

<b>Zeitschrift:</b>	Schweizerische Bauzeitung
<b>Herausgeber:</b>	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
<b>Band:</b>	82 (1964)
<b>Heft:</b>	3
<b>Artikel:</b>	Die Dreimomentengleichung für den horizontal belasteten zweistieligen Stockwerk-Rahmen und ihre Anwendung auf die Berechnung von Fassaden mit Windlasten
<b>Autor:</b>	Steckner, Sebastian
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-67430">https://doi.org/10.5169/seals-67430</a>

### **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:** 14.01.2026

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

## Die Dreimomentengleichung für den horizontal belasteten zweistieligen Stockwerkrahmen und ihre Anwendung auf die Berechnung von Fassaden mit Windlasten

Von Sebastian Steckner, Ingenieur, Basel

DK 624.072.333

### Einleitung

Bei höheren Gebäuden stellt sich dem Ingenieur das Problem der Aufnahme der Windkräfte. In der Regel sieht er sich dabei gezwungen, die Fassaden des Gebäudes zur Aussteifung mit heranzuziehen. Die statische Berechnung der in ihrer Ebene horizontal belasteten Fassade ist recht kompliziert und umfangreich, wenn es sich — wie in den meisten Fällen — um ein stockwerkrahmenartiges System handelt und die Schnittkräfte mit Hilfe eines allgemeinen Rahmenberechnungsverfahrens ermittelt werden. Sehr oft trifft man jedoch Fassadensysteme an, welche die Anwendung von einfacheren, speziellen Berechnungsmethoden zulassen. Zwei solche sehr häufig vorkommende Fassadentypen sollen hier behandelt werden: Der symmetrische zweistielige Stockwerkrahmen und der symmetrische mehrstielige Stockwerkrahmen mit betont breiten Außenstieln. Die Berechnung beider Rahmenarten beruht auf der Dreimomentengleichung für den horizontal belasteten, symmetrischen zweistieligen Stockwerkrahmen, die daher im folgenden Abschnitt zunächst abgeleitet werden soll.

### Ableitung der Dreimomentengleichung und Berechnung der Schnittkräfte des zweistieligen Stockwerkrahmens

Die im folgenden abgeleiteten Beziehungen gelten für den in Bild 1 dargestellten *symmetrischen zweistieligen Stockwerkrahmen*, der durch horizontale, an den Rahmenknoten angreifende Kräfte  $P_i$  belastet ist. Es wird vorausgesetzt, dass die Querschnitte stabweise konstant sind und der Elastizitätsmodul für den ganzen Rahmen gleich ist. Der Einfluss sowohl der Querkräfte als auch der Normalkräfte in den Riegeln auf die elastischen Formänderungen bleibt unberücksichtigt; hingegen werden die Längenänderungen der Stiele in Folge der Normalkräfte in Rechnung gestellt.

Die *Systemabmessungen* sowie die *Numerierung der Rahmenknoten und Stockwerke* gehen aus Bild 1 hervor. Die Kräfte werden nach dem Rahmenknoten bezeichnet, an dem sie angreifen. Es bedeuten:

$F_m$  bzw.  $J_m$  die Fläche bzw. das Trägheitsmoment des Stielquerschnitts,

$K_m$  das Trägheitsmoment des Riegelquerschnitts,  $J_c$  ein beliebig gewähltes Vergleichsträgheitsmoment.

Wir führen die folgenden «reduzierten Stablängen» ein:

$$h'_m = h_m \frac{J_c}{J_m} \quad , \quad h''_m = h_m \frac{J_c}{l^2 F_m} \quad , \quad l'_m = l \frac{J_c}{K_m}$$

Als «Belastungsglieder» definieren wir:

$$\mathfrak{Q}_m = \sum_0^{m-1} P_i \quad , \quad \mathfrak{M}_m = \sum_0^{m-1} P_i (e_i - e_m)$$

$\mathfrak{Q}_m$  stellt die Querkraft und  $\mathfrak{M}_m$  das Biegemoment des stellvertretenden Kragträgers dar.

Die *Schnittkräfte* sind in Bild 2 in ihrer Wirkung auf den Rahmenknoten dargestellt; sie sind alle in positiver Richtung eingezeichnet. Es bedeuten:

$N_m$  bzw.  $Q_m$  die Normalkraft bzw. die Querkraft des Stieles,

$X_m$  bzw.  $Y_m$  das Fuß- bzw. Kopfmoment des Stieles,

$V_m$  bzw.  $Z_m$  die Querkraft bzw. das Knotenmoment des Riegels.

Die Schnittkräfte der Stiele werden nach dem betr. Stockwerk, diejenigen der Riegel nach dem betr. Knotenpunkt bezeichnet.

Die einseitige Belastung des symmetrischen Stockwerkrahmens ( $P \rightarrow$ ) kann in einen symmetrischen Anteil ( $\frac{1}{2}P \rightarrow \leftarrow \frac{1}{2}P$ ) und in einen antimetrischen Anteil ( $\frac{1}{2}P \rightarrow \frac{1}{2}P \rightarrow$ ) zerlegt werden. Ersterer erzeugt keine Biegemomente und braucht deshalb nicht in Betracht gezogen zu werden. Für den antimetrischen Lastanteil verschwinden die symmetrischen Schnittkräfte Biegemomente und Normalkraft in Riegelmitte; ebenso ist dort die vertikale Verschiebung gleich Null. Aus dem Gleichgewicht und dem antimetrischen Verlauf der Schnittkräfte folgt:

$$(1) \quad 2Q_m = \mathfrak{Q}_m \quad \text{und}$$

$$(2) \quad N_m l + 2X_m = \mathfrak{M}_m$$

Wir betrachten nun den in Bild 3 dargestellten, aus dem antimetrisch belasteten, deformierten Stockwerkrahmen herausgeschnittenen *einhüftigen Rahmen*. Die Schnittkräfte und die Kraft  $\frac{1}{2}P_{m-1}$  stehen miteinander im Gleichgewicht. Der Rahmenknoten  $m$  bzw.  $m-1$  hat sich um das Mass  $\Delta_m$  bzw.  $\Delta_{m-1}$  vertikal verschoben und gleichzeitig um den Winkel  $\varphi_m$  bzw.  $\varphi_{m-1}$  verdreht. Um ein statisch bestimmtes System zu erhalten, denken wir uns im Punkt  $m$  ein festes und im Punkt I ein horizontal bewegliches Lager. Wir fassen jetzt die Kräfte  $\frac{1}{2}P_{m-1}$ ,  $Q_{m-1}$ ,  $N_{m-1}$ ,  $X_{m-1}$  und  $X_m$  als «Belastung» und die Kräfte  $Q_m$ ,  $N_m$  und  $V_{m-1}$  als «Reaktionen» auf und erklären die vertikale Verschiebung  $\Delta_{m-1}$  als «Senkung» des Auflagers I. Die Gleichgewichtsbedingung liefert hier in Verbindung mit Gleichung (1):

$$(3) \quad \frac{1}{2}P_{m-1} + Q_{m-1} = Q_m = \frac{1}{2}\mathfrak{Q}_m$$

Die Bilder 4 und 5 zeigen zum einhüftigen Rahmen von Bild 3 den Verlauf der Biegemomente  $M$  infolge der «Belastung» und der «virtuellen» Biegemomente  $\bar{M}_{m-1}$  bzw.  $\bar{M}_m$  infolge eines am Knotenpunkt  $m-1$  bzw.  $m$  angreifenden virtuellen Momentes = 1.

