

IV-4. Load Capacity of Masonry Cellarwalls under the Influence of Earth Pressure

Prof. Dr.-Ing. W. Mann & Dipl.-Ing. G. Bernhardt,
Darmstadt

ABSTRACT

Outer cellar walls must frequently support great loads. Success has been attained in demonstrating load capacity in highly fired pourings. Therefore the stress under loads and earth pressure for two-sided and multisided bounded walls can be systematically examined. Measuring proposals are being developed.

Kelleraußenwände mit geringer Auflast treten bei Wohnhäusern niedriger Höhe häufig auf. Es gelingt in der Regel nicht ohne weiteres, den Nachweis ihrer Tragfähigkeit bei geschoßhoher Anschüttung zu führen. Es werden deshalb gemauerte Wände unter Lasten senkrecht zu ihrer Ebene untersucht und die Bruchkriterien für die Biegemomente m_x und m_y sowie für die Drillmomente m_{xy} entwickelt. Diese Bruchkriterien werden für ein- und zweiachsig gespannte Kellerwände ausgewertet und die erforderliche Auflast sowie die erforderliche Kohäsion und Steifigkeit für einige Beispiele angegeben.

EINLEITUNG

Die Biegezugfestigkeit des Mauerwerks in der Mörtelfuge ist gering und wird üblicher Weise beim Nachweis der Standicherheit vernachlässigt, da sie nicht an allen Stellen einwandfrei gewährleistet werden kann. Dies führt dazu, daß Beigemomente m_x senkrecht zur Lagerfuge nur soweit aufgenommen werden können, wie Normalkräfte n_x aus Eigengewicht und Auflast vorhanden sind und die Lagerfuge überdrücken. Solange die Druckfestigkeit des Mauerwerks nicht für das Versagen maßgebend wird, gilt also daß bei größerer Normalkraft n_x auch größere Momente m_x aufgenommen werden können.

Gemauerte Kellerwände sind typische Konstruktionselemente, bei denen dieser Grundsatz von ausschlaggebender Bedeutung ist. Bei niedrigen Bauwerken von nur 1 oder 2 Geschossen ist die Normalkraft n_x aus dem Eigengewicht der Wände und Decken so gering, daß die Beigemomente m_x infolge Erddruck nur aufgenommen werden können, wenn die Kellerwände sehr dick sind. Eine gewisse Entlastung, die aber in ihrer Wirkung oft überschätzt wird, können aussteifende Querwände darstellen. Durch sie wird eine zweiachsig Lastabtragung in der Außenwand möglich.

Im folgenden werden Ansätze für den rechnerischen Nachweis von Wänden, die rechtwinklig zu ihrer Ebene belastet sind, entwickelt. Sie sollen dazu dienen, die zulässige Höhe der Erdanschüttung von Kellerwänden zu ermitteln. Außerdem ermöglichen sie die bessere Deutung von Versuchsergebnissen.

BEZEICHNUNGEN

Die verwendeten Abmessungen und Definitionen der Last- und Schnittgrößen sind in Bild 1 dargestellt. Weiterhin gilt:

$\beta_{d,st}$	= Steindruckfestigkeit
$\beta_{z,st}$	= Steinzugfestigkeit
μ	= Reibungsbeiwert
k	= Kohäsion
ν	= Sicherheitsbeiwert
γ_c	= Spezifisches Gewicht des Erdreichs

γ_w	= Spezifisches Gewicht der Wand
n_0	= Auflast am oberen Wandrand pro m
n_w	= Eigengewicht der Wand pro m
n_u	= Lagerkraft der Wand am unteren Rand pro m
$\Delta x, \Delta y$	= Höhe und Länge der Steine als Fugenmaße
H, L, d	= Höhe, Länge und dicke der Wand

BRUCHKRITERIEN FÜR WÄNDE, DIE RECHT-WINKLIG ZU IHRER EBENE BELASTET WERDEN (PLATTENBEANSPRUCHUNG)

Allgemeines

Bei einachsig gespannten Wänden treten neben den Normalkräften n_x Biegemomente m_x auf. In zweiachsig gespannten Wänden entstehen zusätzlich Biegemomente m_y und Drillmomente m_{xy} . Der Bruch kann entweder durch Überschreiten der zulässigen Exzentrizität, durch Versagen der Steine oder durch Versagen der Lagerfugen ein treten. Es wird grundsätzlich vorausgesetzt, daß in den Stoßfugen keine Zug- und Schubkräfte übertragen werden können, da sie, im Gegensatz zu den Lagerfugen nicht überdrückt sind, oftmals schlecht vermörtelt werden, die Stoßflächen der Ziegel glatt sind und daher wenig Haftung besitzen und der Fugenmörtel durch Schwinden reißt. Vergleiche hierzu die Bruchkriterien für Schubversagen, z. B. in^{1,2,3}. Die folgenden Untersuchungen beziehen sich auf Einsteinmauerwerk.

