

Gewölbe-, Rahmen- und kontinuierliche Berechnung

von

Eisenbeton- und Eisenkonstruktionen

mit

Anwendung auf praktische Beispiele.

Von

Dr.-Ing. Heinrich Pilgrim

in Stuttgart.

Mit 120 Abbildungen im Texte.

INŻ. I. STELLA SAWICKI
AUTOR INŻYNIER CYWILNY
KONCES. BUDOWNICZY.

Wiesbaden
C. W. Kreidel's Verlag
1911.

Von demselben Verfasser erschienen im gleichen Verlage:

Theoretische Berechnung
der Eisenbeton-Konstruktionen
== mit ausführlichen Beispielen ==

Von

Heinrich Pilgrim

Ingenieur.

46 Seiten mit 78 Abbildungen — 1906

Preis M. 2.80



Vollständige

theoretische und praktische Berechnung
der Eisenbeton-Konstruktionen
mit genauer Gewölbe- und Rahmenberechnung
und ausführlichen Beispielen

Von

Dr.-Ing. Heinrich Pilgrim

100 Seiten mit 140 Textabbildungen — 1910

Preis M. 8.—



Gewölbe-, Rahmen- und kontinuierliche Berechnung

von

Eisenbeton- und Eisenkonstruktionen

mit

Anwendung auf praktische Beispiele.

Von

Dr.-Ing. Heinrich Pilgrim

in Stuttgart.

INŻ. I. STELLA SAWICKI
BUDOW. INŻYNIER CYWILNY
KONCES. BUDOWNICZY.

Mit 120 Abbildungen im Texte.

Wiesbaden
C. W. Kreidel's Verlag
1911.

Gewölbe-Rahmen- und kontinuierliche Berechnung



IV 35165

Anwendung auf praktische Beispiele.

Dr. Ing. Heinrich Pilgrim

in Stuttgart.

Mit 120 Abbildungen im Texte.

Verlag von Ernst & Sohn, Leipzig.

Verlag

Ernst & Sohn, Leipzig

1911

Vorwort.

Hiermit erscheint durch das freundliche Entgegenkommen des Verlages von C. W. Kreidel in Wiesbaden eine dritte Fortsetzung meiner Veröffentlichungen über Eisenbetonkonstruktionen.

In der ersten (Theoretische Berechnung der Eisenbetonkonstruktionen 1906) sind die Hauptformeln für Platten und Plattenbalken bei einfacher Biegung und exzentrischer Beanspruchung entwickelt und auf praktische Beispiele angewendet worden.

In der zweiten (Vollständige theoretische und praktische Berechnung der Eisenbetonkonstruktionen mit genauer Gewölbe- und Rahmenberechnung 1910) ist eine kurze Zusammenfassung und Erweiterung dieser Formeln auf beliebige Eisen- und Betonquerschnitte sowie die Theorie der Gewölbe- und Rahmenberechnung nebst Beispielen enthalten.

Die dritte bringt in der Einleitung die Entwicklung der Formeln für die letztere aus der allgemeinen Elastizitätslehre und dem Prinzip der virtuellen Verschiebung nach den Professoren Mörsch, Dr. Weyrauch und Dr. Müller-Breslau.

Hieraus ergibt sich dann die allgemeine Anwendbarkeit der Formeln für die Gewölbe- und Rahmenberechnung, wie sie in dem folgenden Sonderabdruck der (im Heft 3 von 1911 der Zeitschrift für Architektur und Ingenieurwesen) von mir veröffentlichten „Gewölbe- und Rahmenberechnung nach der Elastizitätstheorie“ kurz zusammengefaßt werden.

Die verschiedenen Beispiele von Rahmenkonstruktionen und zwar für Eingespanntsein sowie mit unteren und oberen Gelenken und auch bei Anwendung von Mittelstützen zeigen, wie die Berechnung derselben möglichst rasch durchgeführt werden kann und hierbei durch Einsetzung der richtigen Vorzeichen ein sicheres Ergebnis erhalten wird.

Die diskontinuierliche Berechnung für die Mittelstützen entspricht hierbei mehr der genauen Berechnung als die kontinuierliche Berechnung für dieselben, und zwar um so mehr, als gewöhnlich eine teilweise Einspannung vorhanden ist, und wird dadurch die Rahmenberechnung bedeutend vereinfacht.

Ebenso ist die Berechnung für mehrere Stockwerke mit Mittelstützen ausgeführt worden, indem jedes derselben als eingespannter Rahmen für sich berechnet und die erhaltenen Einspannmomente alsdann auch im unteren Stockwerk berücksichtigt sind (dieselben können auch auf Eckversteifungen übertragen werden).

Als Beispiel einer Gewölbeberechnung wurde eine Tunnelprofilberechnung mit Eingespanntsein und mit ringförmigem Querschnitt ausgeführt, und es ergibt sich hierbei dieselbe Stützlinie wie bei der graphischen Berechnung mit Verschiebungsplänen, und als sichere Kontrolle erhält man beim Anschluß in der gemeinsamen Fuge die Werte $H = 0$, $V = 1$ und $M = -\frac{l}{2}$, so daß die Berechnung in diesem Falle nicht wiederholt zu werden braucht. In den Tabellen ist hierbei immer von links nach rechts gerechnet worden, und zwar sowohl für vertikale als für horizontale Belastung, und für die letztere wird dieselbe Lamelleneinteilung wie bei der ersteren angewendet.

Das Beispiel einer kontinuierlichen Brücke mit drei verschiedenen Oeffnungen enthält sämtliche zur Berechnung von kontinuierlichen Trägern notwendigen Formeln, und zwar für gleichförmige Belastung und mit Einzellasten, wie sie schon von den Professoren Dr. Mohr und Dr. Weyrauch entwickelt worden sind und auch in der Veröffentlichung von 1910 abgeleitet werden. Diese Formeln sind alsdann auch zur Bestimmung von Einflußlinien bei beliebig vielen Oeffnungen verwendet worden, und ist nicht nur deren Berechnung sehr einfach, sondern auch durch die Verwendung der allgemein gebräuchlichen Formeln leicht zu verstehen und bei Einsetzung der richtigen Vorzeichen kann kein Fehler vorkommen (besonders einfach ist die Berechnung von zwei oder drei kontinuierlichen Oeffnungen mit Einzellasten).

Am Schluß ist noch der Rahmen für die kontinuierliche Brücke mit Mittelpfeilern berechnet worden, wobei sich insbesondere die Einfachheit der obigen Rahmenberechnung beim viereckigen Rahmen mit vertikalen und horizontalen Kräften zeigt.

Alle diese Entwicklungen und Anwendungen der Elastizitätslehre gelten auch für Eisenkonstruktionen und sind zum Teil hierfür durchgeführt worden, so daß sie auch dem Eisenkonstrukteur als Hilfsmittel beim Entwerfen und der Ausführung von eisernen Rahmen- und Bogenkonstruktionen sowie von kontinuierlichen Trägern dienen können.

Stuttgart, im Mai 1911.

Dr.-Ing. Heinrich Pilgrim.

Inhaltsübersicht.

Einleitung: Ableitung der theoretischen Formeln	Seite 5
Gewölbe- und Rahmenberechnung nach der Elastizitätslehre:	
Hauptformeln zur Berechnung der Gewölbe- und der Rahmenkonstruktionen.	10
Beispiele zu derselben:	
I. Vergleichende Berechnung für verschiedene Rahmenkonstruktionen eines Lokomotivschuppens	16
1. Dimensionierung des eingespannten Rahmens nach verschiedenen Berechnungsweisen.	16
2. Berechnung des Rahmens nach der Methode von Professor Mörsch für eingespannte Gewölbe	17
3. Berechnung des Rahmens nach den Formeln von Professor Dr. Müller-Breslau für eingespannte Stabzüge.	19
4. Vergleichende Berechnung der Momente des eingespannten Rahmens	21
5. Berechnung des eingespannten Rahmens mit einer Mittelsäule	22
6. Berechnung des Zweigelenrahmens ohne und mit Mittelsäule	23
7. Berechnung der Eiseneinlagen nach den von mir entwickelten Formeln	24
II. Berechnung eines eingespannten Rahmens für einen Güterschuppen	25
1. Getrennte Berechnung für das Eigengewicht, die Schneebelastung und den Winddruck.	25
2. Berechnung der Momente und Spannungen in den Ecken des Rahmens	26
III. Berechnung eines Güterschuppens ohne und mit unteren Gelenken sowie Mittelstützen	27
1. Berechnung des eingespannten und des Zweigelen-Rahmens ohne Mittelstützen	27
2. Berechnung des eingespannten und des Zweigelen-Rahmens mit Mittelstützen.	34
IV. Berechnung eines Güterschuppens ohne und mit oberen Gelenken sowie Mittelstützen	39
1. Berechnung des eingespannten Rahmens mit oberen Gelenken.	39
2. Berechnung des eingespannten Rahmens ohne obere Gelenke	44
V. Berechnung eines Güterschuppens mit oberem Boden und oberen Gelenken	49
1. Berechnung des Rahmens für zwei Stockwerke mit Mittelstützen	49
2. Bestimmung der Momentenflächen und Auflagerdrücke für dieselben	51
VI. Berechnung eines Tunnelprofils als eingespanntes Gewölbe und ringförmiger Rahmen	55
1. Berechnung als eingespanntes Gewölbe nach der Elastizitätslehre	55
2. Berechnung des bei B durchschnittenen ringförmigen Rahmens nach der Elastizitätslehre	59
3. Vergleichende Berechnung des ringförmigen Rahmens für verschiedene Fundamentstärken	63
4. Berechnung der Maximalspannungen des Tunnelquerschnitts und seiner Eiseneinlagen	69
VII. Berechnung einer kontinuierlichen Brücke nach der Elastizitätslehre.	72
1. Allgemeine Angaben über die Konstruktion der Brücke	72
2. Kontinuierliche Berechnung der Platte durch Koeffizienten	73
3. Berechnung der durchlaufenden Plattenbalken aus ihren Momentenflächen	73
4. Berechnung der Schubspannungen und der Abbiegungen für die Eisen aus den Querkräften	76
5. Berechnung der Fahrbahnplatte, der Querrippen und der Konsolen	81
6. Kontinuierliche Berechnung der Brücke mit Einflußlinien für mehrere Oeffnungen	83
7. Berechnung der kontinuierlichen Brücke mit Mittelpfeilern als eingespannter Rahmen	86

Einleitung.

Die folgende Abhandlung bildet eine Fortsetzung der von mir veröffentlichten Berechnungsweise für Gewölbe- und Rahmenkonstruktionen (s. theoretische und praktische Berechnung der Eisenbetonkonstruktionen mit genauer Gewölbe- und Rahmenberechnung 1910), in welcher alle wesentlichen Formeln derselben (mit richtiger Einsetzung der Vorzeichen) kurz zusammengefaßt werden und ihre Anwendung auf praktische Beispiele gezeigt wird.

Hierbei hat sich ergeben, daß die verschiedenen Berechnungsweisen nach der Elastizitätslehre von Mörsch, Weyrauch und Müller-Breslau dieselben Resultate ergeben, wie diejenigen nach dem Prinzip der virtuellen Verschiebung von Mohr und Müller-Breslau, und es sollen daher die Grundlagen dieser Berechnungsweisen kurz angeführt werden.

Nach der Methode von Mörsch (s. Berechnung der eingespannten Gewölbe, Zürich 1905) ergibt sich die Drehung für zwei benachbarte Querschnitte mit dem Abstand ds aus dem Drehungswinkel $d\gamma = \frac{a}{e}$ (mit dem

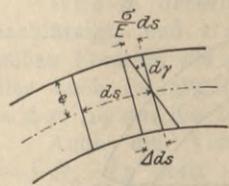


Abb. 1.

Kreisbogen a und dem Halbmesser e , wenn $\rho = \frac{180}{\pi}$ in $\frac{d\gamma}{\rho}$ weggelassen wird). Für a kann die Verkürzung oder Verlängerung $\frac{\sigma}{E} \cdot ds$ der äußersten Faser gesetzt werden (da $\frac{l}{l} = \frac{\sigma}{E}$ pro l. cm ist), so daß man

erhält $d\gamma = \frac{\sigma}{E} \cdot \frac{ds}{e}$, und aus dem Biegemoment M_x ergibt sich

$$\sigma = \frac{M_x}{W} = \frac{M_x \cdot e}{J}, \quad \text{somit auch}$$

$$1) \quad d\gamma = \frac{M_x}{E \cdot J} \cdot ds.$$

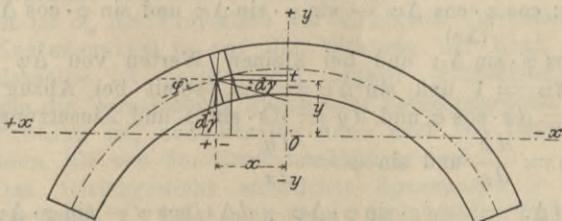


Abb. 2.

Durch die Normalkraft N_x tritt ferner ein Näherücken der Querschnitte ein, und zwar ist

$$2) \quad \Delta ds = \frac{N_x}{EF} \cdot ds \quad (\text{da } \sigma = \frac{N_x}{F} \text{ ist}).$$

Aus diesen zwei Grundgleichungen ergibt sich für das obengezeichnete Koordinatensystem, bei Annahme der gleichzeitigen Drehung der Koordinaten y und x um den Winkel $d\gamma$, eine Verschiebung in der x -Achse um

$dl = d\gamma \cdot y$ (wenn y für e gesetzt wird) — $\Delta ds \cdot \cos \varphi$ (für den Neigungswinkel φ der Stabachse bei x), und hieraus bei Berücksichtigung der Wärmezunahme um τ^0 (für die Temperaturendeckung α von 1^0 C) beim eingespannten Gewölbe

$$3) \quad 0 = \int \frac{M_x}{EJ} ds \cdot y - \int \frac{N_x}{EF} ds \cdot \cos \varphi + \alpha \tau l.$$

Ebenso ergibt sich die Verschiebung in der y -Achse aus

$$4) \quad 0 = - \int \frac{M_x}{EJ} ds \cdot x + \int \frac{N_x}{EF} ds \cdot \sin \varphi.$$

Die Gesamtdrehung des Querschnitts wird

$$5) \quad 0 = \int d\gamma = \int \frac{M_x}{EJ} \cdot ds.$$

Statt $N_x \cdot \cos \varphi$ kann angenähert der konstante Horizontalschub H , und $N_x \cdot \sin \varphi$ kann $= 0$ gesetzt werden, so daß man folgende drei Gleichungen erhält:

$$6) \quad \begin{cases} 0 = \int \frac{M_x}{EJ} ds \cdot y - \int \frac{H ds}{EF} + \alpha \tau l, \\ 0 = \int \frac{M_x}{EJ} ds \cdot x, \quad 0 = \int \frac{M_x}{EJ} ds. \end{cases}$$

Bei Annahme des Koordinatenursprungs 0 für

$$7) \quad \int \frac{x ds}{J} = 0, \quad \int \frac{y ds}{J} = 0 \quad \text{und} \quad \int \frac{xy ds}{J} = 0$$

und Einsetzung von $M_x = M_0 + M - H \cdot y - V \cdot x$ erhält man die bei der Berechnung der eingespannten Gewölbe und Rahmenkonstruktionen angewendeten Formeln:

$$8) \quad \begin{cases} H = \frac{\int \frac{M_0}{J} y ds + E \alpha \tau l}{\int \frac{y^2 ds}{J} + \int \frac{ds}{F}}, & V = \frac{\int \frac{M_0}{J} x ds}{\int \frac{x^2 ds}{J}}, \\ M = - \frac{\int \frac{M_0}{J} ds}{\int \frac{ds}{J}}. \end{cases}$$

Dieselben Formeln sind auch von Müller-Breslau (s. neuere Methoden der Festigkeitslehre 1904, S. 122) für den eingespannten Stabzug mit festen Ecken verwendet worden, wie dies aus der Anwendung auf Beispiele hervorgehen wird.

Nach Weyrauch (s. elastische Bogenträger 1911, S. 16) erhält man für zwei benachbarte Querschnitte mit dem Abstand ds im spannungslosen Zustande:

$$9) \quad ds = r (-d\varphi),$$

worin $r =$ Krümmungsradius und $-d\varphi$ die Abnahme von φ ist, somit $r = -\frac{ds}{d\varphi}$ und $d\varphi = -\frac{ds}{r}$.

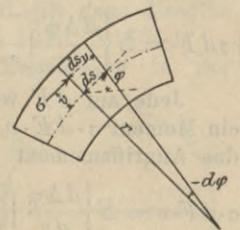


Abb. 3.

Im Abstand v von der Stabachse ist

$$10) \quad ds_v = ds + v (-d\varphi) = ds \left(1 + \frac{v}{r}\right),$$

wenn wie oben $\rho = \frac{180}{\pi}$ weggelassen wird.

Bei der Einwirkung von äußeren Kräften und Temperaturänderungen sollen sich s, φ und s_v um $\Delta s, \Delta \varphi$ und Δs_v ändern, wenn s der Abstand des Querschnitts von einem angenommenen Ausgangspunkt ist.

Die entsprechende Aenderung von $s + ds$ ergibt sich mit $\Delta s = f(s)$ aus dem Lehrsatz von Taylor:

$$f(s + ds) = f(s) + f'(s) \cdot \frac{ds}{1} + f''(s) \cdot \frac{ds^2}{2 \cdot 1} + \dots$$

$$= \Delta s + \frac{d\Delta s}{ds} \cdot ds + \frac{d^2\Delta s}{ds^2} \cdot \frac{ds^2}{2 \cdot 1} + \dots$$

und bei Vernachlässigung der unendlich kleinen Größe höherer Ordnung ist $f(s + ds) = \Delta s + d\Delta s$, und statt der anfänglichen Faserlänge ds erhält man zwischen den beiden angenommenen aber jetzt veränderten Querschnitten: $(s + ds + \Delta s + d\Delta s) - (s + \Delta s) = d(s + \Delta s)$ als schließliche Faserlänge.

Ebenso ergibt sich $d(s_v + \Delta s_v)$ und $d(\varphi + \Delta \varphi)$ aus ds_v und $d\varphi$ als schließliche Aenderung der Faser und des Richtungswinkels.

Da die Querschnitte nach der Biegung Ebenen bleiben sollen, so erhält man (wie oben)

$$d(s_v + \Delta s_v) = d(s + \Delta s) - (v + \Delta v) d(\varphi + \Delta \varphi)$$

und hiervon geht ab $ds_v = ds - v d\varphi$, so daß bei Vernachlässigung von $\Delta v \cdot d\Delta \varphi$ bleibt

$$10) \quad d\Delta s_v = d\Delta s - v \cdot d\Delta \varphi - \Delta v \cdot d\varphi.$$

Das letzte Glied entspricht der Querausdehnung Δv , und dieselbe ist bisher gewöhnlich nicht berücksichtigt worden, weil sie nur bei Temperaturänderungen in steilen Bögen von Einfluß ist, welche mit $\Delta v = \alpha \cdot \tau \cdot v$ berücksichtigt werden können. Bei Längenausdehnungen parallel

der Stabachse ergibt sich für Druck $d\Delta s_v = -\frac{\sigma}{E} ds_v$

und bei einer Temperaturänderung $d\Delta s_v = \alpha \tau ds_v$, somit zusammen $\frac{d\Delta s_v}{ds_v} = \alpha \tau - \frac{\sigma}{E}$, und bei Einsetzung der obigen Werte von $d\Delta s_v$ und ds_v :

$$\frac{\sigma}{E} = -\frac{d\Delta s - v d\Delta \varphi - \alpha \tau v d\varphi}{ds \left(1 + \frac{v}{r}\right)} + \alpha \tau \text{ oder}$$

$$11) \quad \sigma = E \left\{ -\frac{d\Delta s}{ds} + \frac{v d\Delta \varphi}{ds} + \alpha \tau \left(\frac{v d\varphi}{ds} + 1 + \frac{v}{r} \right) \right\} \frac{r}{r+v}, \text{ so daß}$$

für $\frac{v d\varphi}{ds} = -\frac{v}{r}$ (S. 10) die letzte Klammer = 1 wird.

Dies ist daher die Normalspannung σ beim Abstand v im Querschnitt x , und zwar für die Fläche 1 bei x und v . Für die Faser dF parallel zur Stabachse erhält man eine dF mal so große Kraft und für sämtliche Fasern die Normalkraft:

$$12) \quad N_x = \int \sigma dF = E \left\{ \frac{d\Delta \varphi}{ds} \int \frac{rv}{r+v} dF - \left(\frac{d\Delta s}{ds} - \alpha \tau \right) \int \frac{r}{r+v} dF \right\}.$$

Jede auf dF wirkende Kraft σdF veranlaßt ferner ein Moment $\sigma \cdot dF \cdot v$ in Beziehung auf die Stabachse, somit das Angriffsmoment

$$13) \quad M_x = \int \sigma \cdot dF \cdot v = E \left\{ \frac{d\Delta \varphi}{ds} \int \frac{rv^2}{r+v} dF - \left(\frac{d\Delta s}{ds} - \alpha \tau \right) \int \frac{rv}{r+v} dF \right\}.$$

Statt $\frac{rv}{r+v}$ kann $v - \frac{v^2}{r+v}$ und statt $\frac{r}{r+v}$ kann

$1 - \frac{v}{r} + \frac{v^2}{r(r+v)}$ gesetzt werden, so daß man bei

Annahme von

$$14) \quad K = \int \frac{rv^2}{r+v} dF \text{ und für } \int dF = F \text{ sowie } \int v dF = 0$$

(weil v entgegengesetzte Vorzeichen im symmetrischen Querschnitt hat) erhält:

$$15) \quad \frac{N_x}{E} = -\frac{d\Delta \varphi}{ds} \cdot \frac{K}{r} - \left(\frac{d\Delta s}{ds} - \alpha \tau \right) \left(\frac{K}{r^2} + F \right) \text{ und}$$

$$16) \quad \frac{M_x}{E} = \frac{d\Delta \varphi}{ds} \cdot K + \left(\frac{d\Delta s}{ds} - \alpha \tau \right) \frac{K}{r}.$$

Bei Bogenträgern kann das Krümmungsmoment

$$K = r \int \frac{v^2}{r+v} dF = \text{dem Trägheitsmoment } J = \int v^2 dF$$

gesetzt werden, so daß man hieraus als vereinfachte Werte erhält:

$$17) \quad Y = \frac{d\Delta s}{ds} = \alpha \tau - \left(N_x + \frac{M_x}{r} \right) \frac{1}{EF},$$

$$18) \quad Z = \frac{d\Delta \varphi}{ds} = \frac{M_x}{EJ} + \left(N_x + \frac{M_x}{r} \right) \frac{1}{E \cdot F \cdot r}$$

und ebenso ergibt sich bei Einsetzung von 17) und 18) in 11):

$$19) \quad \sigma = \frac{N_x}{F} + \frac{M_x}{F \cdot r} + \frac{M_x \cdot v}{J} \text{ (s. S. 22).}$$

Das Glied mit $\frac{M_x}{r}$ wird gewöhnlich vernachlässigt, so

daß nur mit der Normalkraft N_x und dem Moment M_x (wie beim geraden Balken mit exzentrischer Beanspruchung) gerechnet wird und auch die Werte von Y und Z hierdurch einfacher werden (s. S. 356).

