufen 0,1 bis 2,0* [N/mm²]	*Elastizitätsmoduln E und Laststufen 2,0 bis 0,1* [N/mm²]	*Druckfestigkeit* [N/mm²]	*E/V*
MBS $h_s = 13½$	4	194	4200 3900–4400	5050 4800–5300	9,72	1,20
MBN $h_s = 13½$	5	161	2020 1800–2300	2820 2600–3100	3,10	1,40
MBN $h_s = 6$	2	154	2650 2600–2700	3550 3500–3600	5,28	1,34
MKN $h_s = 13½$	4	213	3300 3000–3800	4820 4400–5800	5,73	1,46
MKH $h_s = 6$	2	176	6900 6500–7300	8750 8400–9100	15,14	1,27

keit, z.B. Einbinden von Mauerteilen, Verstärken von Mauer- und Deckenmassen, Verkleinern von Spannweiten. Ausreichende Auflasten oder Zuganker sind allenfalls auch für die Sicherung des Gleichgewichts des Mauerwerks im obersten Geschoss notwendig.

Bei den beiden Versuchsreihen A und B besteht in der Beanspruchung der Wände durch schiebende Kräfte ein erheblicher Unterschied. Bei der Reihe A erreicht die Scherfestigkeit $\bar{\tau}$ im Kontakt mit dem Aufspannboden und am Rand der Mauer auf der Gegenseite des Lastangriffs, an der Spitze des Spannungsdreiecks den Grösstwert. Bei der Reihe B ist dagegen der Scherwiderstand über den ganzen Querschnitt verteilt. Das Einspannmoment verursacht eine parabolische Verteilung des Scherwiderstands mit dem Maximum in der Nullinie. Diese Ungleichheit der Spannungsverteilung über den Mauerschnitt lässt einen kleineren Reibungsbeiwert bei der Reihe A gegenüber der Reihe B erklären.

Die in der Norm SIA festgelegten zulässigen Scherspannungen, die immer die Wirkung einer Normalspannung zur Voraussetzung haben, stützen sich auf die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen ab. Unbelasteten Mauerwerken können nach Abschnitt 335 der Norm SIA keine Scherspannungen zugemutet werden.

Bis zu einer Normalspannung σ_n = 0,6 N/mm² ist der Anstieg der zulässigen Spannungen steiler als bei den höheren σ_n-Werten entsprechend der kleineren Zunahme der Zugfestigkeit in Richtung der Hauptzugspannung.

Der bei der Festlegung der zulässigen Spannungen zugrunde gelegte Sicherheitsgrad, d.i. das Verhältnis des Versuchswerts zum zulässigen Betrag, variiert zwischen 3,3 und 4,3.

Bei der Wahl des Sicherheitsgrades sind die Ungenauigkeiten der statischen Berechnungen und der Bemessung, die Abweichungen der Art der Belastungen von den Annahmen, die Streuungen der am Bauwerk verwendeten Materialien, wie Bindemittel, Sand und Mauersteine, der Einfluss der ständig schwankenden atmosphärischen Einwirkungen, wie Regen, Wind, Sonnenwärmeeinstrahlung usw., beim Erstellen des Mauerwerks und während der Erhärtungszeit, das Können des Maurers und der Qualität seiner Arbeit zu berücksichtigen. Ausserdem ist bei der Festlegung des Sicherheitsgrades zu beachten, dass nicht nur die Prüfergebnisse der einzelnen Materialien vorliegen, sondern dass bei der Prüfung des Mauerwerkes das Zusammenwirken der beiden Komponenten Stein und Mörtel erfasst wird. In der Regel wird eine Typenprüfung der Steine im Mauerwerk durchgeführt, weshalb die Unterschiede des Rohstoffes und bei ihrer Verarbeitung der verschiedenen Produktionsstätten im Sicherheitsgrad Eingang finden muss. Die Überprüfbarkeit und der Umfang der Überwachung der Materialien und deren Verarbeitung haben ihren Niederschlag im Sicherheitsgrad zu finden.

Ein Einfluss der Mauerdicken auf die Scherfestigkeit ist nur dann festzustellen, wenn ein grösseres Handloch den Zugwiderstand herabsetzt. Möglicherweise wirkt sich auch die verkleinerte Haftfläche entsprechend reduzierend aus.

Die Steinhöhe von 6 cm hat gegenüber der heute gebräuchlichen Steinhöhe von 13,5 cm keinen wesentlichen Unterschied der Scherfestigkeit feststellen lassen.

Die Messungen zur zahlenmässigen Erfassung von Verformungswerten erfolgt an den Versuchsmauern B, und zwar beidseitig der Körper über den beiden Scherflächen in Rosetten mit je vier Messstrecken von 20 Zoll Länge.