Aufnahme des Biegemomentes m_x

Die Forderung nach einer 1,5-fachen Kippsicherheit um die Kante führt zu der Bedingung, daß die Lagerfuge im Gebrauchszustand nicht weiter als bis zur Steinmitte klaffen darf. Dies bedeutet eine Exzentrizität $e = \frac{d}{3}$. Nach Bild 2 folgt daraus das Kriterium

$$e = \frac{m_x}{n_x} \leq \frac{d}{3} \quad (1)$$

Bei größerer Auflast ist außerdem die Randspannung σ_x zu überprüfen:

$$\sigma_x \leq \frac{\beta_R}{\nu} \quad (2)$$

Aufnahme des Biegemomentes m_y

Versagen der Steine

Da vorausgesetzt wird, daß in den Stoßfugen keine Biegezugspannungen übertragen werden können, entfällt auf jeden Stein das Biegemoment von 2 Schichten gemäß Bild

3a. Mit $\sigma_y = \frac{2 \cdot \Delta x \cdot m_y}{\Delta x \cdot d^2/6}$ lautet des Bruchkriterium:

$$\sigma_{z,nt} = m_y \cdot \frac{12}{d^2} \leq \frac{\beta_{z,nt}}{\nu} \quad (3)$$

Versagen der Lagerfuge bei zentrischer Auflast

Das im Stein wirkende Biegemoment $m_y = 2\Delta x \cdot m_x$ wird über die beiden Lagerfugen in die obere und untere Steinschicht übertragen (Bild 3b). Bei annähernd zentrischer Auflast, also ohne gleichzeitige Wirkung von m_x , kann jeder Punkt der Lagerfuge die gleiche Schubspannung übernehmen. Bei annähernd quadratischen Übertragungsfläche wird die Schubspannung in einer Lagerfuge

$$\tau = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \Delta x \cdot m_y / 0,2d \left(\frac{\Delta y}{2} \right)^2$$

Ist die aufnehmbare Schubspannung nach dem Coulomb'schen Reibungsgesetz

$$\tau = \frac{1}{\nu} \left(k + \frac{n_x}{d} \cdot \mu \right),$$

so lautet das Bruchkriterium

$$d \cdot \tau = \frac{20 \cdot \Delta x \cdot m_y}{\Delta y^2} \leq \frac{1}{\nu} (k \cdot d + n_x \cdot \mu) \quad (4a)$$

Versagen der Lagerfuge bei klaffender Fuge

Wirkt gleichzeitig mit m_y ein Moment m_x , so daß die Lagerfuge in dem Bereich klafft, in dem Biegezugspannungen aus m_x auftreten, steht nur ein Teil der Lagerfuge zur Momentenübertragung aus einem Stein in die benachbarten Schichten zur Verfügung. Außerdem kann nicht jeder Punkt der Restfläche gleichermaßen auf Schub beansprucht werden, da die Druckspannung nicht mehr konstant ist. Zerlegt man das Moment in der Lagerfuge nach Bild 3a in ein

Kräftepaar $\frac{1}{3} \Delta y \cdot T$, so lautet die aufnehmbare Kraft $T = \frac{1}{\nu} (k \cdot x + n_x \cdot \mu) \frac{\Delta y}{8} = 3m_y \frac{\Delta x}{\Delta y}$ und das Bruchkriterium wird

$$\frac{8T}{\Delta y} = \frac{24 \cdot \Delta x \cdot m_y}{\Delta y^2} \leq \frac{1}{\nu} (k \cdot x + n_x \cdot \mu) \quad (4b)$$

Im ungünstigsten Fall wird $x = d/2$.