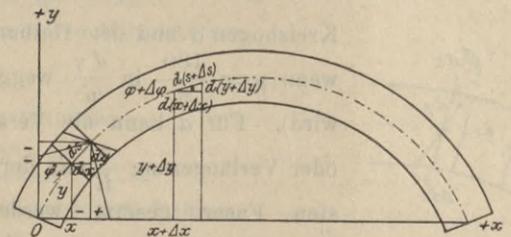


Abb. 4.

Für das in Abb. 4 angenommene Koordinatensystem soll nun $d\Delta x$ und $d\Delta y$ bestimmt werden und man erhält für kleine Formänderungen (s. S. 26)

$$d(x + \Delta x) = d(s + \Delta s) \cdot \cos(\varphi + \Delta \varphi)$$

$$d(y + \Delta y) = d(s + \Delta s) \cdot \sin(\varphi + \Delta \varphi),$$

worin für $\cos(\varphi + \Delta \varphi)$ und $\sin(\varphi + \Delta \varphi)$ gesetzt werden kann: $\cos \varphi \cdot \cos \Delta \varphi - \sin \varphi \cdot \sin \Delta \varphi$ und $\sin \varphi \cdot \cos \Delta \varphi + \cos \varphi \cdot \sin \Delta \varphi$ und bei kleinen Werten von $\Delta \varphi$ wird

$\cos \Delta \varphi = 1$ und $\sin \Delta \varphi = \Delta \varphi$, somit bei Abzug von $dx = ds \cdot \cos \varphi$ und $dy = ds \cdot \sin \varphi$ und Einsetzung von

$$\cos \varphi = \frac{dx}{ds} \text{ und } \sin \varphi = \frac{dy}{ds}:$$

$$20) \quad d\Delta x = -ds \cdot \sin \varphi \cdot \Delta \varphi + d\Delta s (\cos \varphi - \sin \varphi \cdot \Delta \varphi) = -\Delta \varphi \cdot dy + \frac{d\Delta s}{ds} \cdot dx \left(-\frac{d\Delta s}{ds} \cdot dy \cdot \Delta \varphi \right),$$

$$21) \quad d\Delta y = ds \cdot \cos \varphi \cdot \Delta \varphi + d\Delta s (\sin \varphi + \cos \varphi \cdot \Delta \varphi) = \Delta \varphi \cdot dx + \frac{d\Delta s}{ds} \cdot dy \left(+\frac{d\Delta s}{ds} \cdot dx \cdot \Delta \varphi \right),$$

worin die eingeklammerten letzten Glieder wegen der Kleinheit von $\Delta \varphi$ wegfallen können. Durch Einsetzung

des obigen Wertes für $\frac{d\Delta s}{ds}$ und von $\Delta \varphi \cdot dy = d(y \Delta \varphi) - y d\Delta \varphi$ und von $\Delta \varphi dx = d(x \Delta \varphi) - x d\Delta \varphi$ (aus den

Differenzialen der Produkte $d(y\Delta\varphi)$ und $d(x\Delta\varphi)$ sowie von $d\Delta\varphi = Z \cdot ds$ ergibt sich (s. S. 305):

$$22) \quad \begin{aligned} d\Delta x &= -d(y\Delta\varphi) + y \cdot Z \cdot ds + Y \cdot dx, \\ d\Delta y &= d(x\Delta\varphi) - x \cdot Z \cdot ds + Y \cdot dy \\ &\text{und } d\Delta\varphi = Z \cdot ds. \end{aligned}$$

Durch Einsetzung der Werte von Y und Z und Summierung derselben von 0 bis x erhält man:

$$23) \quad \Delta x = -y\Delta\varphi + \int_0^x \frac{M_x}{EJ} y ds - \int_0^x \left(N_x + \frac{M_x}{r}\right) \left(dx - \frac{y ds}{r}\right) \frac{1}{EF} + \alpha\tau x,$$

$$24) \quad \Delta y = x\Delta\varphi - \int_0^x \frac{M_x}{EJ} x ds - \int_0^x \left(N_x + \frac{M_x}{r}\right) \left(dy + \frac{x ds}{r}\right) \frac{1}{EF} + \alpha\tau y,$$

$$25) \quad \Delta\varphi = \Delta\varphi_0 + \int_0^x \frac{M_x}{EJ} ds + \int_0^x \left(N_x + \frac{M_x}{r}\right) \frac{ds}{EFr}$$

(bei der Ausrechnung kann $\frac{ds}{dr} = -d\varphi$ gesetzt werden).

Die Werte von M_x und N_x ergeben sich aus:

$$26) \quad \begin{aligned} M_x &= M + V \cdot x - H \cdot y - M_0 \text{ und } N_x = \\ &= V_x \cdot \sin\varphi + H_x \cdot \cos\varphi, \text{ worin } M_0 = \sum_0^x P(x - \alpha), \\ V_x &= V - \sum_0^x P \text{ und } H_x = H \text{ für vertikale Belastung ist.} \end{aligned}$$

Diese Formeln werden alsdann auf verschiedene Bogenträger ohne, mit 2 und mit 3 Gelenken angewendet und zwar für Kreis-, Parabel- und beliebige symmetrische Bögen (auch mit veränderlichem Querschnitt).

Wird in denselben der Einfluß der Krümmung vernachlässigt, und $r = \infty$ eingesetzt, so erhält man dieselben Formeln wie nach Mörsch (s. 3–5 S. 5), und kann dies auch im allgemeinen geschehen (die ersten Glieder in Δx , Δy und $\Delta\varphi$ fallen beim eingespannten Gewölbe fort).

Auch die Vorzeichen sind dieselben, indem nur $-\int N_x \cdot dy$ statt $+\int N_x \cdot ds \cdot \sin\varphi$ und $+V \cdot x$ statt $-V \cdot x$ einzusetzen sind, und zwar wegen der entgegengesetzten Richtung der $+x$ -Achse (die positiven und negativen Verschiebungen sind in Abb. 2 und 4 mit $+$ und $-$ bezeichnet).

Dieselben Ergebnisse können auch aus dem Prinzip der virtuellen Verschiebung abgeleitet werden, nach welchem

$$27) \quad \sum P \cdot \delta - \sum S \cdot \Delta s = 0$$

ist, d. h. die Summe der virtuellen Arbeiten sämtlicher in den Knotenpunkten eines Fachwerks angreifenden äußeren Kräfte P und inneren Spannungen S ist im Fall einer verschwindend kleinen Formänderung desselben $= 0$. Hierbei ist δ_m die Projektion der wirklichen Verschiebung des Knotenpunktes m auf die Richtung der Kraft P_m , und dasselbe ist positiv oder negativ einzusetzen, je nachdem die Verschiebung gleich oder entgegengesetzt der Krafrichtung ist, und dieselbe kann auch von Ursachen herrühren, die von der Kraft unabhängig sind.

Das Gleichgewicht sämtlicher Spannungen S und Auflagerkräfte C läßt sich nun nach Müller-Breslau (Statik der Baukonstruktionen 1903, II, 1, Einleitung S. 25) für eine Belastung durch die Kräfte P in folgenden Gleichungen ersten Grades ausdrücken:

$$28) \quad S = S_0 - S' \cdot X' - S'' \cdot X'' - S''' \cdot X''' - \dots$$

$$29) \quad C = C_0 - C' \cdot X' - C'' \cdot X'' - C''' \cdot X''' - \dots$$

wobei X' , X'' , $X''' \dots$ die statisch nicht bestimmbar sind und S_0 sowie C_0 den Spannungen und Auflagerkräften des statisch bestimmten Fachwerkes entsprechen. S' und C' sind dieselben für die Spannung $X' = -1$, wenn sämtliche äußere Lasten P und alle

anderen X (ausgenommen X') verschwinden, und ebenso verhält es sich mit S'' , C'' und X'' usw. (statt $X' = -1$ wird auch $+1$ gesetzt, wenn dasselbe der Spannungsrichtung entspricht, und alsdann ist auch in den Formeln 28) und 29) $+$ statt $-$ zu setzen, auch kommen X_a , $X_b \dots$, S_a , $S_b \dots$ statt X' , $X'' \dots$, S' , $S'' \dots$ vor).

Nach dem Prinzip der virtuellen Verschiebung ist alsdann (aber nur für $X' = -1$, sonst muß es $-\sum S \Delta s$ heißen):

$$30) \quad L = \sum P \cdot \delta + \sum C \Delta c = \sum S \Delta s,$$

ferner wird

$$31) \quad L' = \sum S' \Delta s, \quad L'' = \sum S'' \Delta s \text{ usw.,}$$

worin

$$32) \quad \Delta s = \frac{S \cdot s}{EF} + \alpha\tau s$$

ist (ersteres bedeutet die Verlängerung oder Verkürzung der Stablänge s durch die Spannung $\frac{S}{F}$ und letzteres diejenige durch die Temperatur). Wird für S in 32) der Ausdruck in 28) eingesetzt, und $\frac{s}{EF}$ mit ρ bezeichnet, so ergibt sich für 31):

$$33) \quad \begin{aligned} \sum S' \Delta s - \sum S' \alpha\tau s &= \\ &= \sum S' S_0 \rho - X' \sum S'^2 \rho - X'' \sum S' S'' \rho - \dots \end{aligned}$$

$$34) \quad \begin{aligned} \Delta \sum S'' \Delta s - \sum S'' \alpha\tau s &= \\ &= \sum S'' \cdot S_0 \cdot \rho - X' \sum S'' S' \rho - X'' \sum S''^2 \rho - \dots \end{aligned}$$

woraus die unbekannt GröÙen X' , $X'' \dots$ berechnet werden können.

Man erhält z. B. bei dem Bogenfachwerk mit zwei Gelenken für den Horizontalschub $X' = 0$ die Kräfte S_0 und C_0 des statisch bestimmten Fachwerkes, und aus der nach außen gerichteten Kraft $X' = -1$ die Stabkräfte S' und hieraus

$$\begin{aligned} S &= S_0 - S' X', \quad 1 \cdot \Delta l = \sum S' \Delta s = \\ &= \sum \frac{S' S_0 s}{EF} - X' \sum \frac{S'^2 s}{EF} + \sum S' \alpha\tau s \text{ oder} \\ 35) \quad X' &= \frac{\sum S' S_0 s + \alpha\tau E \sum S' s - EF \Delta l}{\sum S'^2 s}, \end{aligned}$$

worin der erste Ausdruck für die Belastung allein, der zweite für die Temperatur, und der dritte für das Nachgeben der Widerlager um Δl gilt (beim Zweigelenkbogen ist $\Delta l = 0$ zu setzen).

$\sum S' S_0 s$ und $\sum S'^2 s$ sind in einer Tabelle auszurechnen, wobei Zugspannungen mit $+$ und Druckspannungen mit $-$ einzuführen sind, und können sie für die Hälfte des Trägers bestimmt und mit 2 multipliziert werden. In dem Ausdruck für die Temperaturspannung ist die Verschiebung Δs der einzelnen Stäbe proportional der Verschiebung Δl von l , so daß $m \cdot l = m \sum S' s$ oder $\sum S' s = l$ wird.

Für den überzähligen Stab eines Fachwerkes erhält man ebenso (die eingeklammerten Vorzeichen gelten für $X = +1$):

$$36) \quad \sum S \Delta s = \frac{1 \cdot X' \cdot s_x}{EF} = \sum \frac{S' S_0 s}{EF} - X' \sum \frac{S'^2 s}{EF}$$

oder $X' = \sum \frac{S' S_0 s}{F} : \left(\sum \frac{S'^2 s}{F} + \frac{s_x}{F} \right)$

und für den Bogen mit einem Zugband gilt ganz dieselbe Formel (s. Ber. der Eisenbetonkonstr. 1910, S. 73).

Beim Vorhandensein von zwei Zugstangen in der Mitte und am Fuß des Bogens

kann für ein bewegliches Auflager das Bogenfachwerk durch die Entfernung der ersteren statisch bestimmt gemacht werden, worauf die Stabkräfte S_0 für die Lasten P zu bestimmen sind sowie die Stabkräfte S' und S'' für die Kräfte $X' = -1$ und $X'' = -1$, und man erhält alsdann für das zweifach statisch unbestimmte System

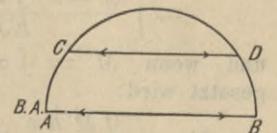


Abb. 5.

Man erhält alsdann für das zweifach statisch unbestimmte System

$$37) \quad \Sigma S' \Delta s = \frac{X' l'}{EF'} = \Sigma S_0 S' \rho \overset{(+)}{=} X' \Sigma S' S'^2 \rho \overset{(+)}{=} X'' \Sigma S' S'' \rho,$$

$$38) \quad \Sigma S'' \Delta s = \frac{X'' l''}{EF''} = \Sigma S_0 S'' \rho \overset{(+)}{=} X' \Sigma S' S'' \rho \overset{(+)}{=} X'' \Sigma S''^2 \rho,$$

somit dieselben Formeln, wie sie in dem technischen Lexikon von Lueger (s. Dachstuhl) angegeben sind, wenn X' und $X'' = +1$ eingesetzt werden (hierfür gelten die eingeklammerten Vorzeichen). Bei zwei Gelenken wird das sich auf die Ausdehnung der unteren Zugstange beziehende Glied $\frac{X'' l''}{EF''} = 0$, dagegen ist der Horizontal-schub wie oben zu berechnen.

Handelt es sich um vollwandige Träger, so sind die Formänderungen derselben für den Belastungszustand $X' = -1$ und $X'' = -1$ zu bestimmen, und man erhält nach Müller-Breslau (neuere Methoden der Festigkeitslehre 1904, S. 78—81) als virtuelle Formänderungsarbeit

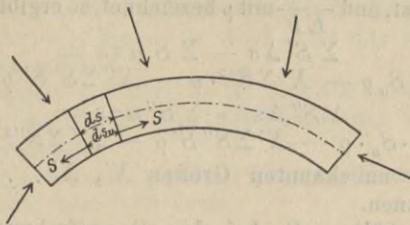


Abb. 6.

eine Änderung von ds_v um Δds_v (infolge einer geringen Biegung), somit als Summe $\int S \Delta ds_v$ und mit $S = \sigma \cdot dF$ sowie $dV = ds_v \cdot dF$ wird

$$39) \quad L = \Sigma S \Delta s = \Sigma P \delta + \Sigma C \Delta c = \int \sigma \frac{\Delta ds_v}{ds_v} dV.$$

Wenn für $X' = -1$, $X'' = -1$ usw. die Spannungen σ' , σ'' usw. entstehen, so erhält man für die zugehörigen Auflagerkräfte allein

$$40) \quad \Sigma C' \Delta c = \int \sigma' \frac{\Delta ds_v}{ds_v} \cdot dV, \\ \Sigma C'' \Delta c = \int \sigma'' \frac{\Delta ds_v}{ds_v} \cdot dV \text{ usw.}$$

Es ist nun

$$41) \quad \frac{\Delta ds_v}{ds_v} = \frac{\sigma}{E} + \alpha \tau, \text{ somit}$$

$$42) \quad L' = \int \frac{\sigma' \cdot \sigma}{E} \cdot dV + \int \alpha \tau \sigma' \cdot dV, \\ L'' = \int \frac{\sigma'' \cdot \sigma}{E} \cdot dV + \int \alpha \tau \sigma'' \cdot dV \text{ usw.}$$

Für statisch unbestimmte gerade Stäbe mit Biegung ist (s. S. 91—94):

$$43) \quad \sigma = \frac{M \cdot v}{J} + \frac{N}{F}, \quad \sigma' = \frac{M' \cdot v}{J} + \frac{N'}{F} \text{ (für } X' = 1)$$

usw. sowie $dV = dx \cdot dF$, und man erhält durch Einsetzung dieser Werte in Gleichung 42):

$$44) \quad L' = \int \frac{\sigma' \sigma dV}{E} = \int \left(\frac{\sigma' \cdot M \cdot v}{J} + \frac{\sigma' \cdot N}{F} \right) \frac{dx \cdot dF}{E} = \\ = \int \frac{M \cdot dx \cdot \int \sigma' \cdot v \cdot dF}{EJ} + \int \frac{N \cdot dx \cdot \int \sigma' \cdot dF}{EF}$$

und wenn $M' = \int \sigma' \cdot v \cdot dF$ und $N' = \int \sigma' \cdot dF$ gesetzt wird:

$$45) \quad L' = \int \frac{MM' dx}{EJ} + \int \frac{NN' dx}{EF} \text{ und für die Temperatur}$$

$$46) \quad \int \alpha \tau \sigma' dV = \int \alpha \tau dx \int \sigma' dF = \int \alpha \tau N' dx.$$

Beim statisch unbestimmtem Bogen tritt nach II 2, S. 509—510 (s. auch neuere M. d. F., S. 211, 213) an

die Stelle von N , J und dx : 47) \mathfrak{R} , Z und ds , wo $\mathfrak{R} = N - \frac{M}{r}$ für $r = \infty$ auch $= N$ wird, und dem Ausdruck $N_x + \frac{M_x}{r}$ in 17 und 18) entspricht, und

$$Z = \int v^2 \frac{r}{r-v} dF = K$$

ist und auch angenähert $= J$ gesetzt werden kann (das — entspricht der entgegengesetzten Richtung von v), während ds das schiefe Stabelement bedeutet.

Bei den Formeln für einfach gekrümmte Stäbe, welche sich aus 45) und 46) ergeben, tritt daher ds an die Stelle von dx , und man erhält hieraus die bei der Rahmenberechnung verwendeten Formeln, welche auch denjenigen für das eingespannte Gewölbe entsprechen (s. n. M. S. 215—218).

Dieselben Formeln werden auch für den Stabzug mit festen Ecken in Verbindung mit Verschiebungsplänen (nach II 1, S. 25 und II 2, S. 490) angewendet, wie dies auch bei der Tunnelberechnung (s. S. 10) geschehen ist, bei welcher die graphische Berechnung genau mit der Berechnung durch Formeln nach Mörsch übereingestimmt hat.

Die obigen Integrale sind auf sämtliche Stäbe des Fachwerks bzw. den ganzen Bogen auszudehnen (II 2, S. 97—99) und mit L' in 31) zu verbinden, wobei auch ein auf Biegefestigkeit oder auf Zug beanspruchter Stab in Verbindung mit denselben (vgl. 36) berechnet werden kann.

Die Formel

$$48) \quad L' = \int \frac{MM' dx}{EJ} + \int \frac{NN' dx}{EF} + \int \alpha \tau N' dx$$

kann aber auch mit $M' = \frac{\partial M}{\partial X'}$, $M'' = \frac{\partial M}{\partial X''}$ usw.

sowie $N' = \frac{\partial N}{\partial X'}$, $N'' = \frac{\partial N}{\partial X''}$ und ebenso die Formel

$$44) \text{ mit } \sigma' = \frac{\partial \sigma}{\partial X'}, \quad \sigma'' = \frac{\partial \sigma}{\partial X''} \text{ usw. angewendet werden}$$

(s. n. M. d. F., S. 119—131), indem nach Castigliano die statisch nicht bestimmbar Größen X die Formänderungsarbeit A zu einem Minimum machen, so daß $\frac{\partial A}{\partial X}$ für die Größe $X' = 0$ wird (wenn das Zeichen ∂ der Ableitung von A nach X' entspricht).

Hierin bedeutet A die von den äußeren Kräften verrichtete mechanische Arbeit des anfangs spannungslosen Fachwerks, wobei die äußeren und inneren Kräfte von 0 bis P und bis S anwachsen, so daß (nach II 1, S. 12) die Gleichung $A = \Sigma P_x \cdot \delta = \Sigma S_x \cdot \Delta s$ übergeht in

$$\Sigma \int_0^P P_x \cdot d\delta = \Sigma \int_0^S S_x \cdot d\Delta s = \Sigma \int_0^S S \cdot d \frac{S \cdot s}{EF} = \\ = \Sigma \frac{S^2 \cdot s}{2 EF'} = \frac{1}{2} \Sigma S \Delta s = \frac{1}{2} \Sigma P_m \cdot \delta_m$$

(s. a. n. M. d. F., S. 73—74), und weil das $\frac{1}{2}$ sich links und rechts aufhebt, so ändern sich auch obige Formeln nicht.

Die Arbeitsgleichung 49) $A = \int \frac{S^2 s}{2 EF}$ kann bei Ein-

setzung von $\sigma = \frac{S}{F}$ und $s \cdot F = dV$ in 50) $\int \frac{\sigma^2 dV}{2 E}$

umgewandelt werden, und dieselbe gilt auch für den unendlich kleinen Raumteil $dV = dx \cdot dF$ (s. II 1, S. 42 und II 2, S. 7), so daß man mit $M = \int \sigma v dF$ und

$N = \int \sigma dF$ sowie $\sigma = \frac{M \cdot v}{J} + \frac{N}{F}$ erhält:

$$51) A = \int \frac{dx}{2E} \int \sigma^2 dF = \int \frac{dx}{2E} \left\{ \frac{M}{J} \int \sigma \cdot v \cdot dF + \frac{N}{F} \int \sigma \cdot dF \right\} = \int \frac{M^2 dx}{2EJ} + \int \frac{N^2 dx}{2EF}$$

Bei Weglassung von zwei im Nenner, und Ersetzung von dx durch ds werden diese Formeln auch bei der Berechnung von vollwandigen Zweigelenkbögen verwendet (II 2, S. 514, 523, 538).