Wir finden die *Knotendrehwinkel*:

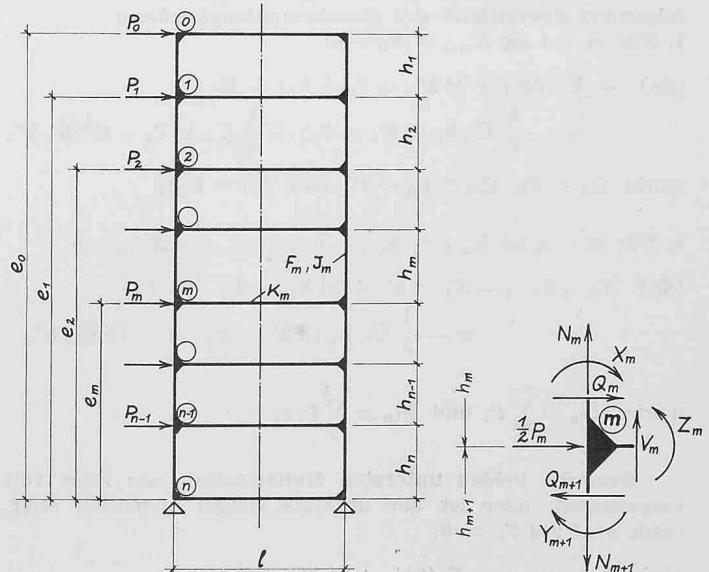


Bild 1. Symmetrischer zweistieliger Stockwerkrahmen

Bild 2. Schnittkräfte am Rahmenknoten

$$E J_c \varphi_m = \int \bar{M}_m M ds' + \frac{2 \Delta_{m-1}}{l} E J_c$$

$$(4) \quad E J_c \varphi_m = \frac{1}{2} \mathfrak{Q}_m h_m \left( \frac{1}{2} h'_m + \frac{1}{6} l'_{m-1} \right) + \\ + X_{m-1} \cdot \frac{1}{6} l'_{m-1} - X_m \left( h'_m + \frac{1}{6} l'_{m-1} \right) + \frac{2 \Delta_{m-1}}{l} E J_c$$

$$E J_c \varphi_{m-1} = \int \bar{M}_{m-1} M ds' + \frac{2 \Delta_{m-1}}{l} E J_c$$

$$(5) \quad E J_c \varphi_{m-1} = \frac{1}{2} \mathfrak{Q}_m h_m \cdot \frac{1}{6} l'_{m-1} + \\ + X_{m-1} \cdot \frac{1}{6} l'_{m-1} - X_m \cdot \frac{1}{6} l'_{m-1} + \frac{2 \Delta_{m-1}}{l} E J_c$$

Wir transponieren die Gleichung (5) von  $\varphi_{m-1}$  nach  $\varphi_m$ :

$$(5') \quad E J_c \varphi_m = \frac{1}{2} \mathfrak{Q}_{m+1} h_{m+1} \cdot \frac{1}{6} l'_m + \\ + X_m \cdot \frac{1}{6} l'_m - X_{m+1} \cdot \frac{1}{6} l'_m + \frac{2 \Delta_m}{l} E J_c$$

Nach Gleichsetzen der beiden Ausdrücke für  $E J_c \cdot \varphi_m$  nach Gleichung (4) und (5') erhalten wir geordnet:

$$X_{m-1} \cdot l'_{m-1} - X_m (6 h'_m + l'_{m-1} + l'_m) + \\ + X_{m+1} \cdot l'_m + \frac{12 (\Delta_{m-1} - \Delta_m) E J_c}{l} + \\ + \frac{1}{2} \mathfrak{Q}_m h_m (3 h'_m + l'_{m-1}) - \\ - \frac{1}{2} \mathfrak{Q}_{m+1} h_{m+1} l'_m = 0,$$

wobei

$$\Delta_{m-1} - \Delta_m = \frac{N_m h_m}{F_m E} \quad \text{und} \quad N_m = \frac{\mathfrak{M}_m - 2 X_m}{l} \quad \text{nach Gl. (2)},$$

also  $\frac{12 (\Delta_{m-1} - \Delta_m) E J_c}{l} = 12 (\mathfrak{M}_m - 2 X_m) h_m \frac{J_c}{l^2 F_m} =$

$$= 12 \mathfrak{M}_m h''_m - 24 X_m h''_m;$$

damit lautet die Dreimomentengleichung:

$$(6) \quad X_{m-1} \cdot l'_{m-1} - X_m (6 h'_m + 24 h''_m + l'_{m-1} + l'_m) + \\ + X_{m+1} \cdot l'_m = - \frac{1}{2} \mathfrak{Q}_m h_m (3 h'_m + l'_{m-1}) + \\ + \frac{1}{2} \mathfrak{Q}_{m+1} h_{m+1} l'_m - 12 \mathfrak{M}_m h''_m$$

Für die praktische Anwendung interessieren uns noch die folgenden Spezialfälle der Dreimomentengleichung:

1. Für  $m = 1$  ist  $X_{m-1} = X_0 = 0$ :

$$(6a) \quad - X_1 (6 h'_1 + 24 h''_1 + l'_0 + l'_1) + X_2 l'_1 = \\ = - \frac{1}{2} \mathfrak{Q}_1 h_1 (3 h'_1 + l'_0) + \frac{1}{2} \mathfrak{Q}_2 h_2 l'_1 - 12 \mathfrak{M}_1 h''_1$$

worin  $\mathfrak{Q}_1 = P_0$ ,  $\mathfrak{Q}_2 = P_0 + P_1$  und  $\mathfrak{M}_1 = P_0 h_1$

2. Für  $m = n$  ist  $h_{m+1} = h_{n+1} = 0$  und  $X_{m+1} = X_{n+1} = 0$ :

$$(6b) \quad X_{n-1} l'_{n-1} - X_n (6 h'_n + 24 h''_n + l'_{n-1} + l'_n) = \\ = - \frac{1}{2} \mathfrak{Q}_n h_n (3 h'_n + l'_{n-1}) - 12 \mathfrak{M}_n h''_n$$

worin  $\mathfrak{Q}_n = \sum_{i=0}^{n-1} P_i$  und  $\mathfrak{M}_n = \sum_{i=0}^{n-1} P_i e_i$

Sind die beiden untersten Rahmenstiele am Fuss voll eingespannt, oder ist der unterste Riegel unendlich steif, dann wird mit  $l'_n = 0$ :

$$(6c) \quad X_{n-1} l'_{n-1} - X_n (6 h'_n + 24 h''_n + l'_{n-1}) = \\ = - \frac{1}{2} \mathfrak{Q}_n h_n (3 h'_n + l'_{n-1}) - 12 \mathfrak{M}_n h''_n$$