Aufnahme des Drillmomentes m_{xy}

Versagen der Steine

Da vorausgesetzt wird, daß in den Stoßfugen keine Schubspannungen übertragen werden können, hat jeder Stein das Drillmoment von 2 Schichten aufzunehmen. Mit angenähert quadratischem Steinquerschnitt lautet die Schubspannung im Stein

$$\tau = \frac{M_{xy}}{W_{xy}} = \frac{2 \cdot \Delta x \cdot m_{xy}}{0,2d \cdot \Delta x^2} = \frac{10m_{xy}}{d \cdot \Delta x}$$

Aus dem Gleichgewicht am Stein nach Bild 4 ergibt sich eine Druckkraft $D = 2T$ und damit eine Druckspannung

$\sigma = \frac{-2T}{\Delta x \cdot d} = \frac{3 \cdot \Delta y \cdot m_{xy}}{\Delta x \cdot d^2} \approx \frac{6 \cdot m_{xy}}{\Delta x \cdot d}$ im Stein. Damit wird die schiefe Hauptzugspannung

$$\sigma_1 = -\frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} = 7,4 \frac{m_{xy}}{\Delta x \cdot d}$$

so daß das Bruchkriterium lautet

$$\sigma_1 = \frac{7,4 m_{xy}}{d \cdot \Delta x} \leq \frac{\beta_{z,nt}}{\nu} \quad (5)$$

Eine weitere Abminderung ergibt sich aus der Auflast n_x , die aber hier vernachlässigt wird.

Versagen der Lagerfuge

Das vom Stein übernommene Drillmoment $M_{xy} = 2\Delta x \cdot m_{xy}$ kann nicht über die Stoßfuge weitergegeben werden und wird daher über die Lagerfuge als Biegemoment m_x in die benachbarten Schichten übertragen. Da die Fuge nur bis zur Querschnitts mitte klaffen darf, lautet die Gleichgewichtsbedingung $n_x \cdot \Delta y \cdot \frac{d}{3} = 2 \cdot \Delta x \cdot m_{xy}$ und das Bruchkriterium

$$e = \frac{m_{xy}}{n_x} \cdot \frac{2 \cdot \Delta x}{\Delta y} \leq \frac{d}{3} \quad (6)$$

Das in der Lagerfuge wirkende Drillmoment wird in ein Kräftepaar $\frac{2}{3} d \cdot T$ zerlegt, das von den nicht klaffenden

Bereichen der Fuge aufgenommen wird. Mit $T = \frac{\Delta y \cdot m_{xy}}{\frac{2}{3}d}$

$= \frac{3 \cdot \Delta y \cdot m_{xy}}{2d}$ und einer im nichtklaffenden Bereich auf-

nehmbaren Reibungskraft $T = \frac{1}{\nu} \left(k \cdot \Delta y \cdot \frac{d}{4} + n_x \cdot \frac{\Delta y}{2} \cdot \mu \right)$ lautet das Bruchkriterium

$$\frac{2T}{\Delta y} = \frac{3m_{xy}}{d} \leq \frac{1}{\nu} \left(k \frac{d}{2} + n_x \cdot \mu \right) \quad (7)$$

EINACHSIG GESPANNT KELLERWÄNDE UNTER ERDDRUCK

Ist eine Kellerwand nicht durch Querwände ausgesteift, so spannt sie gemäß Bild 5 einachsig zwischen Deckenplatte und Fundament.

Unter dem Einfluß des Erddrucks bildet sich eine Momentenfläche aus, deren Maximalwert an der Stelle x_1 lautet:

$$\max m_x = \frac{\lambda_a \cdot \gamma_c \cdot h^3}{6H} \left(H - \bar{h} + \frac{2}{3} \bar{h} \sqrt{\frac{\bar{h}}{3H}} \right).$$

Hierin ist $\bar{h} = h + p/\gamma_c$ eine ideale Anschütthöhe, die die Verkehrslast als zusätzliche Anschüttung berücksichtigt. Die tatsächliche Anschütthöhe ist mit h bezeichnet. Die Durchbiegung der Wand bewirkt, daß die Auflast n_0 am oberen Rand und die am unteren Rand um das Wandeigengewicht n_w vergrößerte Reaktionskraft n_u exzentrisch angreifen. Bei 1,5-facher Kippsicherheit folgt wieder $e = d/3$. Außerdem mag die Wand eine ungewollte Ausmitte aufweisen, die zu $f = 0,04 d$ angenommen sei. Verlangt man für die Stelle des max. Momentes, daß die Fuge nur bis zur Mitte klafft, also auch hier 1,5-fache Kippsicherheit herrscht, bzw. $e = d/3$ ist, so lautet das Bruchkriterium

$$\max m_x - n_1 \cdot \frac{d}{3} + n_1 \cdot f \leq n_1 \cdot \frac{d}{3} \quad (8a)$$

oder mit eingesetzten Werten nach n_1 aufgelöst

$$n_1 \geq \frac{\lambda_a \cdot \gamma_c}{3,76} \cdot \frac{H^3}{d} \left(\frac{\bar{h}}{H} \right)^3 \left[1 - \frac{\bar{h}}{H} \left(1 - \frac{2}{3\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\frac{\bar{h}}{H}} \right) \right] \quad (8b)$$