Die Anwendung der oben entwickelten Formeln ist aus den Beispielen in Bd. II 1 u. 2 und d. n. M. der Festigkeitslehre ersichtlich, und es ist hierbei darauf zu achten, wieviel statisch unbestimmte Größen anzunehmen sind. Ein Fachwerk ist statisch bestimmt, wenn jeder Knotenpunkt durch zwei Stäbe festgelegt werden kann, und wenn die Bedingung erfüllt ist, daß für n Knotenpunkte $2n - 3$ Stäbe vorhanden sind. Außerdem kann das Fachwerk, wie auch der Bogen, durch horizontale und vertikale Auflagerkräfte statisch unbestimmt werden.

Die Verschiebung der Knotenpunkte oder eines bestimmten Bogenpunkts in der Richtung der angenommenen

Kraft 1 ergibt sich sowohl für die Kräfte P als C aus 30), wenn $\Delta s = \frac{S \cdot s}{EF}$ eingesetzt wird, so daß man erhält $1 \cdot \delta = \Sigma S' \Delta s$ oder $\delta = \frac{1}{E} \Sigma \frac{S' \cdot S_0 \cdot s}{EF}$, wenn S_0 den Spannungen des statisch bestimmt gemachten Trägers und S' denjenigen für die Kraft 1 entspricht (vgl. auch die Formeln von Weyrauch in dem techn. Lexikon von Lueger bei Biegung und Einsenkung).

Der Zweigelenkrahmen mit zwei Mittelstützen (s. S. 14) ist als dreifach statisch unbestimmtes System mit den drei unbekanntem Größen X' , X'' und X''' berechnet worden, und zwar für den Horizontalschub X' und die zwei vertikalen Gegendrücke X'' und X''' an den Mittelstützen (die Normalkräfte N können hierbei auch vernachlässigt werden). Es hat sich alsdann ergeben, daß die genaue Rahmenberechnung mit Berücksichtigung einer diskontinuierlichen Belastung des Rahmens angenähert dasselbe Resultat ergibt, und die Berechnung dadurch bedeutend vereinfacht wird, und daher allgemein zu empfehlen ist.



Gewölbe- und Rahmenberechnung nach der Elastizitätslehre.

In Heft 3 von 1909 der H. Z. sind Ergänzungen zu der Berechnung der Eisenbetonkonstruktionen in Heft 4 von 1906 erschienen, und in einem Sonderabdruck des Verlags von C. W. Kreidel in Wiesbaden wurden beide Arbeiten zu einer „vollständigen theoretischen und praktischen Berechnung der Eisenbetonkonstruktionen mit genauer Gewölbe- und Rahmenberechnung“ 1910 erweitert, in welcher alle frühern Formeln enthalten und auf Beispiele der Praxis angewendet worden sind.

Bei der Anwendung der theoretischen Gewölbe- und Rahmenberechnung auf praktische Beispiele zeigt sich ihre allgemeine Verwendbarkeit, wie sie auf Grund der Elastizitätstheorie der Professoren Dr. Weyrauch, Mörsch und Dr. Müller-Breslau von mir näher ausgeführt worden ist.

Dies geht auch aus der Berechnung des nebengezeichneten Tunnelprofils hervor, welche für den bei B eingespannten und bei A durchschnittenen Rahmen wie beim eingespannten Gewölbe geschehen kann (s. S. 43 des Sonderdrucks von 1910).

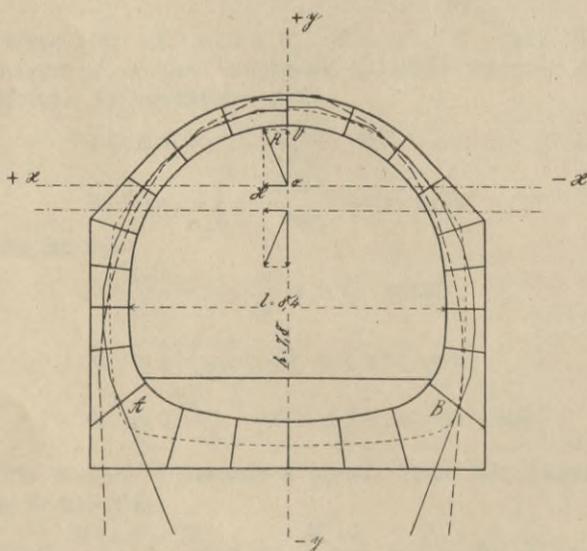


Abb. 7.

Dieselbe Berechnungsweise kann aber auch auf den geschlossenen ringförmigen Rahmen angewendet werden, wenn das eingespannte und durchschnitene Ende in B vereinigt gedacht wird, und der Rahmen durch Einteilung in Lamellen von B aus ringsherum bis B berechnet wird, und zwar genau in derselben Weise wie das eingespannte Gewölbe (s. Berechnung der eingespannten Gewölbe von Mörsch in der Schweizer Bauzeitung, Band XLVII, Nr. 7 und 8, und Sonderdruck derselben).

Für die Berechnung der Einspannung bei A und B ergaben sich die links gezeichneten Stützzlinien und für die ringförmige Berechnung von B aus die rechtsseitigen Stützzlinien. Die letztern wurden auch durch eine graphische Berechnung mit Verschiebungsplänen nach Professor Dr.

Müller-Breslau geprüft, und zwar vermittels Aufzeichnung der Durchbiegungseilpolygone für die elastischen Gewichte

$$w = \frac{s}{J}$$

zur Bestimmung der Einflußlinien für die Einzel-lasten, und es wurden hierbei dieselben Stützzlinien erhalten, welche sich auch denjenigen für die eingespannte Berechnung nähern. Als Belastung wurde das Erdgewicht $\gamma = 1,8$ mit $6,5^m$ Ueberschüttungshöhe im Scheitel sowie der seitliche Erddruck für den Böschungswinkel von 15° (bei vollständiger Durchnässung der Erde) und von $33^\circ 40'$ mit der Böschungsneigung $1:1\frac{1}{2}$ (in trockenem Zustand derselben) angenommen, und für den erstern Fall gilt die ausgezogene und für den letztern Fall die gestrichelte Stützzlinie.

Statt der schiefen (senkrecht zur innern Leibung stehenden) Fugen würden bei der Berechnung vertikale bzw. horizontale Fugen durch ihren Schnitt mit der Mittellinie gelegt und der horizontale Erddruck in der Mitte der gerade gedachten Lamellenoberkanten angenommen, und zwar nach der Formel $E = \frac{\gamma}{2} \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)$

oder bei Einsetzung von $\gamma = 1,8$ und $\varphi = 15^\circ$ bzw. $33^\circ 40'$ für die Höhe h bis zur Erdoberfläche $E = 0,530 h^2$ bzw. $= 0,258 h^2$ (für die einzelnen Lamellen ist der Unterschied für das E der beiden äußern Endpunkte zu wählen).

Bei der obigen ringförmigen Berechnung (wie beim eingespannten Gewölbe) hat es sich nun ergeben, daß die Vorzeichen der Richtungen und Kräfte genau eingehalten werden müssen, um zu einem richtigen Resultat zu gelangen.

Dies bezieht sich zunächst auf die Summenausdrücke

$\sum w \cdot y \cdot (a - x)$, $\sum w \cdot x \cdot (a - x)$ und $\sum w \cdot (a - x)$, welche so zu berechnen sind, daß x , y und a die Vorzeichen des angenommenen Koordinatensystems (aus dem Abstand $z = \frac{\sum w \cdot y'}{\sum w}$ des Koordinatenursprungs 0 vom

Scheitel der Mittellinie) erhalten (s. Abb. 7), und daher x und y mit ihrem Vorzeichen $+$ oder $-$ einzusetzen sind und $(a - x)$ den positiven oder negativen Abständen der Lamellenmitten von der Kraft 1 (bzw. P) entspricht, und hierbei auch die positive Richtung von rechts nach links und die negative Richtung von links nach rechts (und zwar in Beziehung auf die in den Fugenmitten I, II usw. angenommenen Kräfte) anzunehmen ist (s. Abb. 88).

Die Einflußordinaten für die Belastung durch die vertikalen Kräfte ergeben sich dann aus den Formeln:

$$H = - \frac{1 \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} w \cdot y \cdot (a - x)}{\sum w \cdot y^2 + \sum \frac{s}{F}}, \quad V = - \frac{1 \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} w \cdot x \cdot (a - x)}{\sum w \cdot x^2},$$

$$M = + \frac{1 \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} w \cdot (a - x)}{\sum w}$$

(s. auch Betonkalender oder technisches Lexikon von Lueger: Berechnung der Gewölbe) und für die horizontalen Kräfte aus den Formeln:

$$H = - \frac{1 (\Sigma w y^2 - b \Sigma w y)}{\Sigma w y^2 + \Sigma \frac{s}{F}},$$

$$V = - \frac{1 (\Sigma w x y - b \Sigma w x)}{\Sigma w x^2},$$

$$M = + \frac{1 (\Sigma w y - b \Sigma w)}{\Sigma w}$$

(s. S. 87 und 88 des Sonderdrucks von 1910), worin b die mit dem Vorzeichen einzusetzende Ordinate des Angriffspunktes der horizontalen Kraft 1 ist.

Zur Bestimmung der Einflußlinien für die vertikalen und horizontalen Kräfte kommen dieselben Werte von $w = \frac{s}{J} = \frac{\text{Länge der Lamelle}}{\text{Trägheitsmoment}}$ sowie von x und y zur Verwendung, so daß die Berechnung der Formeln für die horizontalen Kräfte sich wesentlich vereinfacht, und die Größe von H , V und M durch Interpolation (im obigen Fall als Mittel) aus den berechneten Einflußordinaten zu bestimmen ist. Die Kraftrichtungen H und V werden hierbei für das positive H von links nach rechts und für das positive V von unten nach oben angenommen (s. S. 87 und 90 des Sonderdrucks). Wenn außerdem die Richtungen von x und y für die Hebelarme der Kräfte H und V in Beziehung auf die Momentpunkte unterschieden werden, so ergibt sich für das positive M eine Drehung im Sinne des Uhrzeigers und für das negative M die entgegengesetzte Drehung (für die Ausrechnung der Summenausdrücke kann die vertikale Belastung P auch positiv und ihre Auflagerdrücke negativ eingesetzt werden, wie dies bei der Berechnung der eingespannten Gewölbe gewöhnlich geschieht, nur müssen alsdann auch die Vorzeichen der Abstände $a - x$ gewechselt werden, damit dasselbe Resultat für H , V und M erhalten wird).

Unter dieser Voraussetzung ergeben sich für jede beliebige Form des Rahmens die in Abb. 7 eingezeichneten Kraftrichtungen H und V (welche bei positivem Vorzeichen von links nach rechts und von unten nach oben und bei negativem Vorzeichen umgekehrt aufzutragen sind) sowie das entsprechende Vorzeichen von M (welches auch für jedes berechnete H und V aus dem Drehungssinn des Kräftepaars der Gegenresultante R mit dem gleichen und entgegengesetzt gerichteten Kämpferdruck R hervorgeht, so daß hierdurch eine sichere Kontrolle vorhanden ist).

Die genaue Lage der Kämpferdrücke ergibt sich aus den Formeln

$$x_r = \frac{M}{V}, \quad y_r = \frac{M}{H}, \quad r = \frac{M}{R} \quad \text{und} \quad R = \sqrt{H^2 + V^2}$$

(s. S. 43 des Sonderdrucks von 1910).

Die obern Kräfte H und V (in Abb. 7) beziehen sich auf das Koordinatensystem für das Eingespanntsein des Rahmens bei A und B , und man erhält hierfür im Scheitel eine Maximalzugspannung von 10 kg für die vertikale Erdbelastung und den halben horizontalen Erddruck (die Maximaldruckspannung wird $= 20 \text{ kg}$).

Die untern Kräfte H und V entsprechen dagegen dem Koordinatensystem für die ringförmige Berechnung, wobei B zugleich das bewegliche Ende des Rahmens bildet, und daher R nach unten gerichtet ist, und es ergibt sich hier eine Maximalzugspannung von 16 kg für die vertikale Erdbelastung und halben horizontalen Erddruck (die Maximaldruckspannung wird $= 25 \text{ kg}$).

Diese Zugspannungen können in dem ohne Eisenlagen auszuführenden Tunnel mit Rücksicht auf den passiven Widerstand der seitlichen Erde zugelassen werden, wenn die Zwischenräume der Steinhinterfüllung mit Zementmörtel ausgefüllt werden.

Bei der obigen Berechnung wurde der Gegendruck des Bodens in der Mitte der vertikal begrenzten seitlichen Lamellen angenommen, weil die vertikale Belastung durch die Seitenwände nach unten wirkt und daher hauptsächlich auf den Seiten der Bodenfuge übertragen wird (eine kleine Aenderung in der Lage des Auflagerdrucks hat auf die Stützlinie im Scheitel keinen wesentlichen Einfluß). Der mittlere Teil des Fundaments ist auch mehr nachgiebig und wird in seiner Lage durch die vertikale Belastung der Bahnbettung und des Bahnverkehrs bestimmt, welche (wie das Eigengewicht der untern Lamellen) infolge des Gegendrucks im mittlern Teil der Bodenfuge aufgehoben wird, so daß sie bei der Berechnung nicht berücksichtigt zu werden braucht.

Die auf S. 72 des Sonderdrucks von 1910 enthaltene Formel für den Rahmen mit zwei Gelenken heißt vollständig:

$$H = \left\{ V \cdot G \cdot \frac{z_u \cdot l}{2} - P \cdot \frac{l}{2} \sum_a (a - x) \cdot w \cdot y \right\} : \Sigma w y^2 \left(+ \Sigma \frac{s}{F} \right),$$

und kann der Einfluß von $\Sigma \frac{s}{F}$ durch die Normalkräfte gewöhnlich vernachlässigt werden (s. auch techn. Lexikon von Lueger, Dachstuhl).

Dieselbe kann für beliebig gerichtete Kräfte P mit den Abständen p von den Lamellenmitten oder für vertikale Lasten P mit den Abständen $(a - x)$ verwendet werden.

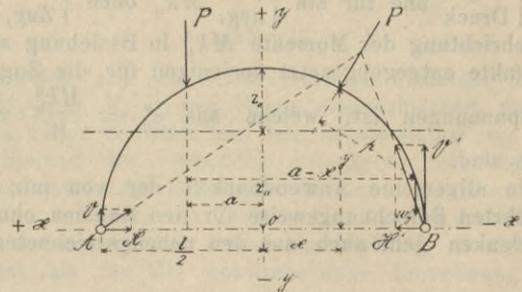


Abb. 8.

Das Koordinatensystem unterscheidet sich hierbei von demjenigen beim eingespannten Rahmen dadurch, daß die horizontale x -Achse desselben durch die zwei Gelenke geht, während die vertikale y -Achse der Symmetrieachse entspricht (bei schiefer Symmetrie bleibt die y -Achse vertikal, und die x -Achse wird auch schief).

Im übrigen ist die Berechnung der Summenausdrücke für H genau dieselbe, und V entspricht dem Auflagerdruck für sämtliche Lasten P , $G = \Sigma w$ ist die Summe der elastischen Gewichte $w = \frac{s}{J}$ (hierbei ist der Elastizitätsmodul E im Nenner weggelassen, weil er für dasselbe Material als konstant angenommen werden kann), z_u ist $= \frac{\Sigma w \cdot y}{\Sigma w}$ dem Schwerpunktsabstand der elastischen Gewichte w von der x -Achse.

Der Ausdruck $V \cdot G \cdot \frac{z_u \cdot l}{2}$ entspricht daher dem Summenausdruck $P \cdot \frac{l}{2} \sum_a (a - x) \cdot w \cdot y$ für den Auflagerdruck V in Beziehung auf das linke Kämpfergelenk A , indem V für P steht, und $z_u \cdot \Sigma w \cdot \frac{l}{2} = \sum_a (a - x) \cdot w \cdot y$ ist (weil bei zwei zur y -Achse symmetrischen Punkten mit

gleichem $w_y = w \cdot y$ ihre Resultante bei $\frac{l}{2}$ liegt, und für den Schwerpunktsabstand z_u von $\Sigma w: z_u \cdot \Sigma w = \Sigma w \cdot y$ wird).

Der Zweigelenrahmen kann daher auch durch Lamelleneinteilung (wie das eingespannte Gewölbe) berechnet werden, wenn in den Summenausdrücken nicht nur die Kräfte P , sondern auch der Auflagerdruck V berücksichtigt wird, und zwar ist derselbe mit entgegengesetztem Vorzeichen einzusetzen (es genügt hierbei, den

Ausdruck $\frac{V \cdot G \cdot z_u \cdot \frac{l}{2}}{T_x}$ durch Rechnung zu bestimmen), und außerdem gilt $\Sigma w \cdot y^2$ und y für die x -Achse durch die zwei Gelenke. Für den Fall, daß oben zwei oder ein Gelenk vorhanden sind, gilt eine analoge Berechnung (s. S. 72 und 73 des Sonderdrucks von 1910).

Aus dem berechneten H und V ergibt sich nun der Kämpferdruck R und hieraus durch graphische Zusammensetzung der vertikalen und horizontalen Kräfte mit R die Stützzlinie des Rahmens. Durch Benutzung der von Weyrauch aufgestellten Formeln für $M_x, V_x, H_x, N_x, T_x, R_x$ und c (s. S. 41 des Sonderdrucks von 1910) können jedoch auch die einzelnen Fugen mit den Angriffspunkten für N_x (aus $c = \frac{M_x}{N_x}$) direkt berechnet werden.

Sind nach der Bestimmung von H und V aus ihren Einflußlinien die Kernpunktmomente berechnet worden, so ergibt sich aus der Drehrichtung für ein $\begin{cases} \text{pos. } Mk_0 \\ \text{neg. } \end{cases}$ unten $\begin{cases} \text{Zug} \\ \text{Druck} \end{cases}$ und für ein $\begin{cases} \text{pos. } Mk_u \text{ oben} \\ \text{neg. } \end{cases}$ $\begin{cases} \text{Druck} \\ \text{Zug,} \end{cases}$ weil die Drehrichtung der Momente Mk_u^0 in Beziehung auf die Kernpunkte entgegengesetzt derjenigen für die Zug- oder Druckspannungen ist, welche aus $\sigma_0^u = \frac{Mk_u^0}{W}$ zu berechnen sind.

Die allgemeine Anwendbarkeit der von mir näher ausgeführten Berechnungsweise für den Rahmen ohne und mit Gelenken geht auch aus den nebengezeichneten drei

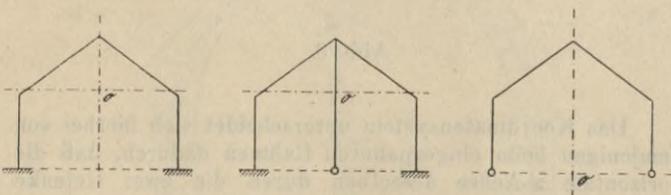


Abb. 9.

Fällen für den Rahmen eines Lokomotivschuppens hervor, wobei wegen der geraden Stäbe des Rahmens die Berechnung nach den Formeln von Müller-Breslau einfacher ist.

Denn man hat außer dem Koordinatenursprung o mit dem Abstand $z_0 = \frac{\Sigma w y'}{\Sigma w}$ nur noch die Ausdrücke:

$$X = H = \frac{S_x}{T_x}, Y = V = \frac{S_y}{T_y}, Z = M = - \frac{\Sigma F'_0}{G}$$

zu bestimmen, wo

$$S_x = \Sigma \frac{F_0}{J} \cdot y_s, S_y = \Sigma \frac{F_0}{J} \cdot x_s \text{ und } \Sigma F_0 = \Sigma \frac{F_0}{J}$$

ist und T_x sowie T_y den Trägheitsmomenten

$$\int y^2 \frac{ds}{J} \text{ und } \int x^2 \frac{ds}{J}$$

entsprechen. Die letztern ergeben sich (s. S. 57 des Sonderdrucks von 1910) aus

$$T_x = \Sigma \frac{1}{3} w (y_1^2 + y_1 \cdot y_2 + y_2^2) \text{ und}$$

$$T_y = \Sigma \frac{1}{3} w (x_1^2 + x_1 \cdot x_2 + x_2^2),$$

und es sind y_1, y_2 sowie x_1, x_2 die Endordinaten und -abscissen der Stäbe mit $w = \frac{s}{J}$, und dieselben werden mit ihren Vorzeichen eingesetzt. Wird T_x für die nächste horizontale Verbindungslinie von zwei Ecken des Rahmens berechnet, so ergibt sich das T'_x für den Schwerpunkt o aus $T'_x = T_x - y^2 \cdot \Sigma w$ (wo y die Ordinate der Ecken ist). Der Wert von T'_x für den Zweigelenrahmen ist in Beziehung auf die veränderte x -Achse durch die zwei Gelenke zu berechnen, wobei $T'_x = T_x + z_u^2 \Sigma w$ wird (T'_x kann auch direkt aus den Ordinaten y berechnet werden).

Die Ausdrücke

$$\int \frac{M_0 \cdot y ds}{J} = \frac{F_0 \cdot y_s}{J} \text{ und } \int \frac{M_0 \cdot x ds}{J} = \frac{F_0 \cdot x_s}{J}$$

(s. S. 58 des Sonderdrucks von 1910) sind so zu berechnen, daß die Momentenfläche F_0 der Momente M_0 für die linksseitigen Kräfte immer senkrecht zur Stabrichtung s anzunehmen ist, weil ds der schiefen Länge entspricht und $dF_0 = M_0 \cdot ds$ das Rechteck für M_0 senkrecht zu ds darstellt. Wird daher die Momentenfläche der Einfachheit halber in vertikaler (oder auch horizontaler) Richtung aufgetragen, so muß die vertikale (oder horizontale) Momentenfläche F_0 mit der schiefen Länge s berechnet werden, oder es ist $\frac{F_0}{\cos \alpha}$ (bzw. $\frac{F_0}{\sin \alpha}$) in die Summenausdrücke einzusetzen, wo α dem Neigungswinkel für s entspricht.

Die nach obigem auszuführende Berechnung der in Abb. 9 gezeichneten Rahmen ergibt nun verschiedene Momente und Dimensionen, je nachdem sie an den Enden eingespannt, aber außerdem mit einer mittlern Säule oder mit zwei Gelenken versehen sind. Das Verhältnis des Trägheitsmoments J in den Ständern und den obern Balken kann angenähert = 1 : 1 angenommen werden (im obigen Fall ergab sich das Verhältnis 5 : 4), indem es beim eingespannten Rahmen günstiger ist, wenn für den Winddruck die Ständer stärker und die Balken schwächer sind, und für die vertikale Belastung das Entgegengesetzte der Fall ist. Da die Eisenbetonplatte des Daches durch Winddruck auch auf Zug beansprucht wird, so kann dieselbe bei der Berechnung von J unberücksichtigt bleiben.