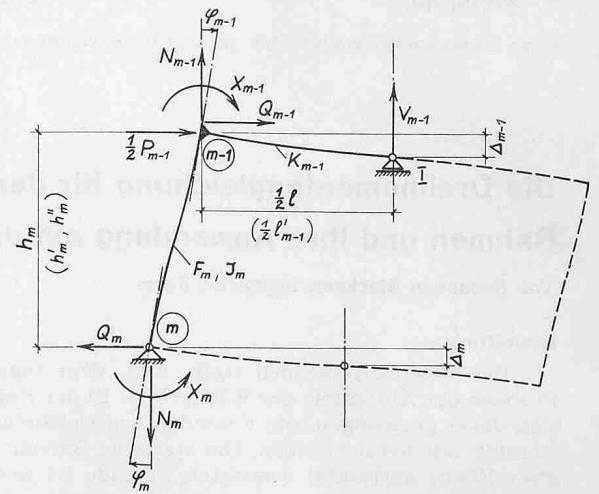


Bild 3. Eingespannter Rahmen

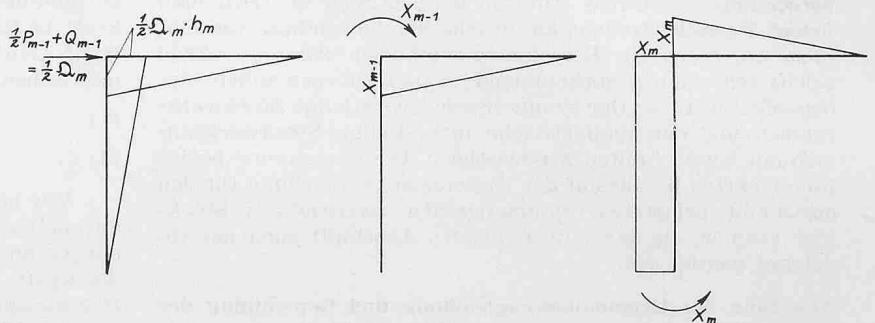


Bild 4. Biegemomente  $M$  infolge der «Belastung»

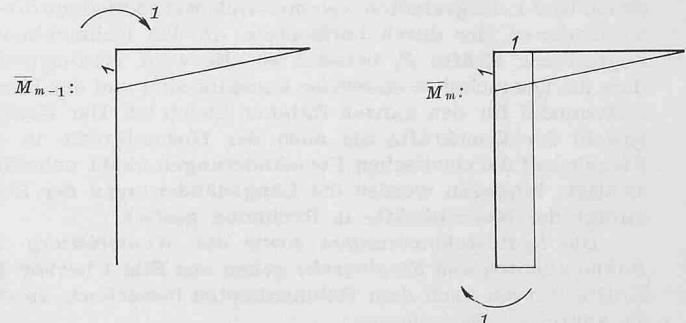


Bild 5. «Virtuelle» Biegemomente

Die Berechnung der Fußmomente  $X_i$  der Stiele erfolgt nun im Prinzip in gleicher Weise wie die Berechnung der Stützenmomente eines durchlaufenden Balkens mit Hilfe der Clapeyronschen Dreimomentengleichung. Wir stellen die Gleichung (6) nacheinander für  $m = 1, 2, 3, \dots, n$  auf, — für  $m = 1$  und  $m = n$  gelten die Gleichungen (6a) und (6b) — und erhalten nach Auflösung des Gleichungssystems die Knotenmomente  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ .

Für die Querkraft  $Q_m$  und die Normalkraft  $N_m$  des Stiels benutzen wir die Gleichungen (1) und (2):

$$(1') \quad Q_m = \frac{1}{2} \mathfrak{Q}_m \quad (2') \quad N_m = \frac{\mathfrak{M}_m - 2 X_m}{l}$$

Für das Kopfmoment  $Y_m$  finden wir, vgl. Bild 6:

$$Y_m = Q_m \cdot h_m - X_m, \quad \text{wobei } Q_m = \frac{1}{2} \mathfrak{Q}_m$$

nach Gleichung (1)

$$(7) \quad Y_m = \frac{1}{2} \mathfrak{Q}_m h_m - X_m$$

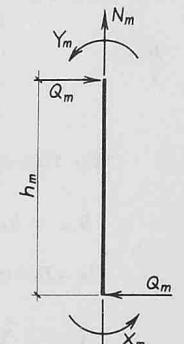


Bild 6. Schnittkräfte des Stiels

Die Gleichungen für das Knotenmoment  $Z_m$  und die Querkraft  $V_m$  des Riegels können an Hand der Bilder 2 und 3 abgelesen werden:

$$(8) \quad Z_m = X_m + Y_{m+1}$$

$$(9) \quad V_m = \frac{2 Z_m}{l}$$

### Der zweistufige Fassadenrahmen mit kurzen Riegeln

Wir betrachten den in Bild 7 dargestellten, *symmetrischen zweistufigen Fassadenrahmen*. Die lichte Weite der Riegel ist im Verhältnis zur Breite der beiden Stiele gesehen sehr klein, zudem sind die Riegel sehr gedrungen. Die der Dreimomentengleichung (6) zugrundeliegenden Voraussetzungen sind hier zum Teil nicht erfüllt:

1. Der Riegelquerschnitt kann wegen der gegenseitigen Durchdringung von Stiel und Riegel nicht als unveränderlich angesehen werden.

2. Der Einfluss der Querkräfte auf die elastische Verformung der Riegel ist wegen deren Gedrungenheit nicht vernachlässigbar.

Neben den weiterhin geltenden Bezeichnungen des zweistufigen Stockwerkrahmens von Bild 1 bedeuten:

$A_m$  die Fläche des Riegelquerschnitts,

$d_m$  die Riegelhöhe bei rechteckigem Querschnitt,

$\kappa_m$  die Schubverteilungszahl des Riegelquerschnitts,

$a$  die lichte Weite des Riegels,

$b$  die halbe Stielbreite.

In Bild 8 ist ein durch die Schnittkräfte  $V$  und  $Z$  antimetrisch belasteter Riegel dargestellt mit den dazugehörigen Abbildungen der Querkraft  $Q$ , des Biegemomentes  $M$  und der elastischen Linie mit dem Endtangentenwinkel  $\tau$ . Der Einfachheit halber sind die Indizes  $m$  weggelassen. Der Riegel ist auf der Strecke  $b$ , wo er den Stiel durchdringt, unendlich steif; zwischen den Stielen, auf der Strecke  $a$ , hat sein Querschnitt die Fläche  $A$ , das Trägheitsmoment  $K$  und die Schubverteilungszahl  $\kappa$ .