Da (8b) unhandlich ist, soll sie für Näherungszwecke vereinfacht werden. Für $p \leq 5 \text{ kN/m}^2$ bzw. $p/\gamma_c \leq 0,25$ und übliche Geschoßhöhen läßt sich der Ausdruck

$$\left(\frac{\bar{h}}{H} \right)^3 \left[1 - \frac{\bar{h}}{H} \left(1 - \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\frac{\bar{h}}{H}} \right) \right]$$

durch die quadratische Parabel $\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{h}}{H} \right)^2$ annähern, so daß (8b) in die Näherungsgleichung übergeht:

$$n_1 \geq \frac{\lambda_a \cdot \gamma_c}{7,52} \cdot \frac{H \cdot h^2}{d} \quad (8c)$$

Hierin ist der Erddruckbeiwert üblicherweise zu $\lambda_a = 1/3$, das spezifische Gewicht des Bodens zu $\gamma_c = 20 \text{ kN/m}^3$ anzusetzen. Mit ausreichender Näherung wird $x_1 \approx H - \frac{h}{2}$ so daß für die erforderliche Auflast gilt

$$n_0 \approx n_1 - n_w \left(1 - \frac{h}{2H} \right) = n_1 - \gamma_w \cdot d \left(H - \frac{h}{2} \right) \quad (8d)$$

In Bild 6 ist (8c, d) für einige praktische Fälle ausgewertet, so daß die zulässige Höhe der Erdanschüttung h bzw. die erforderliche Wanddicke d in Abhängigkeit von der erforderlichen Auflast n_0 abgelesen werden können.

ZWEIACHSIG GESPANNT KELLERWÄNDE UNTER ERDDRUCK

Beanspruchung der Wände

Ist eine Kellerwand durch Querwände ausgesteift, so können die Lasten aus Erddruck zweiachsig abgetragen werden. Dabei werden die Biegemomente m_x gegenüber

einachsiger Lastabtragung reduziert, dafür treten Biegemomente m_y und Drillmomente m_{xy} auf.

Analog zu den einachsig gespannten Wänden wird angenommen, daß die Durchbiegung der Wand eine Exzentrizität der Normalkraft n_0 am oberen Rand und $n_u = n_0 + n_w$ am unteren Rand bewirkt, die sich sinusförmig über den Rand verteilt und in der Mitte des Randes den Wert $e = d/3$ hat. Dieses System ist im Bild 7 dargestellt.

Die Plattenmomente wurden für den Erddruckbeiwert $\lambda_a = \frac{1}{3}$, für das spezifische Gewicht des Erdreichs $\gamma_c = 20 \text{ kN/m}^3$ und das spezifische Gewicht der Wand $\gamma_w = 14 \text{ kN/m}^3$ nach der Plattentheorie ermittelt und in Bild 8 dargestellt. Die ungewollte Ausmitte f wurde hierbei vernachlässigt.

Erforderliche Auflast und Materialkennwerte

Mit den Momentenwerten nach Bild 8 können die Bruchkriterien nach Abschnitt 3 ausgewertet werden. So ergibt sich mit m_x die erforderliche Normalkraft n_x an der Stelle des größten Momentes nach Gleichung (1); hieraus folgt n_0

$$= n_x - n_w \cdot \frac{x_1}{H}. \text{ Entsprechend folgt mit } m_{xy} \text{ die erforderliche}$$

Normalkraft nach Gleichung (6). Der größere der beiden Werte n_0 ist maßgebend und in Bild 9 eingetragen.

In gleicher Weise ergibt sich mit m_y bzw. m_{xy} die erforderliche Steinzugfestigkeit $\beta_{z,st}$ nach Gleichung (3) bzw. (5). Der ungünstigere Wert ist in Bild 9b dargestellt.

Aus den Gleichungen (4b) und (7) folgt mit m_y bzw. m_{xy} und mit n_x die erforderliche Kohäsion k , die in Bild 9c dargestellt ist.

Bei der Auswertung wurden folgende Werte angesetzt:

Reibungsbeiwert $\mu = 0,6$; Sicherheitsbeiwert $\nu = 2,0$; Fugenmaß der Steinabmessungen: Höhe $\Delta x = 25 \text{ cm}$, Länge $\Delta y = 50 \text{ cm}$; Dicke = Wanddicke d .