Der Winddruck wurde mit $p \cdot \sin^2 (\alpha + 10) = 78 \text{ kg/qm}$ senkrecht zur Dachfläche (für $p = 150 \text{ kg}$) berechnet und gilt derselbe Wert auch für das qm Grundriß und Aufriß, und als Schneelast ist $75 \cdot \cos \alpha = 61 \text{ kg/qm}$ senkrecht zur Dachfläche angenommen worden, so daß bei ungünstigster Belastung mit ganzem Winddruck und halber Schneelast 110 kg/qm erhalten wurden, wozu noch der untere horizontale Winddruck mit 150 kg/qm kommt.

Die Berechnung des eingespannten Rahmens nach der von mir veröffentlichten Berechnungsweise (durch Lamelleneinteilung nach der Methode von Professor Mörsch, s. Abb. 10) hat aber dasselbe Resultat ergeben wie die Berechnung als

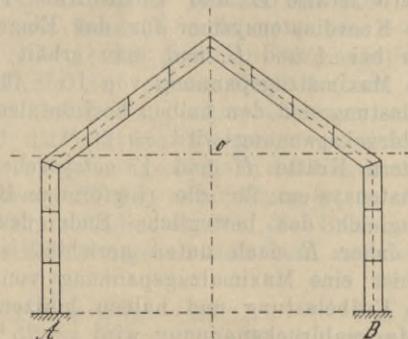


Abb. 10.

Stabzug mit festen Ecken (nach der von mir gleichfalls angewendeten Methode von Professor Dr. Müller-Breslau), indem dieselben Werte für $H = X, V = Y$ und $M = Z$

erhalten wurden, und zwar nicht nur für die vertikale, sondern auch für die horizontale Belastung.

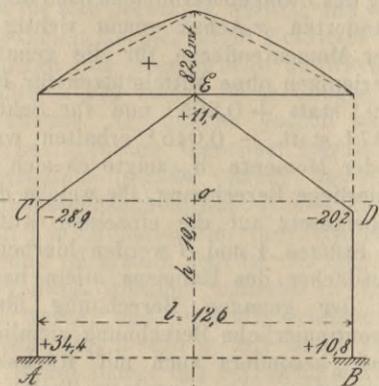


Abb. 11.

Bei geraden Stäben ist jedoch die letztere Berechnungsweise einfacher, und für die vertikale Belastung erhält man eine einfachere Momentenfläche (s. Abb. 11), wenn bei B ein festes und bei A ein bewegliches Auflager angenommen wird, so daß die Momentenfläche in vertikaler Richtung mit Berücksichtigung des Auflagerdrucks A zu bestimmen ist. Die aus obigen Formeln erhaltenen Werte von X, Y und Z gelten dann für die Mitwirkung des vertikalen Auflagerdrucks A, und wenn ihre Größe mit den auch (nach obigen Formeln) berechneten H, V und M verglichen werden soll, so ist zu dem erhaltenen Y noch A und zu Z noch $A \cdot \frac{l}{2}$ zu addieren, und es ergeben sich alsdann dieselben Werte wie für die Annahme eines frei beweglichen Endes bei A.

In der Formel $M_x = M + M_0 - H \cdot y - V \cdot x$ (zur Berechnung der Biegemomente für die einzelnen Fugen) gilt bei Einsetzung der Werte von $X = H$ und $Y = V$ für das bewegliche Auflager das positive Biegemoment M_0 mit Auflagerdruck, während bei Einsetzung von $X = H$ und $Y = V$ für das frei bewegliche Ende das negative Biegemoment M_0 ohne Auflagerdruck gilt, und es ergeben sich alsdann in beiden Fällen dieselben Werte für M_x , wenn sämtliche Größen mit ihren Vorzeichen eingesetzt werden.

Bei der horizontalen Belastung ist es günstiger, wenn bei rechtswirkendem Winddruck A als frei bewegliches Ende angenommen wird, weil man alsdann eine einfachere Momentenfläche erhält. Will man den Gegendruck $A = \frac{M_w}{l}$

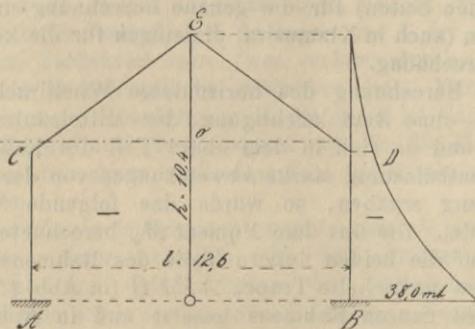


Abb. 12.

berücksichtigen, so ergibt sich als Momentenfläche des letztern ein rechtwinkliges Dreieck über l, dessen Ordinate bei B = M_w ist, und außerdem noch ein Rechteck mit konstanter Ordinate M_w über BD.

Die letztere Berechnung für den Gegendruck ist jedoch überflüssig, da mit dem X, Y und Z für die rechtsseitige Momentenfläche (s. Abb. 12) und dem zugehörigen negativen

M_0 schon die richtigen Werte für M_x erhalten werden, und bei Hinzurechnung der Momentenfläche für A sich nur Y, Z und M_0 ändern, und hieraus dieselben Werte für M_x entstehen.

Die Annahme einer Mittelstütze ergibt bedeutend kleinere Momentenflächen, indem die Momentenfläche des Gegendrucks von derjenigen der Gesamtbelastung für das Eigengewicht, die halbe Schneelast und den vertikalen Winddruck abgeht (vgl. die gestrichelten Linien in Abb. 11).

Bei der vertikalen Aufzeichnung der Momentenflächen sind die den einzelnen Stäben entsprechenden Werte von F_0 für die schiefe Länge s zu bestimmen oder mit $\frac{1}{\cos \alpha}$ zu multiplizieren (bzw. für die horizontalen Momentenflächen mit $\frac{1}{\sin \alpha}$).

Die mittlere Säule hat den Auflagerdruck des mittlern Teils zu tragen, so daß die Parabeln F_0 über den Dachseiten erhalten werden (s. Abb. 13), und hieraus X, Y und Z zu berechnen ist. Zur Vergleichung des eingespannten Rahmens

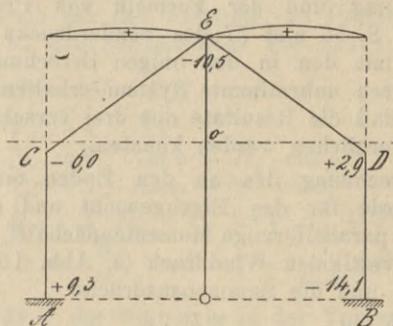


Abb. 13.

ohne Säulen und mit Säulen sind die Momente M_a, M_b, M_c, M_d und M_e in den Ecken eingeschrieben, und zwar für die ganze vertikale und horizontale Belastung, und es geht hieraus die wesentlich günstigere Gestaltung des Rahmens mit einer Mittelstütze hervor.

Der Auflagerdruck derselben ist hierbei diskontinuierlich berechnet worden, indem man dadurch ein richtigeres Resultat als für die kontinuierliche Berechnung erhält (schon wegen der teilweisen Einspannung der verbundenen Teile) und bei der Berechnung der Momente für den horizontalen Winddruck braucht die Mittelstütze nicht berücksichtigt zu werden, weil der vertikale Druck und Zug für beide Hälften gleich groß wird und sich dadurch aufhebt.

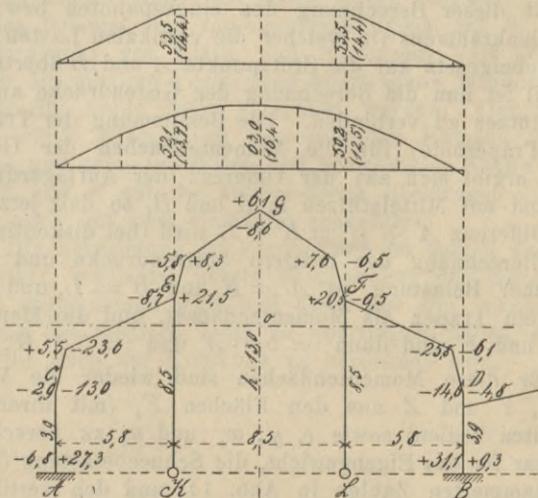


Abb. 14.

Dies hat sich bei der Berechnung des nebengezeichneten eisernen Rahmens für einen Güterschuppen gezeigt, welcher für die vier Belastungen des Eigengewichts, der Schnee-

last, des vertikalen und des horizontalen Winddrucks besonders berechnet wurde, und zwar mit einem konstanten $J = 1$ in obigen Formeln. Die Berechnung des Rahmens erfolgte sowohl für den an den Enden eingespannten Rahmen als für den Zweigelenrahmen ohne und mit Säulen, und bei der Berücksichtigung der letztern wurden die Momentenflächen F_0 der Gegendrücke (das Trapez) von denjenigen ohne ihre Mitwirkung (angenähert eine Parabel) abgezogen.

Der Zweigelenrahmen mit Mittelsäulen wurde auch nach der Methode von Müller-Breslau als dreifach statisch unbestimmtes System berechnet, indem für den Rahmen mit festen Ecken Gelenke bei A, B, E, F, K und L angenommen worden sind. Diese Berechnung wurde nun auch nach obigen Formeln für X, Y und Z mit der diskontinuierlichen und kontinuierlichen Auflagerung des Rahmens bei E und F ausgeführt (letztere, auch mit Berücksichtigung der Außenkräfte des Rahmens bei der Bestimmung der Auflagerdrücke in A, E, F und B , aus den Momenten der Stützpunkte mittels der Clapeyron'schen Gleichung und der Formeln von Professor Dr. Weyrauch, s. S. 55 und 77 des Sonderdrucks von 1910) und ebenso mit den in der obigen Berechnung für das dreifach statisch unbestimmte System erhaltenen Stützdrücken, so daß die Resultate der drei verschiedenen Berechnungen verglichen werden konnten.

Die Berechnung des an den Enden eingespannten Rahmens wurde für das Eigengewicht und den Schneeeindruck (s. die parabelförmige Momentenfläche F_0 in Abb. 14) und für den vertikalen Winddruck (s. Abb. 15) besonders durchgeführt, und die Summenausdrücke

$$X = \frac{\sum F'_0 \cdot y_s}{T_x}, \quad Y = \frac{\sum F'_0 \cdot x_s}{T_y}, \quad Z = - \frac{\sum F'_0}{G}$$

für die einzelnen Trapeze F'_0 (welche durch die gestrichelten Linien angedeutet sind) mit den schiefen Stablängen berechnet, und die horizontalen Schwerpunktabstände e derselben sowie die vertikalen Abstände y' des Rahmens (in diesen Schwerlinien) vom Scheitel und hieraus

$$x_s \text{ und } y_s = z_0 - y' \quad \left(\text{wo } z_0 = \frac{\sum w \cdot y'}{\sum w} = 5,76 \text{ m ist} \right)$$

bestimmt und in die Formeln für X, Y und Z eingesetzt. Bei der Berechnung des Zweigelenrahmens kommen dieselben Momentenflächen in Betracht sowie dieselben Werte für F_0, e und y' , und es ist nur $y_s = h - y'$ ($h =$ Gesamthöhe in der Mitte $= 13 \text{ m}$) und T_x ist für die x -Achse durch die Gelenke zu berechnen.

Mit dieser Berechnung des eingespannten bzw. des Zweigelenrahmens (in welcher die vertikalen Lasten nach dem Hebelgesetz auf die Stützpunkte A und B übertragen wurden) ist nun die Berechnung der Gegendrücke an den Mittelstützen zu verbinden. Die Bestimmung der Trapeze (bzw. Trapezoide) für die Momentenflächen der Gegendrücke ergibt sich aus der Differenz der Auflagerdrücke ohne und mit Mittelstützen in A und B , so daß jetzt für diese Differenz $A' + B' = K + L$ wird (bei diskontinuierlicher Berechnung der mittlern Stützdrücke und symmetrischer Belastung ist $A' = K$ und $B' = L$, und man erhält ein Trapez als Momentenfläche), und die Momente bei E und F sind dann $= 5,8 \cdot A'$ und $= 5,8 \cdot B'$.

Für diese Momentenflächen sind wieder die Werte von X, Y und Z aus den Flächen F_0 (mit ihren gestrichelten Teilen) sowie e, y', x_s und y_s zu berechnen, und zwar für das Eigengewicht, die Schneebelastung (s. die eingeklammerten Zahlen in Abb. 14) und den vertikalen Winddruck, so daß man hieraus die Differenz beider Berechnungen erhält, und die Werte von $H = X, V = Y$ und $M = Z$ bestimmt sind.

Durch die Vergleichung der drei Berechnungen für den Zweigelenrahmen mit diskontinuierlichen, kontinuier-

lichen und genauen Stützdrücken für das dreifach statisch unbestimmte System hat es sich nun gezeigt, daß die Berechnung des Zweigelenrahmens nach obigen Formeln mit der veränderten x -Achse genau richtig ist, indem bei Abzug der Momentenfläche für die genauen Stützdrücke von derjenigen ohne Mittelstützen für Eigengewicht $H = + 0,199^t$ statt $+ 0,205^t$ und für Schneebelastung $H = - 0,047^t$ statt $- 0,045^t$ erhalten wurde. Nach Ausrechnung der Momente M_x zeigte es sich ferner, daß die diskontinuierliche Berechnung, für welche die Belastung nach dem Hebelgesetz auf die einzelnen Stützen verteilt wird (bei den Stützen A und B werden hierbei die äußern Kräfte der Vordächer des Rahmens allein berücksichtigt) sehr gut mit der genauen Berechnung übereinstimmt, während die kontinuierliche Berechnung ziemlich stark abweicht, so daß (besonders auch mit Rücksicht auf die teilweise Einspannung der einzelnen Teile) die erstere Berechnung richtigere Werte ergibt.

Da bei dem Zweigelenrahmen dieselben Momentenflächen gelten wie für den eingespannten Rahmen, und nur die veränderte x -Achse (für T_x und y_s) zu berücksichtigen ist, so lassen sich die Resultate beider Berechnungen für die Momente M_x leicht vergleichen, und ist dies auch in den Abb. 14 und 15 durch Einschreiben derselben an den Ecken des Rahmens geschehen. Die innern Zahlen gelten für den eingespannten Rahmen in Abb. 14 und den Zweigelenrahmen in Abb. 15 ohne Mittelstützen, und die äußern Zahlen gelten für dieselben mit diskontinuierlichen Stützen, und über letztern stehen in

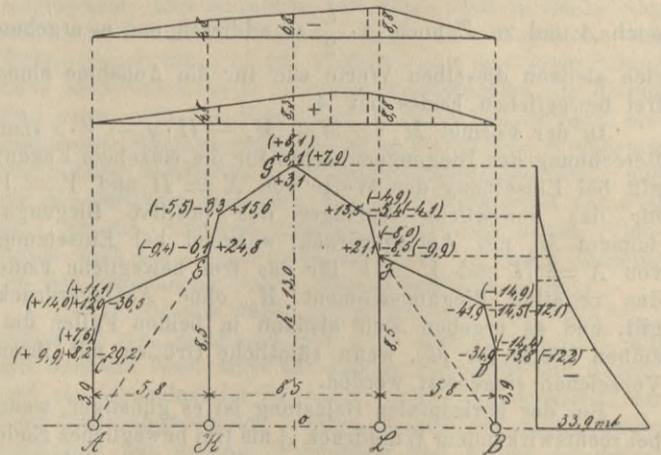


Abb. 15.

Klammern die Maximalwerte der negativen und positiven M_x (auf beiden Seiten) für die genaue Berechnung und neben denselben (auch in Klammern) diejenigen für die kontinuierliche Berechnung.

Die Berechnung des horizontalen Winddrucks wurde zunächst ohne Berücksichtigung der Mittelsäulen durchgeführt, und da sich in dem oberen Teil des Rahmens für die Gesamtbelastung starke Abweichungen von der genauen Berechnung ergaben, so wurde das folgende Verfahren angewendet. Die aus dem Moment M_w berechnete Kraft H wurde auf die beiden äußern Teile des Rahmens verteilt, indem das gestrichelte Trapez $A E F B$ (in Abb. 15) an die Stelle des ganzen Rahmens gesetzt und in E und F je $\frac{H}{2}$ als Horizontalkraft angenommen wurde. Hierdurch entsteht in den beiden stützenden Dreiecken (bei Annahme von zwei Rechtecken würden sich dieselben vertikalen Kräfte ergeben) nach Abb. 16 rechts Druck in der rechten Säule und links Zug in der linken Säule, welche beide aus $V = \frac{M_w}{2 \cdot 5,8} = 2,92^t$ hervorgehen und die unten gezeichnete Momentenfläche ergeben. Es kann nun die in

Abb. 15 gezeichnete Momentenfläche des horizontalen Winddrucks und die in Abb. 16 enthaltene Momentenfläche der Gegendrücke für sich berechnet werden, und es sind alsdann beim eingespannten Rahmen beide Resultate für H , V und M zu summieren (die Gegendrücke bewirken ein $H = 0$, während V und M aus beiden Berechnungen hervorgehen).

Die Momente M_x können jedoch auch für beide Momentenflächen getrennt berechnet werden, und ist M_0 für die horizontalen Kräfte gleich den Ordinaten der negativen Momentenfläche in Abb. 15 und für die vertikalen Kräfte gleich den Ordinaten der positiven Momentenfläche in Abb. 16, und im erstern Fall ist der Gegendruck bei A nicht berücksichtigt worden, während er im letztern Fall mitgerechnet wurde, und sind alle erhaltenen Werte von H , V , M sowie M_0 , x und y mit ihren Vorzeichen einzusetzen (M erhält immer das entgegengesetzte Vorzeichen von F_0).

Für den Rahmen in Abb. 13 fallen die Mittelstützen zusammen, so daß die Beanspruchung der Mittelsäule durch den horizontalen Winddruck gleich 0 wird (die Druck- und Zugkraft hebt sich gegenseitig auf), und dieselbe für die Berechnung daher nicht in Betracht kommt.

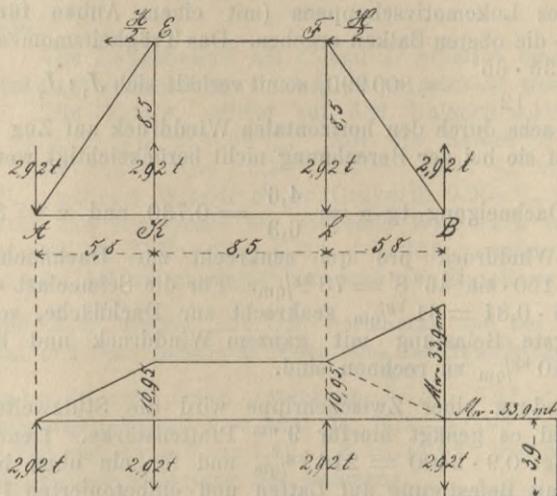


Abb. 16.

Zur Berechnung der Momente an den Ecken gilt nun für den eingespannten Rahmen die Formel $M_x = M + M_0 - H \cdot y - V \cdot x$, und die ungünstigsten Werte ergeben sich aus der Zusammensetzung von Eigengewicht, halber Schneelast und ganzem Winddruck bzw. ganzer Schneelast und halbem Winddruck (gewöhnlich gibt das erstere die Maximalwerte). Hierbei sind die erhaltenen Werte von H , V und M einzusetzen, und in M_0 ist bei Annahme eines beweglichen Auflagers in A der Auflagerdruck zu berücksichtigen (was schon durch die aufgezeichnete Momentenfläche geschehen ist). Für die Annahme eines frei beweglichen Endes in A ist dagegen M_0 ohne Auflagerdruck (bzw. Gegendruck für die Horizontalkräfte) zu berechnen, und dasselbe erhält ein negatives Vorzeichen.

Beim Zweigelenkrahmen ergibt sich M_x aus dem berechneten Horizontalschub und dem Auflagerdruck A (bzw. auch den Gegendrücken der Mittelsäulen) und der vertikalen sowie horizontalen Belastung. Beim Rahmen

ohne Mittelstützen ist alsdann der Gegendruck $\frac{M_w}{l} = 1,685 t$ für die horizontalen Kräfte zu berücksichtigen, und beim Rahmen mit Stützen sind die Gegendrücke $= \frac{M_w}{2 \cdot 5,8} = 2,92 t$

einzusetzen. Will man die Stützlinie aufzeichnen, so sind beim eingespannten Rahmen die Werte von x_r , y_r , r und R zur Bestimmung des Kämpferdrucks wie oben zu berechnen (s. die Tunnelberechnung), und beim Zweigelenkrahmen ergibt sich der letztere aus H und V im Kämpfer, und hiermit ist nun die Gesamtbelastung (bzw. auch mit den Gegendrücken bei Mittelstützen) zusammzusetzen.

Aus der für einen halbkugelförmigen Wasserbehälter durchgeführten Berechnung (s. S. 90 des Sonderdrucks von 1910) geht hervor, daß die positiven Biegemomente M_x oben (außen) Druck und unten (innen) Zug und die negativen Biegemomente oben (außen) Zug und unten (innen) Druck hervorrufen, so daß die Spannungen im Rahmen genau bestimmt werden können.

Die Größe der Spannungen nebst der Stützlinie ergibt sich aber auch aus den Formeln von Professor Dr. Weyrauch (s. S. 87 des Sonderdrucks von 1910):

$$\begin{aligned} H_x &= H - \sum H, \\ V_x &= V - \sum P, \\ N_x &= V_x \cdot \sin \varphi + H_x \cdot \cos \varphi, \\ T_x &= V_x \cdot \cos \varphi - H_x \cdot \sin \varphi, \\ R_x &= \sqrt{H_x^2 + V_x^2} = \sqrt{N_x^2 + T_x^2}, \\ c &= \frac{M_x}{N_x} \quad \text{und} \quad \sigma_u^0 = \frac{1}{b \cdot h} \left(N_x \pm \frac{6 M_x}{h} \right). \end{aligned}$$

Die Abstände c der Stützlinie in der Fugenrichtung sind für dasselbe Vorzeichen von M_x und N_x positiv und sind dann von der Fugenmitte aus nach oben (außen) aufzutragen und im entgegengesetzten Fall negativ und nach unten (innen) aufzutragen (s. S. 41, 90).

Aus den in Abb. 14 und 15 eingeschriebenen Zahlen für M_x ergibt sich nun, daß die Beanspruchung des Zweigelenkrahmens ohne Mittelstützen wesentlich ungünstiger ist als diejenige des eingespannten Rahmens ohne Mittelstützen.