Wir berechnen den Endtangentenwinkel  $\tau$ :

$$2 Z \tau = \frac{1}{E K} \int M^2 ds + \frac{\kappa}{G A} \int Q^2 ds,$$

worin  $E$  = Elastizitätsmodul und  $G$  = Schubmodul,

$$\tau = \frac{Z a^3}{6 E K l^2} \left( 1 + \frac{12 E K \kappa}{G A a^2} \right)$$

Für die Elastizität des Riegels ist das Verhältnis  $\tau : Z$  charakteristisch:

$$\frac{\tau}{Z} = \frac{a^3}{6 E K l^2} \left( 1 + \frac{12 E K \kappa}{G A a^2} \right)$$

Setzt man für Eisenbeton  $G = 3/7 E$ , so erhält man als *Mass für die Elastizität des Fassadenriegels*:

$$(10) \quad \frac{\tau}{Z} = \frac{a^3}{6 E K l^2} \left( 1 + \frac{28 K \kappa}{A a^2} \right)$$

Wir bestimmen nun das *Trägheitsmoment  $K'$  des Ersatzriegels*, dessen Querschnitt auf die ganze Länge  $l$  konstant ist und welcher bei Ausschluss der Querkraftverformung die gleiche Elastizität  $\tau : Z$  besitzt wie der vorhandene Riegel. Wir setzen in Gleichung (10)  $a = l$ ,  $K = K'$  und den zweiten Ausdruck in der Klammer, der den Einfluss der Querkraftverformung darstellt, gleich Null:

$$(11) \quad \frac{\tau}{Z} = \frac{l}{6 E K'}$$

Nach Gleichsetzen der rechten Seiten der Gleichungen (10) und (11) finden wir:

$$(12) \quad \frac{1}{K'} = \frac{1}{K} \left( \frac{a}{l} \right)^3 \left( 1 + \frac{28 K \kappa}{A a^2} \right)$$

Wir können nun den Ersatzriegel an Stelle des vorhandenen Fassadenriegels in den Stockwerkrahmen einbauen, ohne etwas an dem elastischen Verhalten des Rahmens zu ändern. Bei Zugrundelegung des konstanten Trägheitsmo-

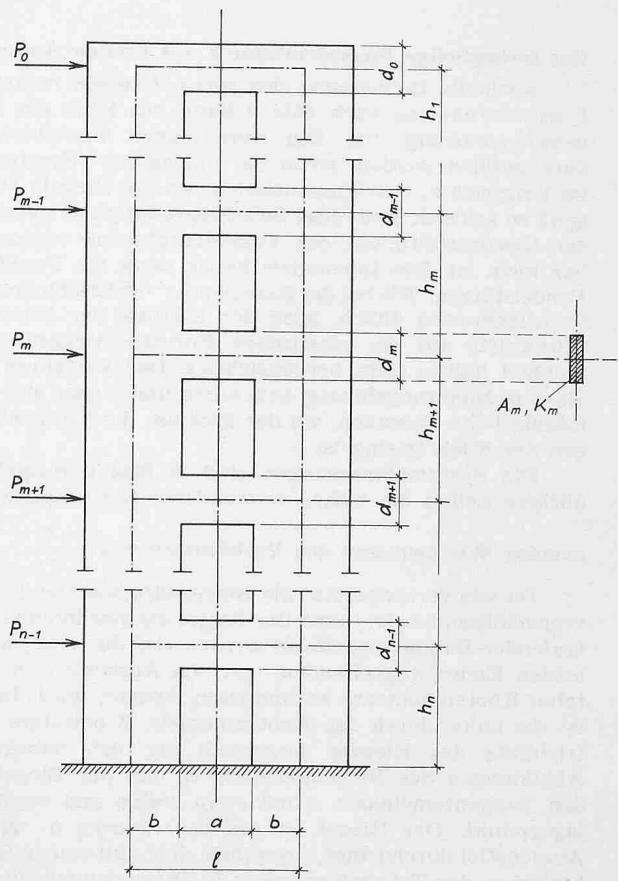


Bild 7. Zweistufiger Fassadenrahmen

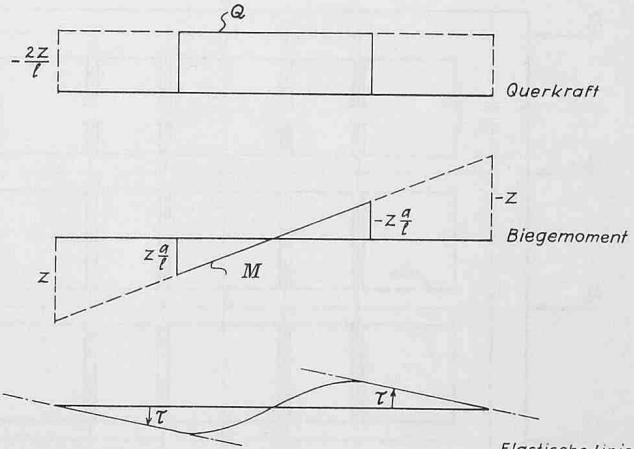
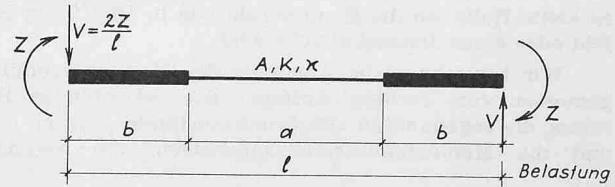


Bild 8. Antimetrisch belasteter Fassadenriegel

mentes  $K'$  des Ersatzriegels gelten die für den zweistufigen Stockwerkrahmen entwickelten Gleichungen. Für die *reduzierte Riegelstützweite  $l'$*  ist jetzt zu setzen:

$$(13) \quad l' = l \frac{J_c}{K'_m} = l \frac{J_c}{K_m} \left( \frac{a}{l} \right)^3 \left( 1 + \frac{28 K \kappa}{A a^2} \right)$$

Bei rechteckigem Riegelquerschnitt ist mit  $\frac{K_m}{A_m} = \frac{d_m^2}{12}$  und

$\kappa = 1,2$ :

$$(13') \quad l' = l \frac{J_c}{K_m} \left( \frac{a}{l} \right)^3 \left( 1 + 2,8 \frac{d_m^2}{a^2} \right)$$

## Der mehrstiellige Fassadenrahmen mit breiten Aussenstielen

Auch die Berechnung des *symmetrischen mehrstielligen Fassadenrahmens* nach Bild 9 kann mit Hilfe der Dreimomentengleichung für den zweistieligen Stockwerkrahmen durchgeführt werden, wenn die Innenstiele (Fensterpfeiler) im Vergleich zu den Aussenstielen und den Riegeln (Brüstungen) so schlank sind, dass ihre Biegesteifigkeit gemessen an der Gesamtsteifigkeit des Fassadenrahmens vernachlässigbar klein ist. Die Innenstiele haben dann die Funktion von Pendelstützen. Wie bei der Berechnung von Eisenbetonrahmen im allgemeinen üblich, wird der Einfluss der Normal- und Querkräfte auf die elastischen Formänderungen der Einfachheit halber nicht berücksichtigt. Das Verfahren ist also als eine Näherungslösung anzusehen und eignet sich nur für mässig hohe Fassaden, wo der Einfluss der Längenänderungen der Stiele gering ist.