Aus Bild 9b ist zu erkennen, daß die Steinzugfestigkeit bei einem Seitenverhältnis $H/L = 1 : 1$ durch m_y und m_{xy} etwa gleichermaßen ausgelastet wird. Bei längeren Wänden, also z. B. $H/L = 1 : 2$, wird m_{xy} für die erforderliche Steinzugfestigkeit maßgebend. Da das maximale Drillmoment m_{xy} nur in den beiden unteren Eckpunkten auftritt, die in der Praxis durch Seiteneinspannung verstärkt sind, ist anzunehmen, daß dieses Kriterium etwas zu ungünstige Werte liefert.

Es wird besonders darauf hingewiesen, daß die Steinabmessungen in den Bruchkriterien eine große Rolle spielen und daß die in Bild 9 dargestellten Ergebnisse daher nicht auf andere Steinarten übertragen werden können.

Einstufung der Materialkennwerte

Hierzu wird auf² verwiesen. Der angesetzte Reibungsbeiwert $\mu = 0,6$ gilt als Mindestwert für alle Mörtelarten. Die Kohäsion hingegen ist von der Mörtelgüte stärker abhängig. Für Kalkzementmörtel der Güte IIa kann im Bruchzustand mit $k = 0,18 \text{ MN/m}^2$, für reinen Zementmörtel der Güte IIIa mit $k = 0,25 \text{ MN/m}^2$ gerechnet werden.

Man erkennt aus Bild 9c, daß bei den angenommenen großformatigen Steinen bereits Kalk-Zementmörtel die erforderlichen Kohäsionswerte erreicht. Bei kleineren Steinformaten hingegen wird eine höhere Mörtelgüte erforderlich.

Die Steinzugfestigkeit $\beta_{z,st}$ ist schwierig festzulegen. Sie wird im allgemeinen als Prozentsatz der Steindruckfestigkeit mit $\beta_{d,st}$ angegeben, wobei dieser Prozentsatz u. a. von dem Steinmaterial, also Ziegel, Kalksandstein oder Beton, abhängt. Hier wurde ein Wert $\beta_{z,st} = 0,04 \cdot \beta_{d,st}$ gewählt, der für Vollsteine üblicher Qualität auf der sicheren Seite liegt. Für Lochsteine ist ein Lochabzuger erforderlich. Hierfür wurde $\beta_{z,st} = 0,03 \cdot \beta_{d,st}$ angesetzt. Die entsprechenden Werte

sind in Bild 9 als Ordinate aufgetragen, so daß sich daraus die erforderliche Steingüte ablesen läßt.

LITERATURHINWEIS:

1. Mann, W.: Grundlagen für die Bemessung von Ingenieurmauerwerk. Mauerwerks-Kalender 1979, Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin
2. Mann, W. und Müller, H.: Schubtragfähigkeit von Mauerwerk. Mauerwerks-Kalender 1978, Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin
3. Mann, W. und Müller, H.: Versuche zur Bruchtheorie von querkraftbeanspruchtem Mauerwerk. Internationale Mauerwerkskonferenz 1976 Brügge