Die Momente des eingespannten Rahmens mit Mittelstützen sind dagegen im oberen Teil größer als diejenigen des Zweigelenkrahmens mit Mittelstützen, während die teuren Gelenke wegfallen, aber die Einspannung ein stärkeres Fundament erfordert.

Die äußeren Teile des Rahmens könnten auch als eingespannte Rahmen mit festen Ecken ausgeführt werden (s. das Beispiel des Lokomotivschuppens auf S. 64 des Sonderdrucks von 1910), und in diesem Fall kann der durch die mittlere Verbindung übertragene Winddruck zur Hälfte für beide Teile gerechnet werden. Der mittlere Teil würde dann einen eingespannten Rahmen für sich bilden, und seine vertikalen und horizontalen Kräfte werden bei E und F auf die äußeren Teile übertragen (derselbe wird auch mit zwei Gelenken ausgeführt).

Die Berechnung für obige Fälle ist jedoch wesentlich einfacher, wenn die untere Einspannung der Mittelsäulen nicht angenommen wird und diese nur die vertikale Belastung des mittlern Teils zu übertragen haben und für dieselbe auch auf Knickung zu berechnen sind.

I. Vergleichende Berechnung für verschiedene Rahmenkonstruktionen eines Lokomotivschuppens.

1. Dimensionierung des eingespannten Rahmens nach verschiedenen Berechnungsweisen.

Die Berechnung der unten gezeichneten Rahmenkonstruktionen ergibt verschiedene Dimensionen, je nachdem sie I unten eingespannt, oder II in der Mitte außerdem mit einer Säule, oder III unten mit Gelenken ausgeführt wird.

Eine vergleichende Berechnung für die Verhältnisse der Trägheitsmomente der Ständer und der oberen Balken von 1 : 1; 3 : 5; 1 : 2 hat ergeben, daß es bei großen Horizontalkräften günstiger ist, wenn die Ständer stärker und die oberen Balken schwächer sind, während für die vertikale Belastung das Umgekehrte gilt. Doch ist der Einfluß auf die Dimensionierung verhältnismäßig gering, wie die in Abb. 17 eingeschriebenen Zahlen dartun, welche sich in allen drei Fällen auf den unten eingespannten Rahmen (in I) beziehen, und gelten die äußeren Zahlen für die vertikale und die inneren Zahlen für die horizontale Belastung des Rahmens.

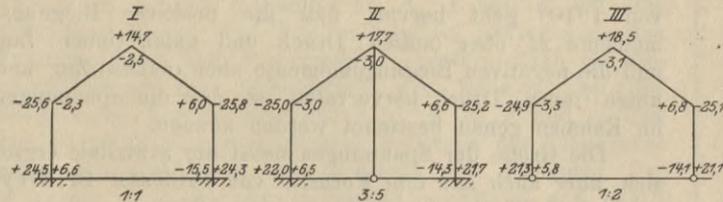


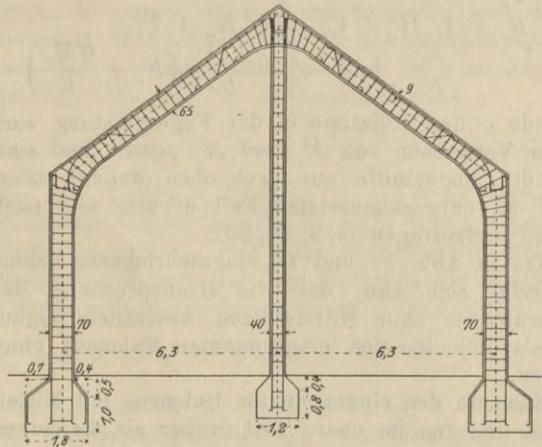
Abb. 17.

Die Berechnung des neugezeichneten Rahmens eines Lokomotivschuppens (mit einem Anbau für den Wasserbehälter) hat die eingeschriebenen Stärken für die Ständer und die oberen Balken ergeben. Das Trägheitsmoment der ersteren ist $J_1 = \frac{35 \cdot 70^3}{12} = 1000420$ und der letzteren $J_2 = \frac{35 \cdot 65^3}{12} = 800990$, somit verhält sich $J_1 : J_2 = 5 : 4$

(da die Platte des Dachs durch den horizontalen Winddruck auf Zug beansprucht wird, so ist sie bei der Berechnung nicht berücksichtigt worden).

Aus der Dachneigung $\text{tg } \alpha = \frac{4,6}{6,3} = 0,730$ und $\alpha = 36^\circ 8'$

ergibt sich der Winddruck pro qm senkrecht zur Dachfläche = $p \cdot \sin^2(\alpha + 10) = 150 \cdot \sin^2 46^\circ 8' = 78 \text{ kg/qm}$. Für die Schneelast erhält man $75 \cos \alpha = 75 \cdot 0,81 = 61 \text{ kg/qm}$ senkrecht zur Dachfläche, so daß für die ungünstigste Belastung mit ganzem Winddruck und halber Schneelast rund 110 kg/qm zu rechnen sind.



Bei Anwendung einer Zwischenrippe wird die Stützweite der Platte = $3,3 \text{ m}$ und es genügt hierfür 9 cm Plattenstärke. Denn das Eigengewicht beträgt $0,9 \cdot 2400 = 216 \text{ kg/qm}$ und für ein oben befindliches Ziegeldach mit Befestigung auf Latten und einbetonierten Dollen erhält man rund 60 kg/qm , somit zusammen rund 280 kg/qm und senkrecht zur Dachfläche $280 \cdot 0,81 = \text{rund } 230 \text{ kg}$ und mit obigen 110 kg zusammen rund 340 kg/qm .

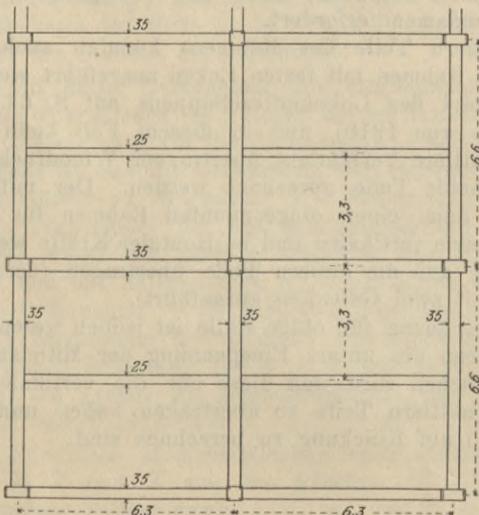


Abb. 18.

Mit Rücksicht auf Kontinuität kann in der Mitte $M_{qm} = \frac{ql^2}{12} = \frac{0,34 \cdot 3,3^2}{12} = 0,309 \text{ mt}$ und am Auflager $M_{qa} = \frac{ql^2}{9} = \frac{0,34 \cdot 3,3^2}{9} = 0,412 \text{ mt}$ angenommen werden, und nach den von mir entwickelten Dimensionierungsformeln (s. Berechnung der Eisenbetonkonstruktionen 1906 und 1910) ist für $A1b : x = \sqrt{\frac{6M}{7b \cdot \sigma_b}} = 0,01464 \sqrt{\frac{(41200)}{30900}} = 2,56 (2,97)$, $h = \frac{8}{3} x = 0,039 \sqrt{M} = 6,8 (7,9) \text{ cm}$, $f_e = \frac{bx}{50} = 0,0293 \sqrt{M} = 5,12 (5,94) \text{ qcm}$, so daß für $h = 7,5 (10,5) \text{ cm}$, $f_e = 8 \text{ (10) } = 6,3 \text{ qcm}$ genügen.

Die Zwischenrippe $45 \cdot 25$ mit $7,8 \text{ m}$ Stützweite erhält eine gleichförmige Belastung = $0,34 \cdot 3,3 = 1,12 \text{ t/m}$ und vom Eigengewicht der Rippe $0,36 \cdot 0,25 \cdot 2,4 = 0,22$ somit zusammen $1,34 \text{ t/m}$. Mit Rücksicht auf teilweise Einspannung an den Enden kann $M_q = \frac{ql^2}{12} = \frac{1,34 \cdot 7,8^2}{12} = 6,79 \text{ mt}$ gesetzt werden, wofür mit $b = 260 \text{ cm}$: $x =$

$= \sqrt{\frac{(339500)}{7 \cdot 260 \cdot 40}} = 7,48 (17,1) \text{ cm}$, $h = \frac{8}{3} x = 20,0 (45,7) \text{ cm}$, $f_e = \frac{bx}{50} = \frac{260 \cdot 7,48}{50} = 38,9 (8,6) \text{ qcm}$ wird (am Auflager kann mit $\frac{ql^2}{24}$ gerechnet werden). Für $h = 41 \text{ cm}$ ist $f_e = \frac{20}{41} \cdot 38,9 = 18,9 \text{ qcm}$, so daß $4 \text{ (10) } 26$ genügen, wovon zwei gerade durchgehen, und zwei nach oben abzubiegen sind.

Die Berechnung der Längsrippen 60 · 35 ergibt sich im Scheitel aus dem Auflagerdruck der Zwischenrippen, und ist auf der einen Seite halbe Schneelast $= \frac{6,3}{7,8} \cdot \frac{0,075}{2} \cdot 3,3 = 0,10 \text{ t/m}$ und auf der anderen Seite außerdem der ganze Winddruck $= p \cdot \sin^2(\alpha + 10) = 78 \text{ kg/qm}$ Grundriß und Aufriß zu rechnen, oder $\frac{6,3}{7,8} \cdot 0,078 \cdot 3,3 = 0,208 \text{ t/m}$ vertikal und $\frac{4,6}{7,8} \cdot 0,078 \cdot 3,3 = 0,152 \text{ t/m}$ horizontal. Man erhält daher als vertikalen Auflagerdruck der Zwischenrippe links $(0,28 \cdot 3,3 + 0,208 + 0,1) \cdot \frac{7,8}{2} = 4,8 \text{ t}$ und rechts $(1,232 + 0,208) \cdot \frac{7,8}{2} = 5,62 \text{ t}$ und zusammen $4,8 + 5,62 = 10,42 \text{ t}$, und horizontal $\frac{7,8}{2} \cdot 0,152 = \text{rund } 0,60 \text{ t}$. Das Eigengewicht des Balkens ist $= 0,6 \cdot 0,35 \cdot 6,6 \cdot 2,4 = 3,33 \text{ t}$. Da derselbe die Rahmen verbindet, so soll er ohne Einspannung gerechnet werden, und man erhält alsdann $M_q = \frac{10,42 \cdot 6,6}{4} + \frac{3,33 \cdot 6,6}{8} = 19,94 \text{ mt}$, und hierfür ist nach $A3b : 16 b d x = \frac{6 M}{\sigma_b} + 10 b d^2$ oder $x = \frac{6 \cdot 1994000}{16 \cdot 40 \cdot 220 \cdot 9} + \frac{10 \cdot 9}{16} = 15,07 \text{ cm}$, $h = \frac{8}{3} x = 40,2 \text{ cm}$, $25 f_e = d(b - c) \left(1 - \frac{d}{2x}\right) + \frac{cx}{2} = 9(220 - 35) \left(1 - \frac{9}{2 \cdot 15,07}\right) + \frac{35 \cdot 15,07}{2}$ oder $f_e = 57,2 \text{ qcm}$. Für $h = 54 \text{ cm}$ ist $f_{e1} = \frac{h - \frac{d}{3}}{h_1 - \frac{d}{3}} f_e = \frac{40,2 - 3}{54 - 3} \cdot 57,2 = 41,7 \text{ qcm}$, so daß $8 \text{ } \textcircled{\text{D}} \text{ 26} = 42,5 \text{ qcm}$ genügen.

Die Längsbalken bei C und D erhalten eine wesentlich kleinere Belastung, können aber als Verbindungsträger der Rahmenkonstruktionen ebenso stark gemacht werden.

Die Kräfte, welche auf den Rahmen wirken, bestehen aus dem horizontalen Winddruck auf den Ständer BD $= 0,15 \cdot 6,6 = 0,99 \text{ t/m}$. Auf die Balken CE und DE kommt eine vertikale Belastung von 280 kg/qm , somit $0,28 \cdot 3,3 + 0,56 \cdot 0,35 \cdot 2,4 = 1,394 \text{ t/m}$, von halber Schneelast (s. oben) $0,10 \text{ t/m}$ und vom Winddruck im Grundriß $0,208 \text{ t/m}$ und im Aufriß $0,152 \text{ t/m}$. Für CE fällt der von rechts her wirkende Winddruck fort, so daß man rund $1,49 \text{ t/m}$ erhält, und für DE: $1,394 + 0,1 + 0,208 = \text{rund } 1,70 \text{ t/m}$ vertikal und $0,152 \text{ t/m}$ horizontal. Außerdem erhält man noch die Einzellasten bei E $= 4,80 + 5,62 + 3,33 = \text{rund } 13,8 \text{ t}$ vertikal und $0,6 \text{ t}$ horizontal, und bei C und D $4,80 + 3,33 = 8,13 \text{ t}$ vertikal und $0,6 \text{ t}$ horizontal, wozu noch das Gewicht der Ständer $= 0,35 \cdot 0,7 \cdot 2,4 \cdot 5,8 = 3,41 \text{ t}$ kommt, somit zusammen $8,13 + 3,41 = 11,6 \text{ t}$. Die Resultanten der gleichförmigen Belastungen sind für BD $= 0,99 \cdot 5,8 = 5,74 \text{ t}$, für DE $= 1,7 \cdot 7,8 = 13,26 \text{ t}$ und für CE $= 1,49 \cdot 7,8 = 11,62 \text{ t}$, und man erhält somit die in Abb. 19 eingeschriebene Belastung des Rahmens.

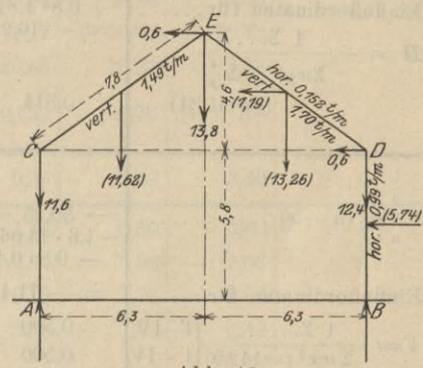


Abb. 19.

Es können nun zwei verschiedene Berechnungsarten zur Anwendung kommen, und zwar mit Annahme eines frei beweglichen Endes bei A und des eingespanntseins bei B nach Professor Mörsch oder auch eines beweglichen Auflagers bei A und des eingespanntseins bei B nach Professor Dr. Müller-Breslau.

2. Berechnung des Rahmens nach der Methode von Professor Mörsch für eingespannte Gewölbe.

Es soll also zunächst die erstere Berechnungsweise zur Anwendung kommen, und als Lamellenteilung a ist $3 \cdot 1,6 + 1,5$ und $1,8 + 2 \cdot 2$ gewählt worden, so daß nach der von mir veröffentlichten Rahmenberechnung (s. Ber. d. Eisenbetonkonstr. 1910, S. 53) folgende Tabelle aufzustellen ist:

Lamelle	1	2	3	4	5	6	7	$\Sigma 1-7$
x	0,8	2,4	4,0	5,55	6,3	6,3	6,3	—
y' (Abstand vom Scheitel) .	0,58	1,75	2,92	4,05	5,5	7,4	9,4	—
$s = \frac{a}{\cos \alpha} = \frac{a}{0,81}$	1,98	1,98	1,98	1,86	1,8	2,0	2,0	—
h (Lamellenhöhe)	0,65	0,65	0,65	0,65	0,7	0,7	0,7	—
$J = \frac{4}{5} = \frac{0,00800990}{0,01000420} \times 500$	4	4	4	4	5	5	5	—
$w = \frac{s}{J} (: 500)$	0,495	0,495	0,495	0,465	0,36	0,40	0,40	3,11
$F = 0,35 \cdot 0,65 (0,7)$	0,228	0,228	0,228	0,228	0,245	0,245	0,245	—
$\frac{s}{F}$	8,7	8,7	8,7	8,2	7,4	8,2	8,2	$\frac{58,1}{500} = 0,12$

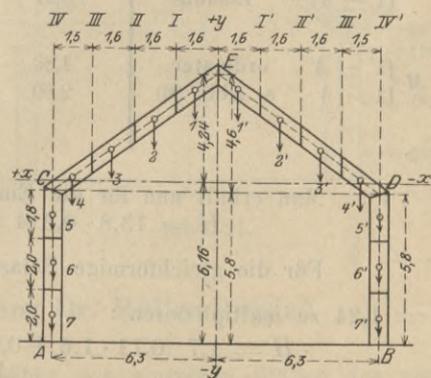


Abb. 20.

Der Koordinatenursprung der x - und y -achse ergibt sich aus

$$z = \frac{\sum wy'}{\sum w} = \frac{(0,58 + 1,75 + 2,92) \cdot 0,495 + 4,05 \cdot 0,465 + 5,5 \cdot 0,36 + (7,4 + 9,4) \cdot 0,4}{3,11} = \frac{13,182}{3,11} = 4,24 \text{ m.}$$

Hieraus erhält man die folgende Tabelle zur Bestimmung der Einflußordinaten für H , V und M , und der Einfachheit halber sollen die vertikalen und horizontalen Kräfte nach den auf S. 10–11 angegebenen Formeln besonders berechnet werden (die Ausrechnung beginnt bei IV' 7').

Werden hierbei die Vorzeichen – und + berücksichtigt, so ist das nach rechts gerichtete x negativ einzuführen, und es ergeben sich dann bei Beachtung der Vorzeichen in den Summenausdrücken sowie in H , V und M die richtigen Zahlenwerte der Einflußordinaten, und zwar nicht nur für die Vertikalen I', II' usw., sondern auch durch Interpolation für die Zwischenpunkte 1', 2' usw. oder auch für beliebig angenommene Einzellasten.

Vertikalen	Scheitel (1')	I' (2')	II' (3')	III' (4')	IV' (5')	IV' (6')	IV' (7')	$\Sigma 1' - 7'$
x	– 0,8	– 2,4	– 4,0	– 5,55	– 6,3	– 6,3	– 6,3	
$y = 4,24 - y'$	3,66	2,49	1,32	0,19	– 1,26	– 3,16	– 5,16	
w	0,495	0,495	0,495	0,465	0,36	0,40	0,40	$2 \times 3,11 = 6,22$
$w_x = w \cdot x$	– 0,40	– 1,19	– 1,98	– 2,58	– 2,27	– 2,52	– 2,52	
$w_y = w \cdot y$	1,81	1,23	0,65	0,09	– 0,45	– 1,26	– 2,06	
$w \cdot x^2$	0,32	2,85	7,92	14,32	14,29	15,88	15,88	$2 \times 71,46 = 142,9$
$w \cdot y^2$	6,63	3,07	0,86	0,02	0,57	4,00	10,65	$2 \times 25,8 = 51,6$
$-\frac{l}{2} \sum w_y (a - x)$	– 14,82 – – 1,6 · 1,8	– 10,96 – – 1,6 · 3,03	– 5,59 – – 1,6 · 3,68	– 1,5 · 3,77 + + 0,75 · 0,09	– 0 · 3,77	– 0 · 3,32	– 0 · 2,06	
Einflußordinaten für $H = -\frac{1}{\sum wy^2 + \frac{\sum w_x^2}{F}}$	+ 0,8 · 1,81 = – 16,25	+ 0,8 · 1,23 = – 14,82	+ 0,8 · 0,65 = – 10,96	= – 5,59				
$H = -\frac{1}{\sum wy^2 + \frac{\sum w_x^2}{F}}$ (= 51,84) ...	0,314	0,286	0,212	0,108	0	0	0	$51,6 + 2 \cdot 0,12 = 51,84$
$-\frac{l}{2} \sum w_x (a - x)$	– 50,25 – – 1,6 · 13,06 – – 0,8 · 0,4	– 30,31 – – 1,6 · 11,87 – – 0,8 · 1,19	– 12,90 – – 1,6 · 9,89 – – 0,8 · 1,98	– 1,5 · 7,31 – – 0,75 · 2,58	– 0 · 7,31	– 0 · 5,04	– 0 · 2,52	Die Werte I–IV bilden mit I'–IV' die Summe 1
Einflußordinaten für $V = -\frac{1}{\sum wx^2} \left(\frac{I' - IV'}{I - IV} \right)$	0,500 0,500	0,352 0,648	0,212 0,788	0,090 0,910	0 (1)	0 (1)	0 (1)	
$-\frac{l}{2} \sum w (a - x)$	8,88 + 1,6 · 2,615 + 0,8 · · 0,495	5,09 + 1,6 · 2,12 + 0,8 · · 0,495	2,09 + 1,6 · 1,625 + 0,8 · · 0,495	1,5 · 1,16 + + 0,75 · 0,465	0 · 1,16	0 · 0,8	0 · 0,4	Die Werte I–IV sind um ihre Abstände x größer als I'–IV'
Einflußordinaten für $M = \frac{1}{\sum w} \left(\frac{I' - IV'}{I - IV} \right)$	= 13,46 2,164 2,164	= 8,88 1,428 3,028	= 5,09 0,818 4,018	= 2,09 0,337 5,137	0 (6,3)	0 (6,3)	0 (6,3)	
$H 1' - 4' (1 - 4)$	0,30	0,25	0,16	0,05				$0,76 \times 2$
$V \left\{ \begin{array}{l} 1' - 4' \\ 1 - 4 \end{array} \right.$ (interpolierte Einfluß-	0,43 0,57	0,28 0,72	0,15 0,85	0,05 0,95				0,91 <u>3,09</u> 4,00
$M \left\{ \begin{array}{l} 1' - 4' \\ 1 - 4 \end{array} \right.$ ordinaten, s. Abb. 20)	1,80 2,60	1,12 3,52	0,58 4,58	0,17 5,72				3,67 <u>16,42</u> 20,09

Man erhält nun für die Einzellast 13,8^t in der Mitte:

$$H = 13,8 \cdot 0,314 = 4,33^t, \quad V = 13,8 \cdot 0,5 = 6,9^t, \quad M = 13,8 \cdot 2,164 = 29,86 \text{ mt.}$$

Für die gleichförmige Belastung rechts ergibt sich (da sie pro l. m. schiefe Länge gilt, so ist sie mit $\frac{7,8}{6,3} = 1,24$ zu multiplizieren):

$$H = 1,7 (0,71 \cdot 1,6 + 0,05 \cdot 1,5) \cdot 1,24 = 2,55^t, \quad V = 1,7 (0,86 \cdot 1,6 + 0,05 \cdot 1,5) \cdot 1,24 = 3,06^t, \\ M = 1,7 (3,50 \cdot 1,6 + 0,17 \cdot 1,5) \cdot 1,24 = 12,34^t.$$

Für die gleichförmige Belastung links ergibt sich:

$$H = 1,49 (0,71 \cdot 1,6 + 0,05 \cdot 1,5) \cdot 1,24 = 2,24^t, \quad V = 1,49 (2,14 \cdot 1,6 + 0,95 \cdot 1,5) \cdot 1,24 = 8,96^t, \\ M = 1,49 (10,70 \cdot 1,6 + 5,72 \cdot 1,5) \cdot 1,24 = 47,48 \text{ mt.}$$

Für die horizontalen Kräfte sind die Summenausdrücke:

$$H = - \frac{P \Sigma(y - b) \cdot w \cdot y}{\Sigma w y^2 + \Sigma \frac{s}{F}}, \quad V = - \frac{P \Sigma(y - b) w \cdot x}{\Sigma w x^2}, \quad M = \frac{P \Sigma(y - b) w}{\Sigma w}$$

zu berechnen, und wenn die Klammern

aufgelöst werden, so kann die obige Tabelle benützt werden, indem die Lamellentheilung dieselbe bleibt, und zwischen den erhaltenen Einflußordinaten interpoliert wird, um H , V und M zu erhalten.