Die Systemabmessungen sind in Bild 9 festgelegt; im übrigen gelten die bisher verwendeten Bezeichnungen sinngemäß. Wir benützen den Verhältniswert  $\alpha = \frac{a}{s_I}$

Da wie vorausgesetzt die Biegesteifigkeit der Innenstiele vernachlässigbar ist, kann der Riegel als gewöhnlicher durchlaufender Balken aufgefasst werden, der durch die an seinen beiden Enden angreifenden, von den Aussenstielen eingeleiteten Knotenmomente antimetrisch belastet wird. In Bild 10 ist die linke, durch das Knotenmoment  $Z$  belastete Symmetriehälfte des Riegels dargestellt mit den dazugehörigen Abbildungen des Biegemomentes  $M$  und der Biegelinie mit den Tangentenwinkel  $\tau$  und  $\tau'$  im ersten und zweiten Auflagerpunkt. Der Riegel ist auf der Strecke  $b$ , wo er den Aussenstiel durchdringt, unendlich steif; auf seiner Restlänge besitzt er das Trägheitsmoment  $K$ . Biegemoment und Durchbiegung verschwinden in der Symmetriaxe, also können wir dort ein momentenfreies Auflager annehmen; dabei spielt es keine Rolle, ob die Symmetrale wie in Bild 9 ein Riegel oder einen Innenstiel schneidet.

Wir bezeichnen die Abstände der Momentennullpunkte, gemessen vom rechten Auflager des betreffenden Riegelfeldes, die sogenannten «Festpunktabstände», mit  $c_I$ ,  $c_{II}$  usw. und die Momentenweiterleitungszahlen, die sogenannten

«Festpunktzahlen», mit  $\gamma_I$ ,  $\gamma_{II}$  usw. Zwischen Festpunktzahl und Festpunktabstand besteht die Beziehung:

$$\gamma_I = \frac{c_I}{s_I - c_I} \quad , \quad \gamma_{II} = \frac{c_{II}}{s_{II} - c_{II}} \quad \text{usw.}$$

Das Biegemoment an der Innenkante des Aussenstiels hat die Grösse:

$$(14) \quad Z' = Z \frac{a}{s_I} - \gamma_I Z \frac{b}{s_I} = Z \{ \alpha - \gamma_I (1 - \alpha) \}$$

Die Endtangentenwinkel des ersten Riegelfeldes können nach Mohr berechnet werden; wir erhalten mit  $Z'$  nach Gleichung (14) und  $\alpha = \frac{a}{s_I}$ :

$$(15) \quad E K \tau = \frac{\alpha^2 s_I Z}{6} \{ 2\alpha - \gamma_I (3 - 2\alpha) \} \quad \text{und}$$

$$(16) \quad E K \tau' = \frac{\alpha^2 s_I Z}{6} (3 - 2\alpha) - \frac{\gamma_I \alpha s_I Z}{6} (6 - 6\alpha + 2\alpha^2)$$

Für den Endtangentenwinkel des zweiten Riegelfeldes, ebenfalls nach Mohr, finden wir:

$$(17) \quad E K \tau' = \frac{\gamma_I s_{II} Z}{6} (2 - \gamma_{II})$$

Indem wir die rechten Seiten der Gleichungen (16) und (17) gleichsetzen, bekommen wir die *Bestimmungsgleichung für die Festpunktzahl  $\gamma_I$* :

$$(18) \quad \gamma_I = \frac{s_I \alpha^2 (3 - 2\alpha)}{s_I \alpha (6 - 6\alpha + 2\alpha^2) + s_{II} (2 - \gamma_{II})}$$

Die übrigen Festpunktzahlen des Riegels  $\gamma_{II}$ ,  $\gamma_{III}$  usw. können in bekannter Weise nach den Rechenvorschriften für den durchlaufenden Träger mit konstantem Trägheitsmoment ermittelt werden (vgl. Literatur über Festpunktverfahren). Für das an die Symmetrale angrenzende Riegelfeld ist stets  $\gamma = 0$ . Im Beispiel der Bilder 9 und 10 ist  $\gamma_{III} = 0$ ,  $\gamma_{II} = s_{II}/2 (s_{II} + s_{III})$ ,  $\gamma_I$  nach Gleichung (18).

Das für die *Elastizität des Riegels* charakteristische Verhältnis  $\tau:Z$  ist bestimmt durch die Gleichung (15):

$$(15') \quad \frac{\tau}{Z} = \frac{s_I \alpha^2}{6 E K} \{ 2\alpha - \gamma_I (3 - 2\alpha) \}$$

Wir können nun die gleichen Ueberlegungen anstellen wie bei der Behandlung des zweistieligen Fassadenrahmens mit kurzen Riegeln. Für den *Ersatzriegel* gilt unverändert die Gleichung (11):