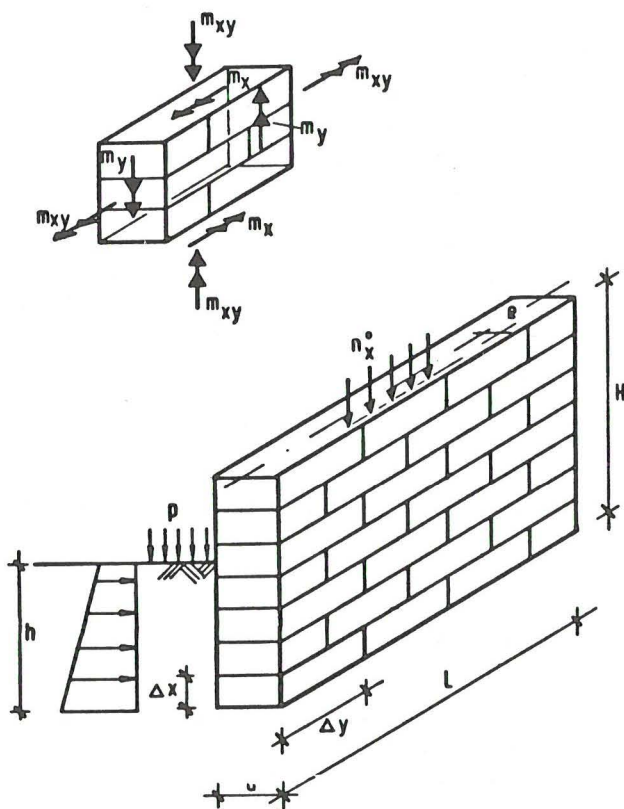


Bild 1. Definitionen

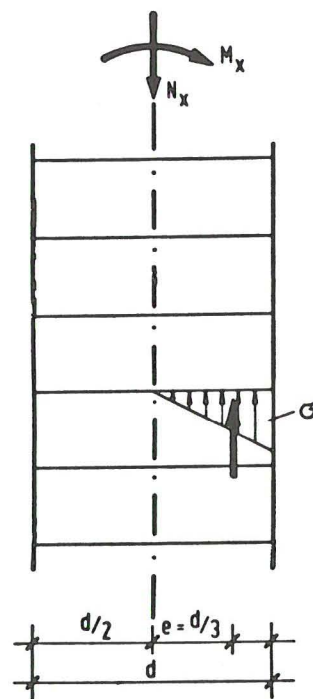


Bild 2. Wandbeanspruchung aus dem Biegemoment m_x und der Normalkraft n_x

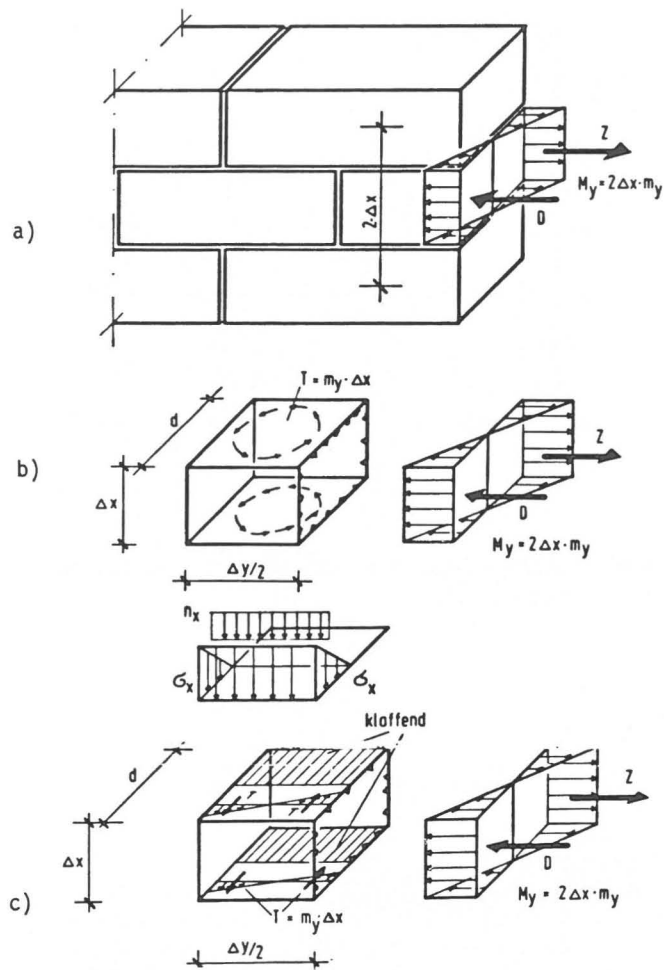


Bild 3. Gleichgewicht am Element für das Biegemoment m_y

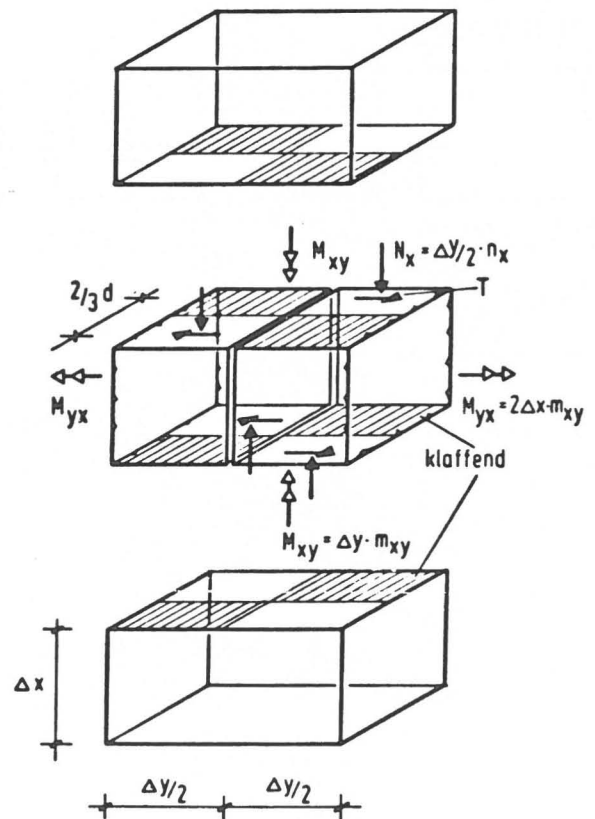