Vertikalen	Scheitel (1')	I' (2')	II' (3')	III' (4')	IV' (5')	IV' (6')	IV' (7')	
$b = 4,24 + 0,4 - y'$ (in den Vertikalen)	4,64	3,48	3,31	2,14	- 0,16	- 2,16	- 4,16	
$w \cdot y$	1,81	1,23	0,65	0,09	- 0,45	- 1,26	- 2,06	
$w \cdot y^2$	6,63	3,07	0,86	0,02	0,57	4,0	10,65	
$\Sigma w y$	+ 0,01	- 1,80	- 3,03	- 3,68	- 3,77	- 3,32	- 2,06	Die Summierung beginnt in Spalte IV' (7')
$\Sigma w y^2$	25,80	19,17	16,10	15,24	15,22	14,65	10,65	
$b \Sigma w y$	+ 0,05	- 6,26	- 10,03	- 7,88	+ 0,60	+ 7,17	+ 8,57	
$\Sigma w y^2 - b \Sigma w y$	25,75	25,43	26,13	23,12	14,62	7,48	2,08	
$H = - \frac{1 (\Sigma w y^2 - b \Sigma w y)}{\Sigma w y^2 + \Sigma \frac{s}{F}} = (51,84)$	- 0,497	- 0,491	- 0,504	- 0,446	- 0,282	- 0,144	- 0,040	
y	3,66	2,49	1,32	0,19	- 1,26	- 3,16	- 5,16	
$w \cdot x$	- 0,40	- 1,19	- 1,98	- 2,58	- 2,27	- 2,52	- 2,52	
$w \cdot x \cdot y$	- 1,46	- 2,96	- 2,61	- 0,49	+ 2,86	+ 7,96	+ 13,00	
$\Sigma w x$	- 13,46	- 13,06	- 11,87	- 9,89	- 7,31	- 5,04	- 2,52	
$\Sigma w x y$	16,30	17,76	20,72	23,33	23,82	20,96	13,00	
$b \Sigma w x$	- 62,45	- 45,45	- 39,29	- 21,16	+ 1,17	+ 10,89	+ 10,48	
$\Sigma w x y - b \Sigma w x$	78,75	63,21	60,01	44,49	22,65	10,07	2,52	
$V = - \frac{1 (\Sigma w x y - b \Sigma w x)}{\Sigma w x^2} (= 142,9)$	- 0,551	- 0,442	- 0,420	- 0,311	- 0,159	- 0,070	- 0,018	
w	0,495	0,495	0,495	0,465	0,36	0,40	0,40	
Σw	3,110	2,615	2,120	1,625	1,16	0,80	0,40	
$\Sigma w y$	0	- 1,80	- 3,03	- 3,68	- 3,77	- 3,32	- 2,06	
$b \Sigma w$	+ 14,43	+ 9,10	+ 7,02	+ 3,48	- 0,19	- 1,73	- 1,66	
$\Sigma w y - b \cdot \Sigma w$	- 14,43	- 10,90	- 10,05	- 7,16	- 3,58	- 1,59	- 0,40	
$M = \frac{1 (\Sigma w y - b \Sigma w)}{\Sigma w} (= 6,22)$	- 2,320	- 1,752	- 1,616	- 1,151	- 0,576	- 0,256	- 0,064	
H { Einflußordinaten	- 0,50	- 0,50	- 0,48	- 0,36	- 0,21	- 0,09	- 0,02	}
V { der Mitten durch	- 0,50	- 0,43	- 0,37	- 0,24	- 0,12	- 0,04	- 0,01	
M { Interpolation, s. Abb. 21	- 2,04	- 1,68	- 1,38	- 0,86	- 0,42	- 0,16	- 0,03	

Hieraus ergibt sich für die in Abb. 21 eingeschriebenen Einzellasten:

$$H = (0,3 \cdot 1,48 + 0,35 \cdot 0,36 + 1,93 \cdot 0,21 + 1,98 \cdot 0,11) + 0,6 (0,50 + 0,28) = 1,66^t$$

$$V = (0,3 \cdot 1,30 + 0,35 \cdot 0,24 + 1,93 \cdot 0,12 + 1,98 \cdot 0,05) + 0,6 (0,55 + 0,16) = 1,23^t$$

$$M = (0,3 \cdot 5,10 + 0,35 \cdot 0,86 + 1,93 \cdot 0,42 + 1,98 \cdot 0,19) + 0,6 (2,32 + 0,58) = 4,76^{mt}$$

(da die Horizontalkräfte mit dem negativen Vorzeichen einzuführen sind, so erhält man ein positives H , V und M , und für die Vertikalkräfte gilt dasselbe Vorzeichen, weil in den Formeln für das eingespannte Gewölbe das nach unten gerichtete P schon ein negatives Moment ergibt, und daher die negative Kraft- richtung in P angenommen ist).

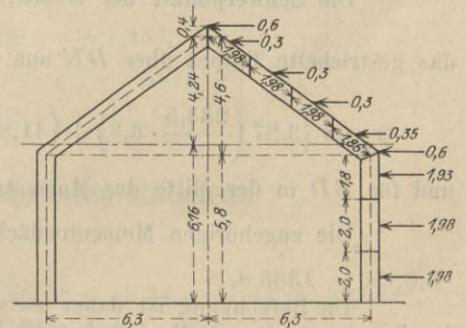


Abb. 21.

3. Berechnung des Rahmens nach den Formeln von Professor Dr. Müller-Breslau für eingespannte Stabzüge.

Nach der Berechnungsweise von Müller-Breslau ist die Momentenfläche über den einzelnen Stäben des eingespannten Rahmens zu bestimmen, und es ist auch hierbei am einfachsten, die vertikalen und horizontalen Kräfte getrennt zu berechnen. Man kann nun ein Eingespanntsein des Rahmens bei B und ein bewegliches Auflager oder freie Beweglichkeit bei A annehmen, und im ersteren Fall erhält man die in Abb. 22 gezeichnete Momentenfläche der vertikalen Kräfte.

Für CE ist $M_x = (30,53 - 11,6) x - 1,49 \cdot z \cdot \frac{x}{2}$, wo $\frac{z}{x} = \frac{7,8}{6,3} = 1,24$ ist, oder $M_x = x(18,93 - 0,924 x)$, somit für E mit $x = 6,3^m$: $M_x = 82,6 \text{ mt}$ (im ersten Viertel ist $M_x = 27,5 \text{ mt}$, in der Mitte $M_x = 50,5 \text{ mt}$ und im dritten Viertel $M_x = 68,8 \text{ mt}$).

Für DE ist $M_x = (32,15 - 12,4) x - 1,7 \cdot \frac{z \cdot x}{2} = x(19,75 - 1,054 x)$ oder für E mit $x = 6,3^m$: $M_x = 82,6 \text{ mt}$ (im ersten Viertel $M_x = 28,5 \text{ mt}$, in der Mitte $M_x = 51,8 \text{ mt}$ und im dritten Viertel $M_x = 69,8 \text{ mt}$).

Die Momentenlinien sind für gleichförmige Belastung schiefe Parabeln mit den mittleren Höhen 9,2 und 10,5, so daß man die Schwerpunkte der Momentenflächen für CE aus

$$x_s = \left\{ \left(\frac{82,6 \cdot 6,3}{2} \right) \cdot 2,1 + \left(9,2 \cdot 6,3 \cdot \frac{2}{3} \right) \cdot 3,15 \right\} : (260,2 + 38,6) = \frac{668,0}{298,8} = 2,24 \text{ m}, y_s = 2,60 \text{ m}$$

und für DE aus

$$x_s = \left\{ \left(\frac{82,6 \cdot 6,3}{2} \right) \cdot 2,1 + \left(10,5 \cdot 6,3 \cdot \frac{2}{3} \right) \cdot 3,15 \right\} : (260,2 + 44,1) = \frac{685,3}{304,3} = 2,25 \text{ m}, y_s = 2,60 \text{ m}$$

erhält, und die zugehörigen Momentenflächen sind $F_0 = 298,8$ und $= 304,3$.

Zur Vergleichung sind in Abb. 23 auch die Momentenflächen für die vertikalen Kräfte mit $A = 0$ dargestellt, und man erhält hierfür:

$$M_x = -1,49 \cdot \frac{z \cdot x}{2} \text{ wo } \frac{z}{x} = 1,24 \text{ ist, oder } M_x = 0,924 x^2, \text{ somit eine Parabel mit der Endordinate } 36,61 \text{ mt}$$

bei E . Von hier an gilt $M_x = -36,61 - (11,62 + 13,8) \cdot x - 1,7 \cdot \frac{z \cdot x}{2} = -36,61 - 25,42 x - 1,054 x^2$ oder für $x = 6,3^m$ bei D : $M_x = -36,61 - 160,15 - 41,83 = -238,59 \text{ mt}$. Das Moment über BD ist konstant $= -238,59 \text{ mt}$.

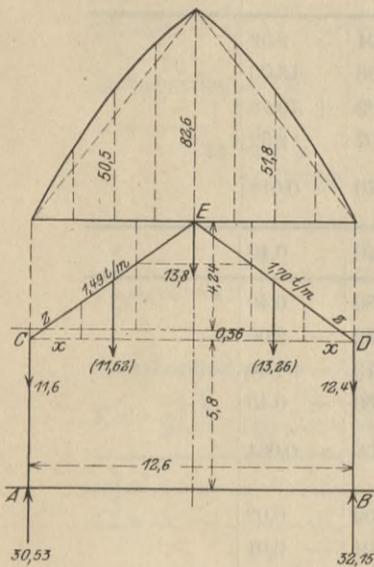


Abb. 22.

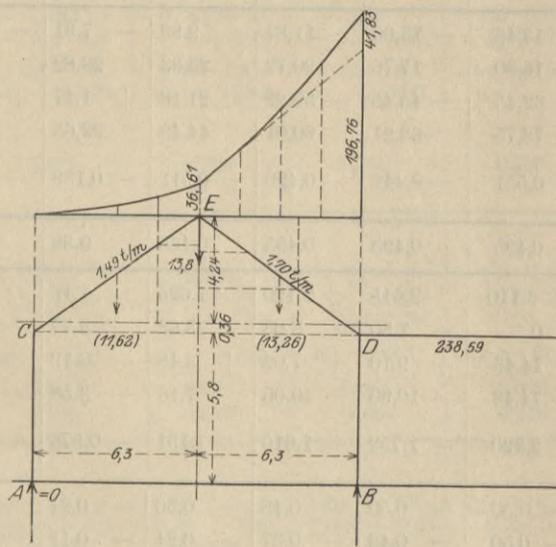


Abb. 23.

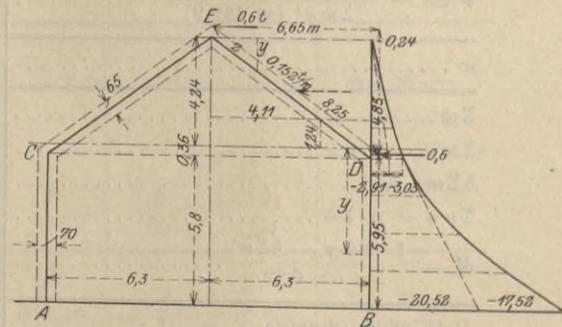


Abb. 24.

Die Schwerpunkte der Momentenflächen ergeben sich für CE aus $x_s = \frac{6,3}{4} = 1,58 \text{ m}$, $y_s = 3,09 \text{ m}$, und für das gestrichelte Trapez über DE aus $\frac{6,3}{3} \cdot \frac{36,61 + 2 \cdot 196,76}{36,61 + 196,76} = 3,87 \text{ m}$ somit für die ganze Fläche aus

$$x_s = \left\{ 3,87 \left(\frac{233,5}{2} \cdot 6,3 \right) + \left(41,83 \cdot \frac{6,3}{3} \right) \cdot 6,3 \cdot \frac{3}{4} \right\} : (735,5 + 87,8) = \frac{3261,2}{823,3} = 3,96 \text{ m}, y_s = 1,41 \text{ m},$$

und für BD in der Mitte der Momentenfläche aus $x_s = -6,30$, $y_s = -3,26$.

Die zugehörigen Momentenflächen sind $F_0 = -36,61 \cdot \frac{6,3}{3} = -76,9$, $F_0 = -823,3$ und $F_0 = -238,59 \cdot 5,8 = -1383,8$.

Die Berechnung ist daher bei vertikalen Kräften im ersten Fall wesentlich einfacher, während sie bei horizontalen Kräften im zweiten Fall einfacher wird.

Man erhält alsdann die in Abb. 24 gezeichnete Momentenfläche für den Winddruck aus

$$M_y = -0,6 \cdot y - 0,152 z \cdot y, \text{ und für } z = \frac{7,8}{4,6} y = 1,70 y \text{ wird}$$

$$M_y = -y(0,6 + 0,129 y), \text{ und für } y = 4,85 \text{ m}$$

$$M_y = -2,91 - 3,03 = -5,94 \text{ mt}.$$

Für BD erhält man $M_y = -5,94 - (1,2 + 0,152 \cdot 8,25) y - 0,99 \frac{y^2}{2} = -5,94 - 2,45 y - 0,495 y^2$ oder für $y = 5,95 \text{ m}$ bei B : $M_y = -20,52 - 17,52 = -38,04 \text{ mt}$.

Die Schwerpunkte dieser Momentenflächen ergeben sich für das obere Dreieck aus $\frac{4,85}{3} = 1,62$ m und für das untere Trapez aus $\frac{5,95}{3} \cdot \frac{2 \cdot 5,94 + 20,52}{5,94 + 20,52} = 2,43$ m und für die Parabelflächen aus $\frac{4,85}{4} = 1,21$ m und $\frac{5,95}{4} = 1,49$ m, so daß man für die Gesamtflächen erhält über

$$DE - : \left\{ \left(\frac{2,91}{2} \cdot 4,85 \right) 1,62 + \left(\frac{3,03 \cdot 4,85}{3} \right) 1,21 \right\} : (7,06 + 4,90) = \frac{17,37}{11,96} = 1,45 \text{ m}, y_s = 1,24 \text{ m}, x_s = -4,11 \text{ m},$$

$$BD - : \left\{ \left(\frac{26,46}{2} \cdot 5,95 \right) 2,43 + \left(\frac{17,52 \cdot 5,95}{3} \right) 1,49 \right\} : (78,72 + 34,75) = \frac{243,07}{113,47} = 2,14 \text{ m}, y_s = -4,02 \text{ m}, x_s = -6,30 \text{ m},$$

und die zugehörigen Momentenflächen $F_0 = -11,96$ und $= -113,47$ sind.

Man erhält nun nach S. 12 die Gleichungen:

$$X = \frac{\mathfrak{E}_x}{T_x}, Y = \frac{\mathfrak{E}_y}{T_y}, Z = -\frac{\Sigma F'_0}{G} \text{ mit } \mathfrak{E}_x = \Sigma F'_0 \cdot y_s \text{ und } \mathfrak{E}_y = \Sigma F'_0 \cdot x_s \left(F'_0 \text{ ist } = \frac{F_0}{J} \right).$$

Der Koordinatenursprung 0 ergibt sich (in Beziehung auf den Scheitel) aus (s. Abb. 19):

$$z_0 = \frac{\Sigma w \cdot y_1}{\Sigma w} = \left\{ \frac{7,8}{4} \cdot 2,3 + \frac{5,8}{5} (4,6 + 2,9) \right\} : \left(\frac{5,8}{5} + \frac{7,8}{4} \right) = \frac{13,18}{3,11} = 4,24 \text{ m}, \text{ somit } G = \Sigma w = 2 \cdot 3,11 = 6,22.$$

$$\text{Ferner ist } T_x = \int y^2 \frac{ds}{J} = \left\{ \left(\frac{7,8}{4} \cdot \frac{4,6^2}{3} + \frac{5,8}{5} \cdot \frac{5,8^2}{3} \right) - 0,36^2 \cdot 3,11 \right\} \cdot 2 = 52,7 \text{ und}$$

$$T_y = \int x^2 \frac{ds}{J} = \left(\frac{7,8}{4} \cdot \frac{6,3^2}{3} + \frac{5,8}{5} \cdot 6,3^2 \right) \cdot 2 = 143,7.$$

Man erhält daher im ersten Fall für die vertikalen Kräfte $\left(\frac{7,8}{6,3} = 1,24 \text{ entspricht } \frac{1}{\cos \alpha} \right)$:

$$X = \left\{ \left(\frac{298,8}{4} \cdot 2,60 + \frac{304,3}{4} \cdot 2,60 \right) 1,24 \right\} : 52,7 = 4,57 + 4,65 = +9,22 \text{ t (mit Rechenstab),}$$

$$Y = \left\{ \left(\frac{298,8}{4} \cdot 2,24 - \frac{304,3}{4} \cdot 2,25 \right) 1,24 \right\} : 143,7 = 1,44 - 1,48 = -0,04 \text{ t},$$

$$Z = - \left\{ \left(\frac{298,8}{4} + \frac{304,3}{4} \right) 1,24 \right\} : 6,22 = -30,06 \text{ mt (bei } Z \text{ gilt immer das entgegengesetzte Vorzeichen von } \Sigma F'_0),$$

und ebenso im zweiten Fall:

$$X = \left\{ \left(-\frac{76,9}{4} \cdot 3,09 - \frac{823,3}{4} \cdot 1,41 \right) 1,24 + \frac{1383,8}{5} \cdot 3,26 \right\} : 52,7 = -1,40 - 6,83 + 17,13 = +8,90 \text{ t},$$

$$Y = \left\{ \left(-\frac{76,9}{4} \cdot 1,58 + \frac{823,3}{4} \cdot 3,96 \right) 1,24 + \frac{1383,8}{5} \cdot 6,3 \right\} : 143,7 = -0,26 + 6,87 + 12,14 = +18,75 \text{ t},$$

$$Z = - \left\{ \left(-\frac{76,9}{4} - \frac{823,3}{4} \right) 1,24 - \frac{1383,8}{5} \right\} : 6,22 = +89,37 \text{ mt},$$

und für die horizontalen Kräfte $\left(\frac{7,8}{4,6} = 1,70 \text{ entspricht } \frac{1}{\sin \alpha} \right)$:

$$X = \left\{ \left(-\frac{11,96}{4} \cdot 1,24 \right) 1,70 + \frac{113,47}{5} \cdot 4,02 \right\} : 52,7 = -0,12 + 1,73 = +1,61 \text{ t},$$

$$Y = \left\{ \left(\frac{11,96}{4} \cdot 4,11 \right) 1,70 + \frac{113,47}{5} \cdot 6,3 \right\} : 143,7 = 0,15 + 1,00 = +1,15 \text{ t},$$

$$Z = - \left\{ \left(-\frac{11,96}{4} \right) 1,70 - \frac{113,47}{5} \right\} : 6,22 = +4,46 \text{ mt}.$$

4. Vergleichende Berechnung der Momente des eingespannten Rahmens.

Die Vergleichung der drei Berechnungsweisen für die vertikalen Kräfte ergibt nun

1. nach dem Verfahren von Mörsch (s. S. 18):

$$H = 4,33 + 2,55 + 2,24 = 9,12 \text{ t}, V = 6,9 + 3,06 + 8,96 = 18,92 \text{ t}, M = 29,86 + 12,34 + 47,48 = 89,68 \text{ mt},$$

2. nach dem Verfahren von Müller-Breslau mit beweglichem Auflager bei A (s. S. 21):

$$H = 9,22 \text{ t}, V = 18,93 - 0,04 = 18,89 \text{ t}, M = 18,93 \cdot 6,3 - 30,06 = 89,20 \text{ mt} \quad (18,93 \text{ ist } = 30,53 - 11,6),$$

3. nach demselben mit frei beweglichem Ende bei A (s. S. 21):

$$H = 8,90 \text{ t}, V = 18,75 \text{ t}, M = 89,37 \text{ mt}.$$

Die Vergleichung der zwei Berechnungsweisen für die horizontalen Kräfte ergibt

1. nach dem Verfahren von Mörsch (s. S. 19.):

$$H = 1,66 \text{ t}, V = 1,23 \text{ t}, M = 4,76 \text{ mt};$$

2. nach dem Verfahren von Müller-Breslau mit frei beweglichem Ende:

$$H = 1,61 \text{ t}, V = 1,15 \text{ t}, M = 4,46 \text{ mt}.$$

Für diese im Koordinatenursprung 0 aufzutragenden Kräfte H und V erhält man aus $x_r = \frac{M}{V}$, $y_r = \frac{M}{H}$, $r = \frac{M}{R}$ (aus $R = \sqrt{H^2 + V^2}$) die Kämpferdrücke bei A , und durch ihre Zusammensetzung mit den einzelnen Belastungen die Stützlinien.

Mit den Formeln von Mörsch und Weyrauch können jedoch auch ohne Aufzeichnung derselben sämtliche Fugen berechnet werden, und zwar aus $M = M_0 + M - H \cdot y - V \cdot x$ (worin y und x positiv oder negativ einzusetzen sind).