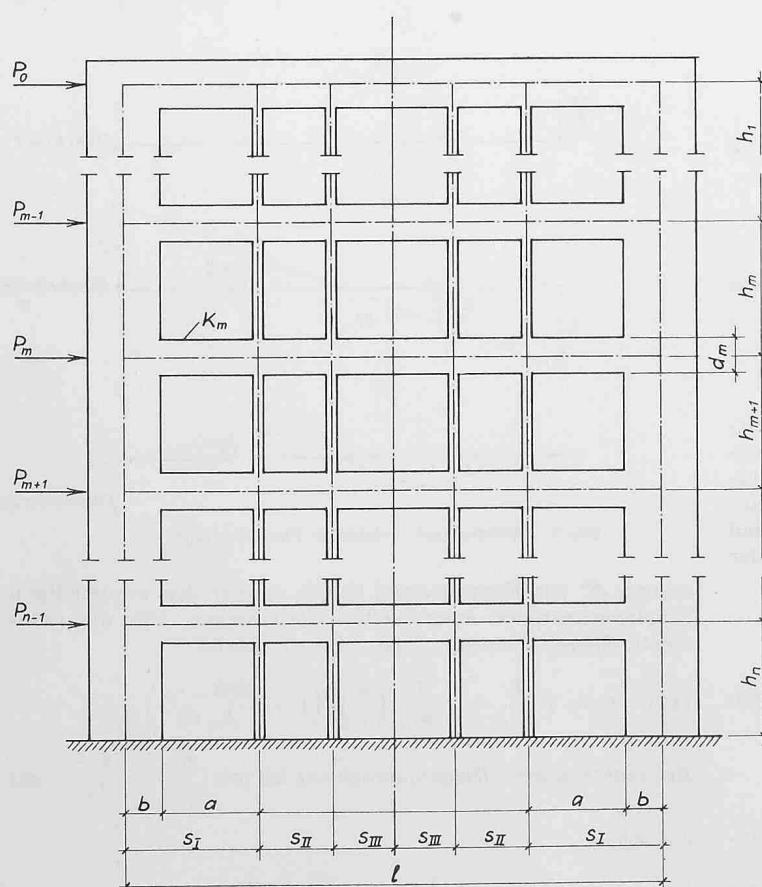


Bild 9. Mehrstielliger Fassadenrahmen

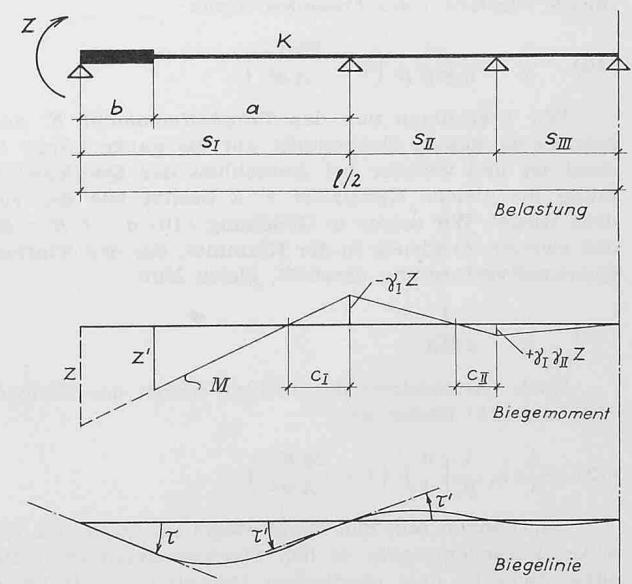


Bild 10. Belastete linke Riegelhälfte

$$(11) \quad \frac{\tau}{Z} = \frac{l}{6 E K'}$$

Nach Gleichsetzen der rechten Seiten der Gleichungen (15') und (11) finden wir:

$$(19) \quad \frac{1}{K'} = \frac{s_I \alpha^2}{l K} \{ 2 \alpha - \gamma_I (3 - 2 \alpha) \}$$

Bei Verwendung des Ersatzriegels anstelle des vorhandenen Riegels können wir die für den zweistieligen Stockwerkrahmen entwickelte Dreimomentengleichung für die Berechnung der Fußmomente der Außenstiele verwenden. Für die reduzierte Riegelstützweite  $l'$  ist jetzt zu setzen:

$$(20) \quad l'_m = l \frac{J_c}{K'_m} = s_I \frac{J_c}{K_m} \alpha^2 \{ 2 \alpha - \gamma_I (3 - 2 \alpha) \}$$

Da wir den Einfluss der Normalkräfte vernachlässigen, müssen wir in der Dreimomentengleichung

$$h''_m = h_m \frac{J_c}{l^2 F_m} = 0 \text{ setzen; damit lauten die Gleichungen}$$

(6), (6a) und (6c):

$$(6') \quad X_{m-1} \cdot l'_{m-1} - X_m (6 h'_m + l'_{m-1} + l'_m) + X_{m+1} \cdot l'_m = -\frac{1}{2} \mathfrak{Q}_m h_m (3 h'_m + l'_{m-1}) + \frac{1}{2} \mathfrak{Q}_{m+1} h_{m+1} l'_m$$

$$(6'a) \quad -X_1 (6 h'_1 + l'_0 + l'_1) + X_2 l'_1 = -\frac{1}{2} \mathfrak{Q}_1 h_1 (3 h'_1 + l'_0) + \frac{1}{2} \mathfrak{Q}_2 h_2 l_1 \quad \text{für } m = 1$$

$$(6'c) \quad X_{n-1} l'_{n-1} - X_n (6 h'_n + l'_{n-1}) = -\frac{1}{2} \mathfrak{Q}_n h_n (3 h'_n + l'_{n-1})$$

für  $m = n$  bei voller Einspannung der Außenstiele.

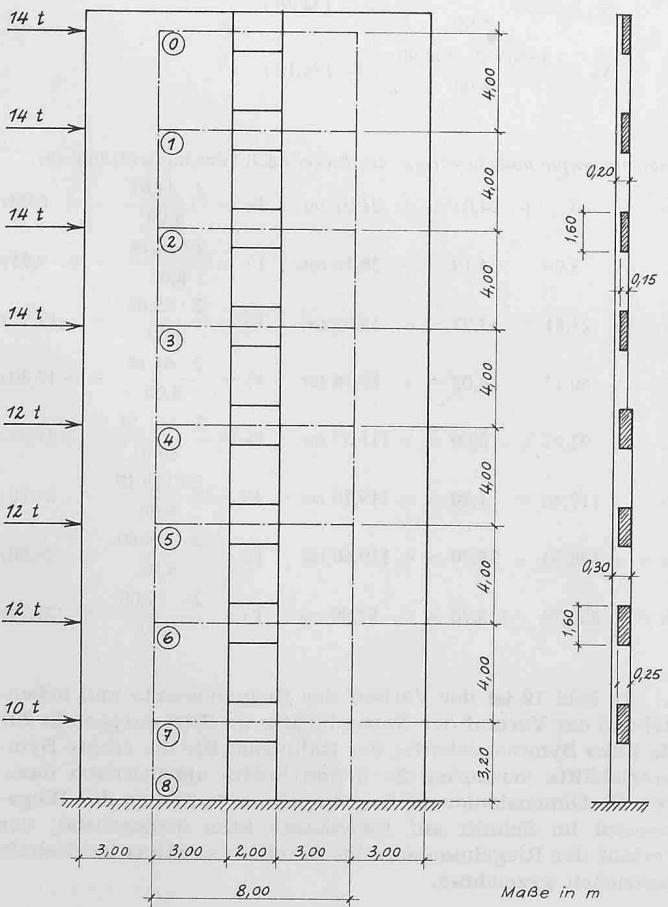


Bild 11. Achtstöckiger zweistieliger Fassadenrahmen

Für die Querkräfte und Kopfmomente der Außenstiele gelten unverändert die Gleichungen (1') und (7), für das am Riegelende angreifende Knotenmoment  $Z$  die Gleichung (8). Der weitere Momentenverlauf im Riegel ist gegeben durch die Festpunktzahlen  $\gamma_I$ ,  $\gamma_{II}$  usw., und aus diesem lassen sich sowohl die Querkräfte im Riegel als auch die Normalkräfte in den Innen- und Außenstielen bestimmen.

#### Zahlenbeispiel

Wir berechnen die Schnittkräfte des in Bild 11 dargestellten achtstöckigen zweistieligen Fassadenrahmens.

Querschnittswerte:

$$F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = 0,20 \cdot 6,00 = 1,20 \text{ m}^2 ;$$

$$F_5 = F_6 = F_7 = F_8 = 0,30 \cdot 6,00 = 1,80 \text{ m}^2 ;$$

$$A_0 = A_1 = A_2 = A_3 = 0,15 \cdot 1,60 = 0,24 \text{ m}^2 ;$$

$$A_4 = A_5 = A_6 = A_7 = 0,25 \cdot 1,60 = 0,40 \text{ m}^2 ;$$

$$J_1 = J_2 = J_3 = J_4 = \frac{1}{12} 0,20 \cdot 6,00^3 = 3,60 \text{ m}^4$$

$$J_5 = J_6 = J_7 = J_8 = \frac{1}{12} 0,30 \cdot 6,00^3 = 5,40 \text{ m}^4$$

$$K_0 = K_1 = K_2 = K_3 = \frac{1}{12} 0,15 \cdot 1,60^3 = 0,0512 \text{ m}^4$$

$$K_4 = K_5 = K_6 = K_7 = \frac{1}{12} 0,25 \cdot 1,60^3 = 0,0853 \text{ m}^4$$

$$J_0 = J_5 = 5,40 \text{ m}^4 \text{ (gewählt)}$$

Reduzierte Stablängen:

$$h_1' = h_2' = h_3' = h_4' = 4,00 \frac{5,40}{3,60} = 6,00 \text{ m} ;$$

$$h_5' = h_6' = h_7' = 4,00 \frac{5,40}{5,40} = 4,00 \text{ m} ;$$

$$h_8' = 3,20 \frac{5,40}{5,40} = 3,20 \text{ m} ;$$

$$h_1'' = h_2'' = h_3'' = h_4'' = 4,00 \frac{5,40}{8,00^2 \cdot 1,20} = 0,281 \text{ m}$$

$$h_5'' = h_6'' = h_7'' = 4,00 \frac{5,40}{8,00^2 \cdot 1,80} = 0,188 \text{ m}$$

$$h_8'' = 3,20 \frac{5,40}{8,00^2 \cdot 1,80} = 0,150 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} l_0' = l_1' = l_2' = l_3' &= \\ &= 8,00 \frac{5,40}{0,0512} \left( \frac{2,00}{8,00} \right)^3 \left( 1 + 2,8 \frac{1,60^2}{2,00^2} \right) = 36,8 \text{ m} \end{aligned} \quad \left. \begin{aligned} l_4' = l_5' = l_6' = l_7' &= \\ &= 8,00 \frac{5,40}{0,0853} \left( \frac{2,00}{8,00} \right)^3 \left( 1 + 2,8 \frac{1,60^2}{2,00^2} \right) = 22,1 \text{ m} \end{aligned} \right\} \text{nach Gleichung (13')}$$

Belastungsglieder:

$$\mathfrak{Q}_1 = 14 \text{ t} \quad \mathfrak{M}_1 = 14 \cdot 4,00 = 56 \text{ tm}$$

$$\mathfrak{Q}_2 = 14 + 14 = 28 \text{ t} \quad \mathfrak{M}_2 = 56 + 28 \cdot 4,00 = 168 \text{ tm}$$

$$\mathfrak{Q}_3 = 28 + 14 = 42 \text{ t} \quad \mathfrak{M}_3 = 168 + 42 \cdot 4,00 = 336 \text{ tm}$$

$$\mathfrak{Q}_4 = 42 + 14 = 56 \text{ t} \quad \mathfrak{M}_4 = 336 + 56 \cdot 4,00 = 560 \text{ tm}$$

$$\mathfrak{Q}_5 = 56 + 12 = 68 \text{ t} \quad \mathfrak{M}_5 = 560 + 68 \cdot 4,00 = 832 \text{ tm}$$

$$\mathfrak{Q}_6 = 68 + 12 = 80 \text{ t} \quad \mathfrak{M}_6 = 832 + 80 \cdot 4,00 = 1152 \text{ tm}$$

$$\mathfrak{Q}_7 = 80 + 12 = 92 \text{ t} \quad \mathfrak{M}_7 = 1152 + 92 \cdot 4,00 = 1520 \text{ tm}$$

$$\mathfrak{Q}_8 = 92 + 10 = 102 \text{ t} \quad \mathfrak{M}_8 = 1520 + 102 \cdot 3,20 = 1846 \text{ tm}$$

Dreimomentengleichungen:

Berechnung des Klammerausdrucks  $(6 h'_m + 24 h''_m + l'_{m-1} + l'_m)$  in Gleichung (6),

$$\text{für } m = 1, 2, 3 : 6 \cdot 6,00 + 24 \cdot 0,281 + 36,8 + 36,8 = 116,4$$

$$\text{für } m = 4 : 6 \cdot 6,00 + 24 \cdot 0,281 + 36,8 + 22,1 = 101,7$$

$$\text{für } m = 5, 6, 7 : 6 \cdot 4,00 + 24 \cdot 0,188 + 22,1 + 22,1 = 72,7$$

$$\text{für } m = 8 : 6 \cdot 3,20 + 24 \cdot 0,150 + 22,1 + 0 = 44,9$$

Berechnung des Klammerausdrucks  $(3 h'_m + l'_{m-1})$  in Gleichung (6),

$$\text{für } m = 1, 2, 3, 4 : 3 \cdot 6,00 + 36,8 = 54,8$$

$$\text{für } m = 5, 6, 7 : 3 \cdot 4,00 + 22,1 = 34,1$$

$$\text{für } m = 8 : 3 \cdot 3,20 + 22,1 = 31,7$$

Aufstellung der Dreimomentengleichungen (6) bzw. (6a) bzw. (6c):

1.  $-X_1 \cdot 116,4 + X_2 \cdot 36,8 =$   
 $= -\frac{1}{2} 14 \cdot 4,00 \cdot 54,8 + \frac{1}{2} 28 \cdot 4,00 \cdot 36,8 - 12 \cdot 56 \cdot 0,281 = + 338$
2.  $X_1 \cdot 36,8 - X_2 \cdot 116,4 + X_3 \cdot 36,8 =$   
 $= -\frac{1}{2} 28 \cdot 4,00 \cdot 54,8 + \frac{1}{2} 42 \cdot 4,00 \cdot 36,8 - 12 \cdot 168 \cdot 0,281 = -545$
3.  $X_2 \cdot 36,8 - X_3 \cdot 116,4 + X_4 \cdot 36,8 =$   
 $= -\frac{1}{2} 42 \cdot 4,00 \cdot 54,8 + \frac{1}{2} 56 \cdot 4,00 \cdot 36,8 - 12 \cdot 336 \cdot 0,281 = -1613$
4.  $X_3 \cdot 36,8 - X_4 \cdot 101,7 + X_5 \cdot 22,1 =$   
 $= -\frac{1}{2} 56 \cdot 4,00 \cdot 54,8 + \frac{1}{2} 68 \cdot 4,00 \cdot 22,1 - 12 \cdot 560 \cdot 0,281 = -5015$
5.  $X_4 \cdot 22,1 - X_5 \cdot 72,7 + X_6 \cdot 22,1 =$   
 $= -\frac{1}{2} 68 \cdot 4,00 \cdot 34,1 + \frac{1}{2} 80 \cdot 4,00 \cdot 22,1 - 12 \cdot 832 \cdot 0,188 = -2980$
6.  $X_5 \cdot 22,1 - X_6 \cdot 72,7 + X_7 \cdot 22,1 =$   
 $= -\frac{1}{2} 80 \cdot 4,00 \cdot 34,1 + \frac{1}{2} 92 \cdot 4,00 \cdot 22,1 - 12 \cdot 1152 \cdot 0,188 = -3987$
7.  $X_6 \cdot 22,1 - X_7 \cdot 72,7 + X_8 \cdot 22,1 =$   
 $= -\frac{1}{2} 92 \cdot 4,00 \cdot 34,1 + \frac{1}{2} 102 \cdot 3,20 \cdot 22,1 - 12 \cdot 1520 \cdot 0,188 = -6090$
8.  $X_7 \cdot 22,1 - X_8 \cdot 44,9 =$   
 $= -\frac{1}{2} 102 \cdot 3,20 \cdot 31,7 - 12 \cdot 1846 \cdot 0,150 = -8495$