Bild 4. Gleichgewicht am Element für das Drillmoment m_{xy}

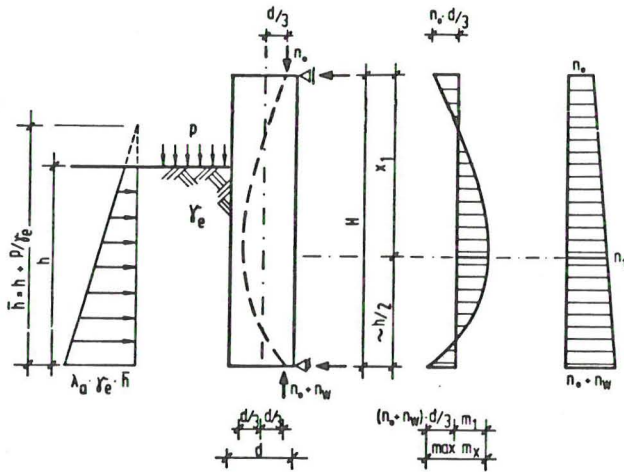


Bild 5. System und Belastung der zweiseitig gehaltenen Wand

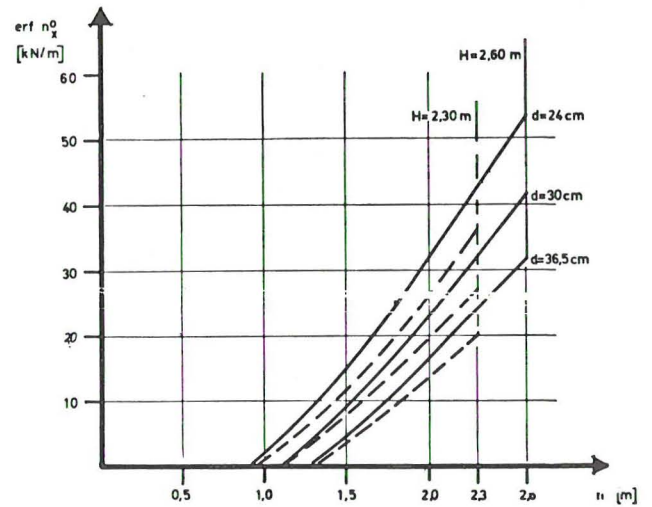


Bild 6. Erforderliche Normalkräfte der zweiseitig gehaltenen Wand

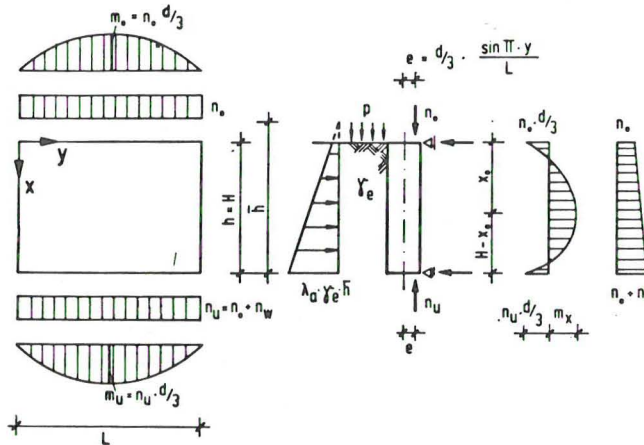