Man erhält daher nach der zweiten Berechnungsart für vertikale Lasten mit $M = -30,06 \text{ mt}$, $H = 9,22 \text{ t}$, $V = -0,04 \text{ t}$ (wenn für M_0 der aus der positiven Momentenfläche erhaltene Wert genommen wird) an den Eckpunkten des Rahmens:

$$M_a = -30,06 + 9,22 \cdot 6,16 + 0,04 \cdot 6,3 = +26,99, \quad M_c = -30,06 + 9,22 \cdot 0,36 + 0,04 \cdot 6,3 = -26,49,$$

$$M_e = -30,06 + 82,6 - 9,22 \cdot 4,24 = +13,45, \quad M_d = -30,06 + 9,22 \cdot 0,36 - 0,04 \cdot 6,3 = -26,99,$$

$$M_b = -30,06 + 9,22 \cdot 6,16 - 0,04 \cdot 6,3 = +26,48 \text{ mt}.$$

Die dritte Berechnungsart für vertikale Lasten mit $M = 89,37 \text{ mt}$, $H = 8,9 \text{ t}$, $V = 18,75 \text{ t}$, ergibt dieselben Momente wie die erste und zweite (wenn der aus der negativen Momentenfläche erhaltene Wert für M_0 eingesetzt wird), und man erhält:

$$M_a = 89,37 + 8,9 \cdot 6,16 - 18,75 \cdot 6,3 = +26,07, \quad M_c = 89,37 + 8,9 \cdot 0,36 - 18,75 \cdot 6,3 = -25,55,$$

$$M_e = 89,37 - 36,61 - 8,9 \cdot 4,24 = +15,03, \quad M_d = 89,37 - 238,09 + 8,9 \cdot 0,36 + 18,75 \cdot 6,3 = -27,32,$$

$$M_b = 89,37 - 238,09 + 8,9 \cdot 6,16 + 18,75 \cdot 6,3 = +24,23 \text{ mt}.$$

Ebenso erhält man nach beiden Berechnungsarten für horizontale Kräfte mit $H = 1,61 \text{ t}$, $V = 1,15 \text{ t}$, $M = 4,46 \text{ mt}$:

$$M_a = 4,46 + 1,61 \cdot 6,16 - 1,15 \cdot 6,3 = +7,13, \quad M_c = 4,46 + 1,61 \cdot 0,36 - 1,15 \cdot 6,3 = -2,21,$$

$$M_e = 4,46 - 0,24 - 1,61 \cdot 4,24 = -2,61, \quad M_d = 4,46 - 5,94 + 1,61 \cdot 0,36 + 1,15 \cdot 6,3 = +6,35,$$

$$M_b = 4,46 - 38,04 + 1,61 \cdot 6,16 + 1,15 \cdot 6,3 = -16,42 \text{ mt}.$$

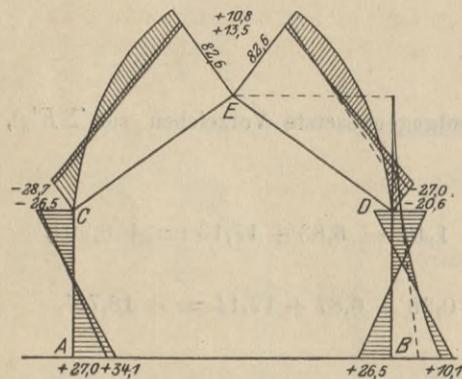


Abb. 25.

In diesen Momenten sind die Vertikalkräfte für einseitigen vollen Winddruck und für halbe Schneelast berücksichtigt worden, was bei Annahme der vollen Schneebelastung ohne Winddruck ungefähr ebenso große Werte ergeben würde (die halbe Schneelast und der auf die ganze Dachfläche verteilte vertikale Winddruck ist $= \frac{0,61}{2} + \frac{0,78}{2} = 70 \text{ kg/qm}$ Dachfläche, also angenähert = der ganzen Schneelast $= 61 \text{ kg/qm}$), wenn sie ohne die Momente für den horizontalen Winddruck gerechnet werden.

Man erhält alsdann die nebengezeichneten Momentenflächen für

$$M_a = 26,99 + 7,13 = +34,12 \text{ mt, bzw. } = +26,99 \text{ mt},$$

$$M_c = -26,49 - 2,21 = -28,70 \text{ mt, bzw. } = -26,49 \text{ mt},$$

$$M_e = 13,45 - 2,61 = +10,84 \text{ mt, bzw. } = +13,45 \text{ mt},$$

$$M_d = -26,99 + 6,35 = -20,64 \text{ mt, bzw. } = -26,99 \text{ mt},$$

$$M_b = 26,48 - 16,42 = +10,06 \text{ mt, bzw. } = +26,48 \text{ mt}.$$

5. Berechnung des eingespannten Rahmens mit einer Mittelsäule.

Da die Momente sehr groß sind, so soll eine Mittelsäule angewendet werden, welche die vertikale Belastung des mittleren Teiles aufnimmt, und zwar die Einzellast von $13,8 \text{ t}$ sowie von den benachbarten Dachflächen links $5,81 \text{ t}$ und rechts $6,63 \text{ t}$. Bei einer Höhe von $9,6 \text{ m}$ mit $\frac{3}{4}$ Knicklänge erhält man ohne Berücksichtigung der Eiseneinlagen

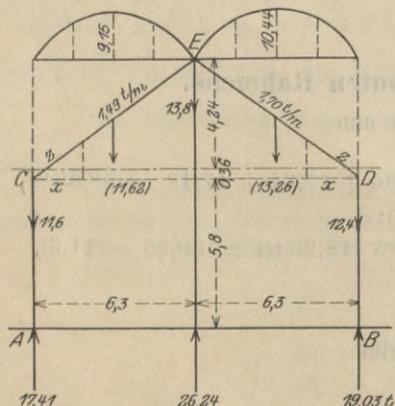


Abb. 26.

$$\text{als Knickungskoeffizient } k = 1 + 0,0001 \cdot \frac{F \cdot l^2}{J} = 1 + 0,0001 \frac{40^2 \cdot 720^2 \cdot 12}{40^4}$$

$$= 1,39 \text{ und als Maximalspannung } \sigma = \frac{26240}{40 \cdot 40} \cdot 1,39 = 22,8 \text{ kg, so daß } 40/40 \text{ cm}$$

jedenfalls genügen.

Die diskontinuierliche Berechnung ergibt genauere Werte als die kontinuierliche (schon wegen der steifen Ecken), und man erhält als Auflagerdrücke

$$A = 11,6 + 5,81 = 17,41 \text{ t}, \quad B = 12,4 + 6,63 = 19,03 \text{ t}.$$

Die nebengezeichneten Momentenflächen ergeben sich für CE aus

$$M_x = (17,41 - 11,6) x - 1,49 \cdot \frac{z \cdot x}{2} = x (5,81 - 0,924 x) \text{ für } z = 1,24 x$$

oder für C und E : $M_x = 0$, für die Mitte $M_x = 9,15 \text{ mt}$, im ersten und dritten Viertel $M_x = 6,86 \text{ mt}$.

Ebenso erhält man für DE :

$$M_x = (19,03 - 12,4) \cdot x - 1,7 \cdot \frac{z \cdot x}{2} = x (6,63 - 1,054 x) \text{ oder für } D \text{ und } E:$$

$$M_x = 0, \text{ für die Mitte } M_x = 10,44 \text{ mt, im ersten und dritten Viertel } M_x = 7,83 \text{ mt}.$$

Die Momentenflächen sind daher parabolisch mit $F_0 = 7,8 \cdot 9,15 \cdot \frac{2}{3} = 47,58$ und $F_0 = 7,8 \cdot 10,44 \cdot \frac{2}{3} = 54,29$ und die Schwerpunkte liegen in der Mitte derselben, so daß man erhält:

$$X = \left(\frac{47,58 \cdot 1,94}{4} + \frac{54,29 \cdot 1,94}{4} \right) : 52,7 = 0,94 \text{ t,}$$

$$Y = \left(\frac{47,58}{4} \cdot 3,15 - \frac{54,29}{4} \cdot 3,15 \right) : 143,7 = -0,02 \text{ t, } Z = - \left(\frac{47,58}{4} + \frac{54,29}{4} \right) : 6,22 = -4,09 \text{ mt.}$$

Man erhält daher bei Einsetzung von $M = -4,09$, $H = 0,94$, $V = -0,02$ in obige Gleichung:

$$M_a = -4,09 + 0,94 \cdot 6,16 + 0,02 \cdot 6,3 = +1,83,$$

$$M_c = -4,09 + 0,94 \cdot 0,36 - 0,02 \cdot 6,3 = -3,63,$$

$$M_e = -4,09 - 0,94 \cdot 4,24 = -8,08,$$

$$M_d = -4,09 + 0,94 \cdot 0,36 - 0,02 \cdot 6,3 = -3,88,$$

$$M_b = -4,09 + 0,94 \cdot 6,16 - 0,02 \cdot 6,3 = +1,58 \text{ mt.}$$

Durch Vereinigung dieser Momente mit denjenigen vom Winddruck s. S. 22 (die Mittelsäule hat keinen Einfluß auf die letzteren) erhält man die nebengezeichneten Momentenflächen für:

$$M_a = +1,83 + 7,13 = +8,96 \text{ mt, bzw. } = +1,83 \text{ mt,}$$

$$M_c = -3,63 - 2,21 = -5,84 \text{ mt, bzw. } = -3,63 \text{ mt, } M_e = -8,08 - 2,61 = -10,69 \text{ mt, bzw. } = -8,08 \text{ mt,}$$

$$M_d = -3,88 + 6,35 = +2,47 \text{ mt, bzw. } = -3,88 \text{ mt, } M_b = 1,58 - 16,42 = -14,84 \text{ mt, bzw. } = +1,58 \text{ mt.}$$

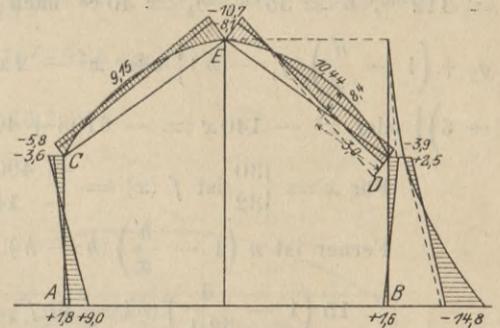


Abb. 27.

6. Berechnung des Zweigelenrahmens ohne und mit Mittelsäule.

Zur Vervollständigung der Vergleichung sollen noch die beiden obigen Rahmen mit Gelenken bei A und B berechnet werden, und ändern sich hierbei die Momentenflächen nicht, aber die x -achse geht jetzt durch die Gelenke, so daß man statt $T_x = 52,7$ nun $T'_x = 52,7 + 6,16^2 \cdot 6,22 = 288,7$ erhält, und bei Einsetzung von $y'_s = y_s + 6,16$ die Summenausdrücke auf S. 21 und 23 folgendermaßen heißen:

$$X = \left\{ \left(\frac{298,8}{4} (2,60 + 6,16) + \frac{304,3}{4} (2,60 + 6,16) \right) 1,24 \right\} : 288,7 = 2,26 + 2,31 = 4,57 \text{ t (ohne Mittelsäule),}$$

$$X = \left\{ \frac{47,58}{4} (1,94 + 6,16) + \frac{54,29}{4} (1,94 + 6,16) \right\} : 288,7 = 0,32 + 0,38 = 0,70 \text{ t (mit Mittelsäule).}$$

Für den horizontalen Winddruck erhält man als Gegendruck $V = \frac{38,04}{12,6} = \pm 3,02 \text{ t}$ und (s. S. 21)

$$X = \left\{ -\frac{11,96}{4} \cdot 1,70 (1,24 + 6,16) - \frac{113,47}{5} (-4,02 + 6,16) \right\} : 288,7 = -0,13 - 0,17 = -0,30 \text{ t.}$$

Der Summenausdruck für V entspricht der Formel:

$$H = \frac{V \cdot G \cdot z_u \cdot l}{2 T_x} = \frac{3,02 \cdot 6,22 \cdot 6,16 \cdot 12,6}{2 \cdot 288,7} = 2,52 \text{ t, so daß } H = 2,52 - 0,30 = +2,22 \text{ t wird.}$$

Die Momente an den Ecken sind nun im ersten Fall (ohne Mittelsäule):

$M_a = 0$, $M_c = -4,57 \cdot 5,8 = -26,51 \text{ mt}$, $M_e = -4,57 \cdot 10,4 + 82,6 = +35,07 \text{ mt}$, $M_d = -26,51 \text{ mt}$, $M_b = 0$ und im zweiten Fall (mit Mittelsäule):

$$M_a = 0, M_c = -0,7 \cdot 5,8 = -4,06 \text{ mt, } M_e = -0,7 \cdot 10,4 = -7,28 \text{ mt, } M_d = -4,06 \text{ mt, } M_b = 0$$

und für den horizontalen Winddruck (in beiden Fällen):

$$M_a = 0, M_c = -2,22 \cdot 5,8 = -12,88 \text{ t,}$$

$$M_e = -2,22 \cdot 10,4 + 3,02 \cdot 6,3 = -4,06 \text{ mt,}$$

$$M_d = -2,22 \cdot 5,8 + 3,02 \cdot 12,6 - 5,94 = +19,23 \text{ mt,}$$

$$M_b = 3,02 \cdot 12,6 - 38,04 = 0.$$

Die Maximalmomente sind daher im ersten Fall:

$$M_c = -26,51 - 12,88 = -39,39 \text{ mt, bzw. } -26,51 \text{ mt,}$$

$$M_e = 35,07 - 4,06 = +31,01 \text{ mt, bzw. } +35,07 \text{ mt,}$$

$$M_d = -26,51 + 19,23 = -7,28 \text{ mt, bzw. } -26,51 \text{ mt}$$

(dieselben entsprechen den äußeren Zahlen in Abb. 28).

Ebenso erhält man im zweiten Fall:

$$M_c = -4,06 - 12,88 = -16,94 \text{ mt, bzw. } -4,06 \text{ mt, } M_e = -7,28 - 4,06 = -11,34 \text{ mt, bzw. } -7,28 \text{ mt,}$$

$$M_d = -4,06 + 19,23 = +15,17 \text{ mt, bzw. } -4,06 \text{ mt (und gelten hierfür die inneren Zahlen).}$$

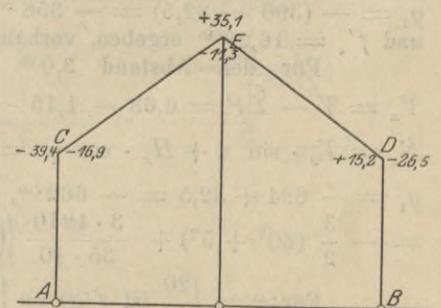


Abb. 28.

7. Berechnung der Eiseneinlagen nach den von mir entwickelten Formeln.

Der eingespannte Rahmen mit Mittelsäule ergibt daher die kleinsten Momente an den Ecken, und hierfür soll der Rahmen dimensioniert werden. Aus den in Abb. 27 gezeichneten Momentenflächen erhält man als Maximalbiegungsmoment bei $B = 14,84 \text{ mt}$, ferner nach Abb. 26: $N_x = 19,03 - 1,15$ (v. Winddruck s. S. 21) $= 17,88 \text{ t}$ $c = \frac{M_x}{N_x} =$

$$= \frac{-14,84}{17,88} = -0,83 \text{ m (s. S. 15) und für } h = 64 \text{ cm, } h' = 6 \text{ cm, } g_1 = -83 + 35 = -48 \text{ cm, } g_2 = 48 + 64 = 112 \text{ cm, } b = 35 \text{ cm, } \sigma_b = 40 \text{ kg}$$

nach B 2 c für $p = 1: x^2 - 2x(h+h') = -\frac{3}{2}(h^2+h'^2) + \frac{3P}{b \cdot \sigma_b} \left\{ \left(\frac{h}{x} - 1 \right) g_2 + \left(1 - \frac{h'}{x} \right) (g_1 - h') \right\}$ oder $x^2 - 2x \cdot 70 = -\frac{3}{2}(64^2+6^2) + \frac{3 \cdot 17880}{35 \cdot 40} \left\{ \left(\frac{64}{x} - 1 \right) 112 + \left(1 - \frac{6}{x} \right) (-48 - 6) \right\}$ oder $x^2 - 140x = -6198 + 40,46 \left(\frac{7492}{x} - 166 \right)$ oder $x^2 - 140x + 12914 - \frac{303 \cdot 126}{x} = 0$.

Für $x = \begin{cases} 30 \\ 32 \end{cases}$ ist $f(x) = \begin{cases} -490 \\ -14 \end{cases}$, somit genaues $x = 32 + \frac{2 \cdot 14}{476} = \text{rund } 32,1 \text{ cm}$ und hierfür ist $f(x) = +7$.

Ferner ist $n \left(1 - \frac{h'}{x} \right) (h - h') f'_e = \frac{P \cdot g_2}{\sigma_b} - \frac{bx}{6} (3h - x)$ oder

$$15 \left(1 - \frac{6}{32,1} \right) (64 - 6) f'_e = \frac{17880 \cdot 112}{40} - \frac{35 \cdot 32,1}{6} (3 \cdot 64 - 32,1) \text{ oder } f'_e = 28,4 \text{ qcm,}$$

vorhanden sind 5 $\textcircled{D} 28 = 30,8 \text{ qcm}$ (s. Abb. 18).

Bei C erhält man als Maximalbiegungsmoment $M_x = -5,84 \text{ mt}$, ferner ist $N_x = V_x \sin \varphi + H_x \cos \varphi$, wo $\sin \varphi = \frac{4,6}{7,8} = 0,590$, $\varphi = 36^\circ 8'$, $\cos \varphi = 0,808$. Für vertikale Belastung ist $V_x = 5,81 - 0,02 = 5,79 \text{ t}$, $H_x = 0,94 \text{ t}$ (s. S. 23) und für horizontale Belastung $V_x = 1,15 \text{ t}$, $H_x = 1,61 \text{ t}$ (s. S. 21) somit zusammen $V_x = 6,94 \text{ t}$, $H_x = 2,55 \text{ t}$ und hierfür $N_x = 6,94 \cdot 0,59 + 2,55 \cdot 0,808 = 6,16 \text{ t}$, $c = \frac{M_x}{N_x} = -\frac{5,84}{6,16} = -0,95 \text{ m}$ (nach innen), $g_1 = -95 + 32,5 = -62 \text{ cm}$, $g_2 = 62 + 60 = 122 \text{ cm}$, $h = 60 \text{ cm}$, $h' = 5 \text{ cm}$, $b = 35 \text{ cm}$, somit (s. oben) $x^2 - 2x \cdot 65 = -\frac{3}{2}(60^2+5^2) + \frac{3 \cdot 6160}{35 \cdot 40} \left\{ \left(\frac{60}{x} - 1 \right) 122 + \left(1 - \frac{5}{x} \right) (-62 - 5) \right\}$ oder $x^2 - 130x = -5438 + 13,2 \left(\frac{7655}{x} - 189 \right)$ oder $x^2 - 130x + 7933 - \frac{101046}{x} = 0$.

Für $x = \begin{cases} 18 \\ 17 \end{cases}$ ist $f(x) = \begin{cases} +303 \\ +68 \end{cases}$, und genaues $x = 17 - \frac{1 \cdot 68}{235} = 16,7 \text{ cm}$ und hierfür ist $f(x) = -10$.

Ferner ist (s. oben) $15 \left(1 - \frac{5}{16,7} \right) (60 - 5) f'_e = \frac{6160}{40} \cdot 122 - \frac{35 \cdot 16,7}{6} (3 \cdot 60 - 16,7)$ oder $f'_e = 5,0 \text{ qcm}$,

vorhanden sind oben und unten 2 $\textcircled{D} 28 = 12,3 \text{ qcm}$.

Im Scheitel ist $M_x = -10,69 \text{ mt}$, $\sin \varphi = 0$, $\cos \varphi = 1$, $N_x = H_x = 0,94 + 1,61 = 2,55 \text{ t}$ (s. S. 21 u. 23), $c = \frac{M_x}{N_x} = -\frac{10,69}{2,55} = -4,19 \text{ m}$ (nach innen), $g_1 = -(419 - 40) = -379 \text{ cm}$, $g_2 = 379 + 74 = 453 \text{ cm}$, $h = 74 \text{ cm}$, $h' = 6 \text{ cm}$, $b = 35 \text{ cm}$, somit $x^2 - 2x \cdot 80 = -\frac{3}{2}(74^2+6^2) + \frac{3 \cdot 2550}{35 \cdot 40} \left\{ \left(\frac{74}{x} - 1 \right) 453 + \left(1 - \frac{6}{x} \right) (-379 - 6) \right\}$ oder $x^2 - 160x + 12842 - \frac{194039}{x} = 0$. Für $x = \begin{cases} 20 \\ 18 \end{cases}$ ist $f(x) = \begin{cases} +340 \\ -494 \end{cases}$ und genaues $x = 20 - \frac{340 \cdot 2}{834} = 19,2$ mit $f(x) = +23$. Ferner ist $15 \left(1 - \frac{6}{19,2} \right) (74 - 6) f'_e = \frac{2550}{40} \cdot 453 - \frac{35 \cdot 19,2}{6} (3 \cdot 74 - 19,2)$ oder $f'_e = 8,8 \text{ qcm}$.

Der benachbarte Querschnitt mit $V_x = 1,15 \text{ t}$, $N_x = 1,15 \cdot 0,59 + 2,55 \cdot 0,808 = 2,74 \text{ t}$, $c = -\frac{10,69}{2,74} = -3,90 \text{ m}$, $g_1 = -(390 - 32,5) = -358 \text{ cm}$, $g_2 = 358 + 60 = 418 \text{ cm}$, $h = 60 \text{ cm}$, $h' = 5 \text{ cm}$, $b = 35 \text{ cm}$ hätte $x = 20,2 \text{ cm}$ und $f'_e = 16,9 \text{ qcm}$ ergeben, vorhanden sind oben 5 $\textcircled{D} 28 = 30,8$ und unten 4 $\textcircled{D} 28 = 24,6 \text{ qcm}$.