Nach Auflösung des vorstehenden Gleichungssystems erhalten wir die Fussmomente der Stiele:

$$X_1 = + 3,99 \text{ tm}$$

$$X_2 = + 21,81 \text{ tm}$$

$$X_5 = + 117,40 \text{ tm}$$

$$X_6 = + 158,30 \text{ tm}$$

$$X_3 = + 50,13 \text{ tm}$$

$$X_4 = + 92,97 \text{ tm}$$

$$X_7 = + 222,70 \text{ tm}$$

$$X_8 = + 298,90 \text{ tm}$$

Kopfmomente und Normalkräfte der Stiele nach Gleichung (7) und (2):

$$Y_1 = \frac{1}{2} 14 \cdot 4,00 - 3,99 = + 24,01 \text{ tm}$$

$$Y_2 = \frac{1}{2} 28 \cdot 4,00 - 21,81 = + 34,19 \text{ tm}$$

$$Y_3 = \frac{1}{2} 42 \cdot 4,00 - 50,13 = + 33,87 \text{ tm}$$

$$Y_4 = \frac{1}{2} 56 \cdot 4,00 - 92,97 = + 19,03 \text{ tm}$$

$$Y_5 = \frac{1}{2} 68 \cdot 4,00 - 117,40 = + 18,60 \text{ tm}$$

$$Y_6 = \frac{1}{2} 80 \cdot 4,00 - 158,30 = + 1,70 \text{ tm}$$

$$Y_7 = \frac{1}{2} 92 \cdot 4,00 - 222,70 = - 38,70 \text{ tm}$$

$$Y_8 = \frac{1}{2} 102 \cdot 3,20 - 298,90 = - 135,70 \text{ tm}$$

$$N_1 = \frac{56 - 2 \cdot 3,99}{8,00} = + 6,00 \text{ t}$$

$$N_2 = \frac{168 - 2 \cdot 21,81}{8,00} = + 15,56 \text{ t}$$

$$N_3 = \frac{336 - 2 \cdot 50,13}{8,00} = + 29,46 \text{ t}$$

$$N_4 = \frac{560 - 2 \cdot 92,97}{8,00} = + 46,75 \text{ t}$$

$$N_5 = \frac{832 - 2 \cdot 117,40}{8,00} = + 74,65 \text{ t}$$

$$N_6 = \frac{1152 - 2 \cdot 158,30}{8,00} = + 104,40 \text{ t}$$

$$N_7 = \frac{1520 - 2 \cdot 222,70}{8,00} = + 134,40 \text{ t}$$

$$N_8 = \frac{1846 - 2 \cdot 298,90}{8,00} = + 156,10 \text{ t}$$

Knotenmomente und Querkräfte der Riegel nach Gleichung (8) und (9):

$$Z_0 = 0 + 24,01 = + 24,01 \text{ tm} \quad V_0 = \frac{2 \cdot 24,01}{8,00} = + 6,00 \text{ t}$$

$$Z_1 = + 3,99 + 34,19 = + 38,18 \text{ tm} \quad V_1 = \frac{2 \cdot 38,18}{8,00} = + 9,55 \text{ t}$$

$$Z_2 = + 21,81 + 33,87 = + 55,68 \text{ tm} \quad V_2 = \frac{2 \cdot 55,68}{8,00} = + 13,92 \text{ t}$$

$$Z_3 = + 50,13 + 19,03 = + 69,16 \text{ tm} \quad V_3 = \frac{2 \cdot 69,16}{8,00} = + 17,30 \text{ t}$$

$$Z_4 = + 92,97 + 18,60 = + 111,57 \text{ tm} \quad V_4 = \frac{2 \cdot 111,57}{8,00} = + 27,90 \text{ t}$$

$$Z_5 = + 117,40 + 1,70 = + 119,10 \text{ tm} \quad V_5 = \frac{2 \cdot 119,10}{8,00} = + 29,80 \text{ t}$$

$$Z_6 = + 158,30 - 38,70 = + 119,60 \text{ tm} \quad V_6 = \frac{2 \cdot 119,60}{8,00} = + 29,90 \text{ t}$$

$$Z_7 = + 222,70 - 135,70 = + 87,00 \text{ tm} \quad V_7 = \frac{2 \cdot 87,00}{8,00} = + 21,75 \text{ t}$$

In Bild 12 ist der Verlauf der Biegemomente und nebenstehend der Verlauf der Normalkräfte im Stiel dargestellt für die linke Symmetriehälfte des Rahmens; für die rechte Symmetriehälfte verlaufen die Schnittkräfte antimetrisch dazu. Für die Dimensionierung des Riegels ist natürlich das Biegemoment im Schnitt auf Innenkante Stiel massgebend; der Verlauf der Riegelmomente im Bereich des Stiels ist deshalb gestrichelt gezeichnet.

Adresse des Verfassers: Ing. Sebastian Steckner, Neu-Allschwil BL, Dürrenmattweg 66.

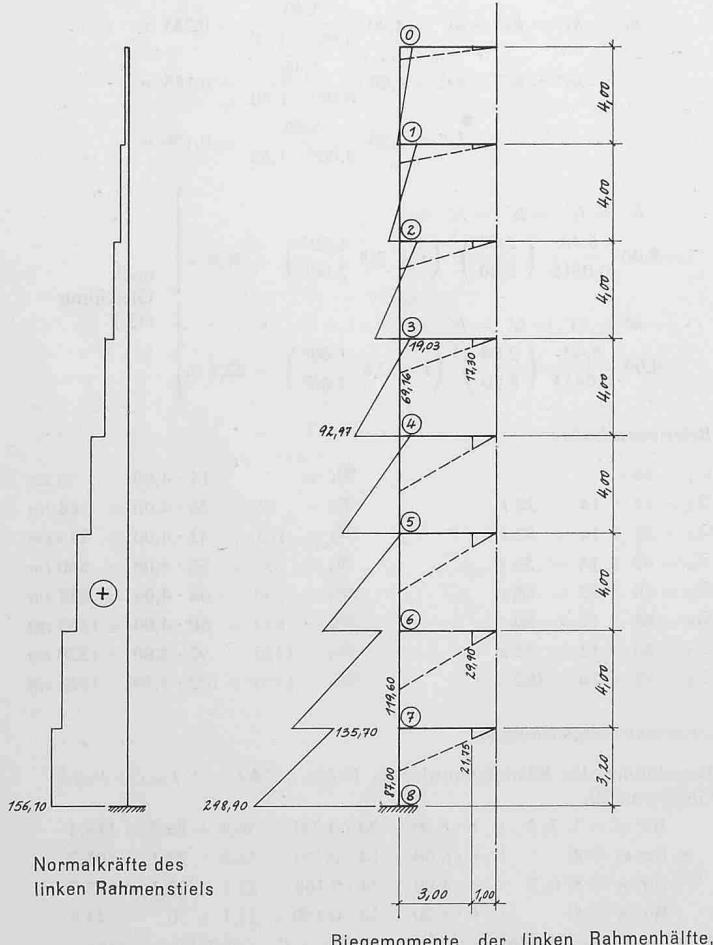


Bild 12. Schnittkräfte des achtstöckigen zweistieligen Fassadenrahmens