Bild 7. System und Belastung der vierseitig gehaltenen Platte

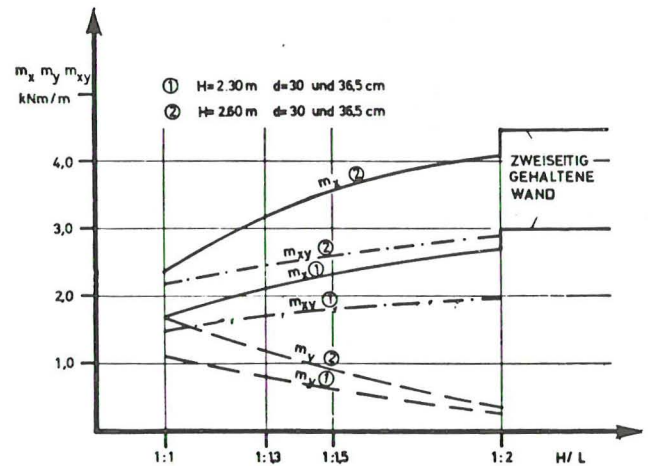
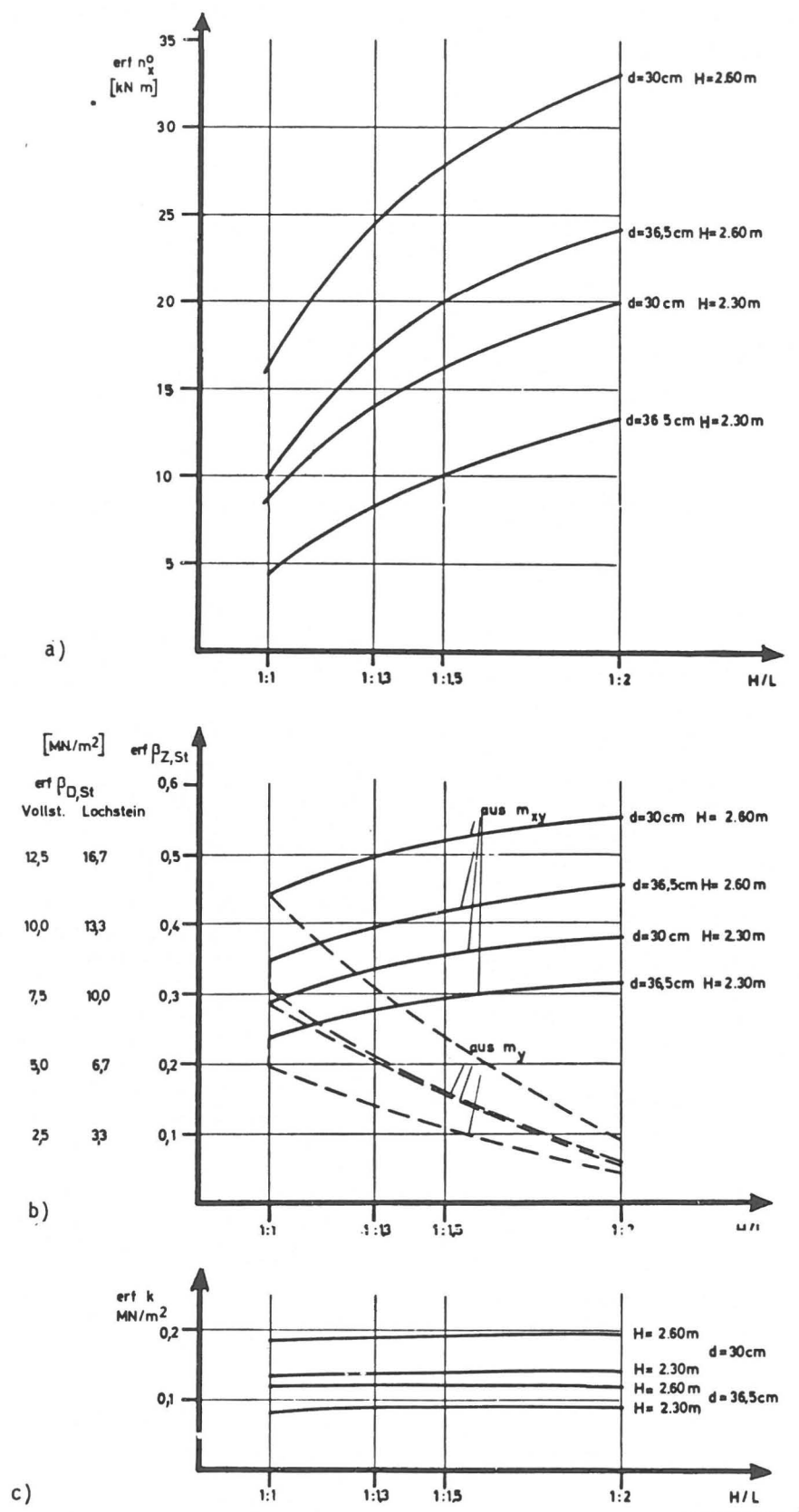


Bild 8. Momentenwerte für das System nach Bild 7

Bild 9. Erforderliche Auflast n_x^0 (a) Steinzugfestigkeit $\beta_{z,St}$ (b) und Kohäsion k (c) der vierseitig gehaltenen Wand