Die beiden orthogonalen Gruppen der Messstrecken lassen beim MBS aus den Versuchswerten der Doppelversuchskörper, der vier Rosetten der drei Mauerdicken und der vier Vorlaststufen 0,1; 0,49; 1,47 und 2,45 N/mm², also aus insgesamt 96 Messwerten einen mittleren Messfehler von 5,0%, Grenzwerte zwischen 0,4 und 15,1%, errechnen.

Die Ergebnisse des MBS und MKN, über den Trennfugen gemessen, lassen bis nahe an die Bruchgrenze eine Proportionalität zwischen Verformung und Spannung nachweisen. Das Zweikomponenten-Baumaterial-Mauerwerk folgt demnach unerwartet weitgehend dem Hookeschen Gesetz (Bild 7).

Nach Tabelle 3 liegt der Mittelwert der Verformungsmoduln, ermittelt aus der Vorlast senkrecht zu den Lagerfugen der drei Mauerdicken des Mauerwerks aus Sonderbacksteinen MBS, nahezu achtmal höher als der Mittelwert des Normalbacksteinmauerwerks MBN. Die Ursache dieses Unterschieds ist in der grösseren Verformbarkeit des verlängerten Zementmörtels und des weniger druckfesten Mauersteins zu suchen. Der Verformungsmodul des Mauerwerks aus normalen Kalksandsteinen, mit Zementmörtel zum Mauerwerk vereinigt, ist 4,4mal grösser als des MBN, jedoch 1,8mal kleiner als des MBS.

Die abgetrennten, noch intakten beiden Randteile der Versuchsreihe B sind die

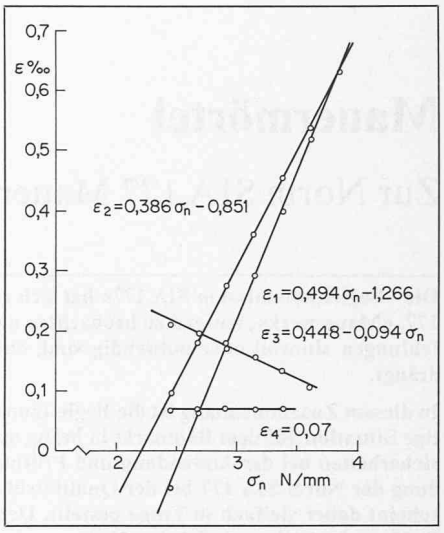
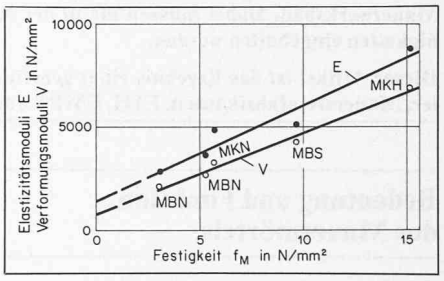


Bild 7. σ_n /ε-Diagramm des MBS, 18 cm. Mittelwert aus zwei Versuchskörpern B

Bild 8. Moduln in Funktion der Druckfestigkeit, ermittelt an den Randstücken der Versuchskörper B



Die Untersuchungen wurden in den Jahren 1965–1967 an der EMPA im Auftrag der schweizerischen Ziegelindustrie durchgeführt. Gekürzte Fassung. Die Ergebnisse des Berichtes dienten als Unterlage für die Festlegung der zulässigen Spannungen in der Norm SIA 177 (1981) Mauerwerk aus künstlichen Steinen. Der vollständige Bericht kann beim Zieglersekretariat, Obstgartenstr. 28, 8006 Zürich, bezogen werden.

Stauchungen parallel zu den Lagerfugen bei der Belastung von 0,1 N/mm² auf 2,0 N/mm² und bei der Entlastung gemessen worden, wobei sich offenbar die mangelnde Querverbindung über die Haftung des Mörtels am Stein reduzierend auf den Verformungswiderstand ausgewirkt haben muss. Diese Versuchswerte sind deshalb auch mit der entsprechenden Vorsicht zu bewerten. Die aus den Rückfederungswerten berechneten Elastizitätsmoduln sind 20 bis 46% grösser als die Verformungsmoduln. Dass die Hohlräume in den Steinen auf den Verformungswiderstand und die Druckfestigkeit vermindernd wirken, zeigt der Vergleich der Werte des Kalksandsteinmauerwerks mit gelochten Mauersteinen einerseits und mit vollen Mauersteinen anderseits.

Adresse des Verfassers: Prof. *P. Haller*, dipl. Ing. ETH, Regensbergstr. 54, 8050 Zürich.