Für den Abstand $3,0 \text{ m}$ von D erhält man das positive $M_{max} = 8,4 \text{ mt}$. Ferner ist (vgl. Abb. 26) $V_x = V - \sum P = 6,63 - 1,15 - 3,0 \cdot 1,7 = 0,38 \text{ t}$, $H_x = H - \sum H = 0,94 + 1,61 - 0,6 - 4,8 \cdot 0,152 = 1,22 \text{ t}$, $N_x = V_x \cdot \sin \varphi + H_x \cdot \cos \varphi = 0,38 \cdot 0,59 + 1,22 \cdot 0,808 = 1,21 \text{ t}$, $c = \frac{M_x}{N_x} = \frac{8,4}{1,21} = +6,94 \text{ m}$ (nach außen), $g_1 = -694 + 32,5 = -662 \text{ cm}$, $g_2 = 662 + 60 = 722 \text{ cm}$, $h = 60 \text{ cm}$, $h' = 5 \text{ cm}$, $b = 35 \text{ cm}$, somit $x^2 - 2x \cdot 65 = -\frac{3}{2}(60^2+5^2) + \frac{3 \cdot 1210}{35 \cdot 40} \left\{ \left(\frac{60}{x} - 1 \right) 722 + \left(1 - \frac{5}{x} \right) (-662 - 5) \right\}$ oder $x^2 - 130x + 9040 - \frac{120976}{x} = 0$.

Für $x = \begin{cases} 20 \\ 18 \end{cases}$ ist $f(x) = \begin{cases} +791 \\ +303 \end{cases}$ und genaues $x = 18 - \frac{303 \cdot 2}{488} = 17 \text{ cm}$ und hierfür ist $f(x) = +3$.

Ferner ist $15 \left(1 - \frac{5}{17} \right) (60 - 5) f'_e = \frac{1210 \cdot 722}{40} - \frac{35 \cdot 17}{6} (3 \cdot 60 - 17)$ oder $f'_e = 9,8 \text{ qcm}$, vorhanden sind oben und unten 2 $\textcircled{D} 28 = 12,3 \text{ qcm}$.

Die Schubspannungen können aus $T_x = V_x \cdot \cos \varphi - H_x \cdot \sin \varphi$ berechnet werden, und genügt eine Abbiegung zur Aufnahme derselben.

II. Berechnung des eingespannten Rahmens für einen Güterschuppen.

1. Getrennte Berechnung für das Eigengewicht, die Schneebelastung und den Winddruck.

Für den nebengezeichneten Rahmen soll eine getrennte Berechnung des Eigengewichts, der Schneebelastung und des Winddrucks stattfinden.

Bei Annahme des Verhältnisses für $J = 1:1$ (was sowohl für Eisen als auch für Eisenbeton gelten kann) erhält man $z = \frac{\sum w y'}{\sum w} = \left\{ 5,8 (3 + 2,9) + 9,96 \cdot 1,5 \right\} : (5,8 + 9,96) = \frac{49,16}{15,76} = 3,12 \text{ m}$, $G \text{ ist} = 2 \cdot 15,76 = 31,5$,

$$T_x = \int \frac{y^2 ds}{J} = \left(9,96 \cdot \frac{3^2}{3} + 5,8 \cdot \frac{5,8^2}{3} \right) \cdot 2 - 0,12^2 \cdot 31,5 = 189,4,$$

$$T_y = \int \frac{x^2 ds}{J} = \left(9,96 \cdot \frac{9,5^2}{3} + 5,8 \cdot 9,5^2 \right) \cdot 2 = 1646,2.$$

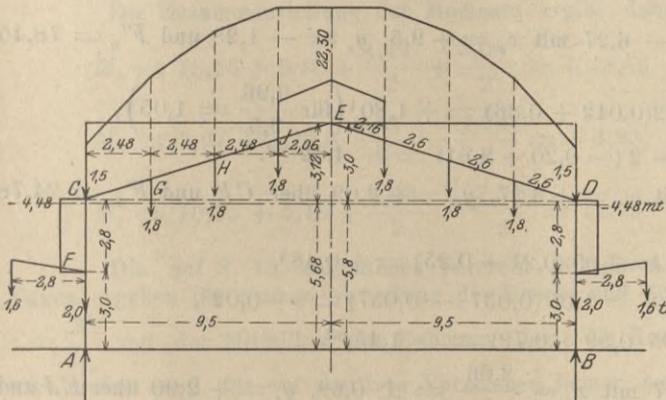


Abb. 29.

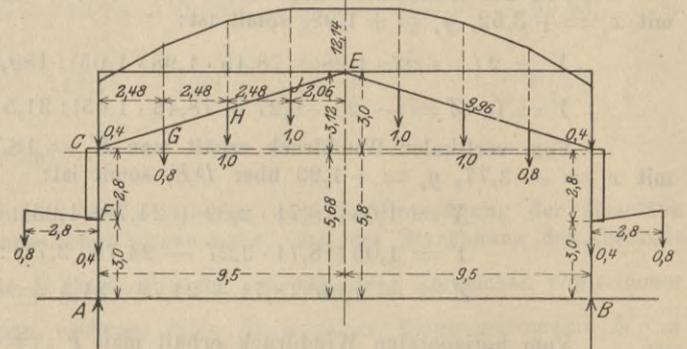


Abb. 30.

Die Momentenfläche ergibt sich für vertikale Belastung durch das Eigengewicht aus dem Auflagerdruck $A = B = 3 \cdot 1,8 + 1,5 + 2,0 + 1,6 = 10,5 \text{ t}$, somit ist

$$M_f = -1,6 \cdot 2,8 = -4,48, \quad M_g = (10,5 - 3,5) 2,48 - 1,6 \cdot 5,28 = 8,91, \quad M_h = 8,91 + (7 - 3,4) \cdot 2,48 = 17,84,$$

$$M_i = 17,84 + (7 - 5,2) \cdot 2,48 = 22,30, \quad M_e = 22,30 \text{ mt}$$

(auf der anderen Seite erhält man dieselben Momente).

Für die vertikale Schneebelastung erhält man: $A = B = 3 \cdot 0,8 + 2 \cdot 1 = 4,4 \text{ t}$, und hierfür ist

$$M_f = -0,8 \cdot 2,8 = -2,24, \quad M_g = (4,4 - 0,8) 2,48 - 0,8 \cdot 5,28 = 4,70,$$

$$M_h = 4,7 + (3,6 - 1,6) \cdot 2,48 = 9,66, \quad M_i = 9,66 + (3,6 - 2,6) 2,48 = 12,14 \text{ mt}.$$

Für vertikale Windbelastung von rechts her erhält man

$$A = (0,38 (2,48 + 4,96) + 0,16 \cdot 7,44 + 0,36 \cdot 11,56) : 19 = 0,43 \text{ t}, \quad B = 1,47 - 0,43 = 1,04 \text{ t} \text{ und die Momente sind:}$$

$$M_m = (1,04 - 0,19) 2,48 = 2,11, \quad M_l = 2,11 + (0,85 - 0,38) 2,48 = 3,28,$$

$$M_k = 3,28 + (0,47 - 0,38) 2,48 = 3,50, \quad M_e = 3,5 + (0,09 - 0,16) 2,06 = 3,36,$$

$$M_i = 3,36 - 0,07 \cdot 2,06 = 3,22 \text{ mt}.$$

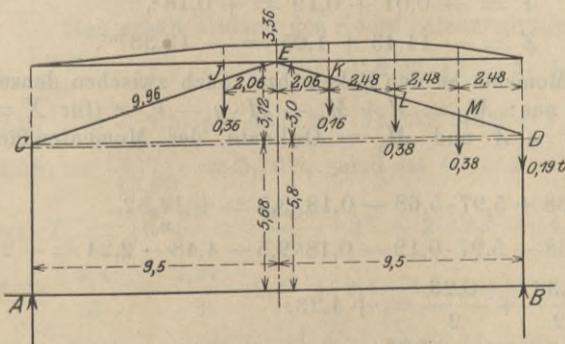


Abb. 31.

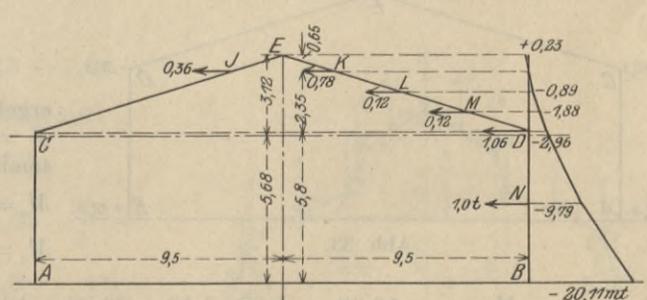


Abb. 32.

Für den horizontalen Winddruck von rechts erhält man:

$$M_e = 0,36 \cdot 0,65 = +0,23, \quad M_k = 0, \quad M_l = -1,14 \cdot \frac{2,35}{3} = -0,89,$$

$$M_m = -0,89 - (1,14 + 0,12) \frac{2,35}{3} = -1,88, \quad M_n = -1,88 - (1,26 + 0,12) \frac{2,35}{3} = -2,96,$$

$$M_o = -2,96 - (1,38 + 1,06) 2,8 = -9,79, \quad M_b = -9,79 - (2,44 + 1) 3 = -20,11 \text{ mt}.$$

Für diese Momentenflächen sind nun die Inhalte der einzelnen Trapeze mit ihren Schwerpunkten zu bestimmen, um sie dann in die Summenausdrücke $X = \frac{\Sigma F'_0 \cdot y_s}{T_x}$, $Y = \frac{\Sigma F'_0 \cdot x_s}{T_y}$, $Z = -\frac{\Sigma F'_0}{G}$ einzusetzen.

Die Schwerpunkte der Trapeze ergeben sich aus $e = \frac{h}{3} \cdot \frac{a+2b}{a+b}$, und diejenigen der Gesamflächen über den einzelnen Stäben aus $E = \frac{\Sigma f'_0 (e+e')}{F'_0}$, wenn e' dem Abstand der Trapeze vom Endpunkt des Stabs entspricht, und man erhält vom Eigengewicht für $AC: F'_0 = -4,48 \cdot 2,8 = -12,54$ mit $x_s = +9,5$, $y_s = -1,28$ und für $CE: F'_0 = 145,48$ mit $x_s = +3,65$, $y_s = +1,97$, somit ist:

$$X = 2 \left(+12,54 \cdot 1,28 + 145,48 \cdot 1,97 \cdot \frac{9,96}{9,5} \right) : 189,4 = 2 (0,085 + 1,590) = +3,35 \text{ t}, \quad Y = 0,$$

$$Z = -2 \left(-12,54 + 145,48 \cdot \frac{9,96}{9,5} \right) : 31,5 = -8,88 \text{ mt}$$

(das entgegengesetzte Vorzeichen von Z gilt wegen der verschiedenen Vorzeichen von V und H sowie von M in den Formeln von Mörsch.)

Von der Schneelast erhält man $F'_0 = -2,24 \cdot 2,8 = -6,27$ mit $x_s = +9,5$, $y_s = -1,28$ und $F'_0 = 78,45$ mit $x_s = +3,62$, $y_s = +1,98$, somit ist:

$$X = 2 (+6,27 \cdot 1,28 + 78,45 \cdot 1,98 \cdot 1,05) : 189,4 = 2(0,042 + 0,86) = +1,80 \text{ t} \left(\text{für } \frac{9,96}{9,5} = 1,05 \right),$$

$$Y = 0, \quad Z = -2 (-6,27 + 78,45 \cdot 1,05) : 31,5 = -2 (-0,20 + 2,61) = -4,82 \text{ mt}.$$

Vom vertikalen Winddruck erhält man $F'_0 = 18,71$ mit $x_s = +3,27$, $y_s = +2,09$ über CE und $F'_0 = 24,78$ mit $x_s = -3,77$, $y_s = +1,93$ über DE , somit ist:

$$X = 1,05 (18,71 \cdot 2,09 + 24,78 \cdot 1,93) : 189,4 = 1,05 (0,21 + 0,25) = +0,48 \text{ t},$$

$$Y = 1,05 (18,71 \cdot 3,27 - 24,78 \cdot 3,77) : 1646,2 = 1,05 (0,037 - 0,057) = -0,02 \text{ t},$$

$$Z = -1,05 (18,71 + 24,78) : 31,5 = -1,05 (0,59 + 0,79) = -1,45 \text{ mt}.$$

Vom horizontalen Winddruck erhält man $F'_0 = +0,07$ mit $x_s = \frac{2,06}{3} = \pm 0,69$, $y_s = +2,90$ über EJ und EK , $F'_0 = -3,26$ mit $x_s = -7,22$, $y_s = +0,84$ über KD , $F'_0 = -62,7$ mit $x_s = -9,5$, $y_s = -3,55$ über BD , somit ist:

$$X = ((+2 \cdot 0,07 \cdot 2,90 - 3,26 \cdot 0,84) 1,05 + 62,7 \cdot 3,55) : 189,4 = (0,002 - 0,014) 1,05 + 1,174 = +1,16 \text{ t},$$

$$Y = (3,26 \cdot 7,22 \cdot 1,05 + 62,7 \cdot 9,5) : 1646,2 = 0,0143 \cdot 1,05 + 0,362 = +0,38 \text{ t},$$

$$Z = -((2 \cdot 0,07 - 3,26) 1,05 - 62,7) : 31,5 = +0,099 \cdot 1,05 + 1,99 = +2,10 \text{ mt}.$$

2. Berechnung der Momente und Spannungen in den Ecken des Rahmens.

Man erhält nun bei Zusammensetzung der Werte von X , Y und Z für die vertikalen Kräfte bei ganzer Schneelast und halbem Winddruck:

$$X = 3,35 + 1,80 + 0,24 = 5,39 \text{ t}, \quad Y = -0,01 \text{ t}, \quad Z = -(8,88 + 4,82 + 0,73) = -14,43 \text{ mt}$$

und bei halber Schneelast und ganzem Winddruck

$$X = 3,35 + 0,90 + 0,48 = 4,73 \text{ t}, \quad Y = -0,02 \text{ t}, \quad Z = -(8,88 + 2,41 + 1,45) = -12,74 \text{ mt}$$

und für den horizontalen Winddruck $X = +1,16 \text{ t}$, $Y = +0,38 \text{ t}$, $Z = +2,10 \text{ mt}$,

so daß die ungünstigsten Werte bei ganzer Schneelast und halbem Winddruck entstehen, und man hierfür erhält:

$$X = 5,39 + 0,58 = +5,97 \text{ t},$$

$$Y = -0,01 + 0,19 = +0,18 \text{ t},$$

$$Z = -14,43 + 1,05 = -13,38 \text{ mt}.$$

Die Momente an den Ecken (bzw. auch zwischen denselben) ergeben sich aus: $M_x = M + M_0 - H \cdot y - V \cdot x$ (für $X = H$, $Y = V$, $M = Z$ und $M_0 =$ Ordinate der Momentenflächen), somit ist:

$$M_a = -13,38 + 5,97 \cdot 5,68 - 0,18 \cdot 9,5 = +18,82,$$

$$M_c = -13,38 - 5,97 \cdot 0,12 - 0,18 \cdot 9,5 - 4,48 - 2,24 = -22,53,$$

$$M_e = -13,38 - 5,97 \cdot 3,12 + 22,30 + 12,14 + \frac{3,36}{2} + \frac{0,23}{2} = +4,23,$$

$$M_d = -13,38 - 5,97 \cdot 0,12 + 0,18 \cdot 9,5 - 4,48 - 2,24 - \frac{2,96}{2} = -20,59,$$

$$M_b = -13,38 + 5,97 \cdot 5,68 + 0,18 \cdot 9,5 - \frac{20,11}{2} = +12,18 \text{ mt}.$$

Zur Vergleichung sollen noch die Werte für die Einzelbelastungen bestimmt werden, und man erhält für Eigengewicht $H = 3,35 \text{ t}$, $V = 0$, $M = -8,88 \text{ mt}$, somit ist:

$$M_a = -8,88 + 3,35 \cdot 5,68 = +10,15 = M_b, \quad M_c = -8,88 - 4,48 - 3,35 \cdot 0,12 = -13,76 = M_d,$$

$$M_e = -8,88 - 3,35 \cdot 3,12 + 22,30 = +2,97.$$

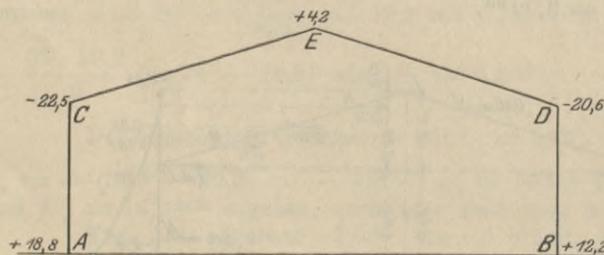


Abb. 33.

Für Schneebelastung ist $H = 1,80\text{ t}$, $V = 0$, $M = -4,82\text{ mt}$, somit:

$$M_a = -4,82 + 1,8 \cdot 5,68 = +5,40 = M_b, \quad M_c = -4,82 - 1,8 \cdot 0,12 = -2,24 = M_d, \\ M_e = -4,82 - 1,8 \cdot 3,12 + 12,14 = +1,70.$$

Für vertikalen Winddruck ist $H = 0,48\text{ t}$, $V = -0,02\text{ t}$, $M = -1,45\text{ mt}$, somit:

$$M_a = -1,45 + 0,48 \cdot 5,68 + 0,02 \cdot 9,5 = +1,47, \quad M_c = -1,45 - 0,48 \cdot 0,12 + 0,02 \cdot 9,5 = -1,32, \\ M_e = -1,45 - 0,48 \cdot 3,12 + 3,36 = +0,41, \quad M_d = -1,45 - 0,48 \cdot 0,12 - 0,02 \cdot 9,5 = -1,70, \\ M_b = -1,45 + 0,48 \cdot 5,68 - 0,02 \cdot 9,5 = +1,09.$$

Für horizontalen Winddruck ist $H = 1,16\text{ t}$, $V = 0,38\text{ t}$, $M = +2,10\text{ mt}$, somit:

$$M_a = 2,1 + 1,16 \cdot 5,68 - 0,38 \cdot 9,5 = +5,08, \quad M_e = 2,1 - 1,16 \cdot 0,12 - 0,38 \cdot 9,5 = -1,65, \\ M_c = 2,1 - 1,16 \cdot 3,12 + 0,23 = -1,29, \quad M_d = 2,1 - 1,16 \cdot 0,12 + 0,38 \cdot 9,5 = +2,61, \\ M_b = 2,1 + 1,16 \cdot 5,68 + 0,38 \cdot 9,5 = +20,11.$$

Die Zusammenstellung der Momente ergibt daher für ganze Schneelast und halben Winddruck:

$$M_a = 10,15 + 5,40 + \frac{1,47}{2} + \frac{5,08}{2} = +18,82, \quad M_c = -13,76 - 7,28 - \frac{1,32}{2} - \frac{1,65}{2} = -22,53, \\ M_e = 2,97 + 1,70 + \frac{0,41}{2} - \frac{1,29}{2} = +4,23, \quad M_d = -13,76 - 7,28 - \frac{1,70}{2} + \frac{2,61}{2} = -20,59, \\ M_b = 10,15 + 5,40 + \frac{1,09}{2} - \frac{7,81}{2} = 12,19\text{ mt (s. oben).}$$

Die auf S. 15 enthaltenen Formeln für die Aufzeichnung der Stützlinsen bzw. die Berechnung der einzelnen Fugen ergeben die genaue Verteilung der Druck- und Zug- (auch Schub-)spannungen. Bei der Berechnung des Abstands $c = \frac{M_x}{N_x}$ von der Mittellinie des Rahmens liegt die Resultante R (bzw. N_x) für ein negatives Vorzeichen von c immer nach außen und für ein positives Vorzeichen immer nach innen. Ebenso rufen die positiven Biegemomente $M_x = -M_a$ usw. immer außen Druck und innen Zug und die negativen immer außen Zug und innen Druck hervor. Die Bestimmung der Dimensionen des Rahmens geschieht bei Eisen in der gewöhnlichen Weise (aus $\sigma_c = \frac{N_x k}{F} + \frac{M_x}{W}$ s. S. 44), und bei Eisenbeton können die von mir aufgestellten Formeln für exzentrische Beanspruchung in B 1 — 4 (s. Berechnung der Eisenbetonkonstruktionen von 1906 und 1910) verwendet und in der gewöhnlichen Weise kontrolliert werden.

III. Berechnung eines Güterschuppens ohne und mit unteren Gelenken sowie Mittelstützen.

1. Berechnung des eingespannten und des Zweigelenk-Rahmens ohne Mittelstützen.

Zunächst soll die Berechnung ohne und mit Gelenken und ohne Mittelstützen ausgeführt werden, und hierbei kann das Trägheitsmoment konstant $= 1$ angenommen werden, so daß in dem Ausdruck $F''_0 = \frac{F_0}{J}$ überall $J = 1$ ist.

Man erhält alsdann den Koordinatenursprung aus:

$$z = \frac{\sum w y'}{\sum w} = \{3,9 (13 - 1,95) + 2,27 (13 - 5) + 5,78 \cdot (13 - 7,3) + \\ + 2,07 \cdot (13 - 9,5) + 4,58 (13 - 11,75)\} : (3,9 + 2,27 + 5,78 + 2,07 + \\ + 4,58) = \frac{107,17}{18,60} = 5,76\text{ m, somit ist } G = 2 \cdot 18,6 = 37,2,$$

$$\text{ferner } T_x = \int \frac{y^2 ds}{J} = \left\{ \frac{4,58}{3} (2^2 + 2 \cdot 4,5 + 4,5^2) + 2,07 \cdot \frac{2^2}{3} + \right. \\ \left. + 5,78 \cdot \frac{2,4^2}{3} + \frac{2,27}{3} (2,4^2 + 2,4 \cdot 4,6 + 4,6^2) + \frac{3,9}{3} (4,6^2 + 4,6 \cdot \right. \\ \left. \cdot 8,5 + 8,5^2) - 1,26^2 \cdot 18,6 \right\} 2 = 472,1 \text{ (dasselbe wurde in Beziehung}$$

$$\text{auf } EF \text{ mit Verschiebung um } 5,76 - 4,5 = 1,26\text{ m berechnet), und} \\ T_y = \int \frac{x^2 ds}{J} = \left\{ 4,58 \cdot \frac{3,7^2}{3} + \frac{2,07}{3} (3,7^2 + 3,7 \cdot 4,25 + 4,25^2) + \frac{5,78}{3} \right. \\ \left. (4,25^2 + 4,25 \cdot 9,5 + 9,5^2) + \frac{2,27}{3} (9,5^2 + 9,5 \cdot 10,05 + 10,05^2) + 3,9 \cdot \right. \\ \left. \cdot 10,05 \right\} 2 = 1902,0 \text{ (s. die Formeln für } T_x \text{ und } T_y \text{ auf S. 12).}$$

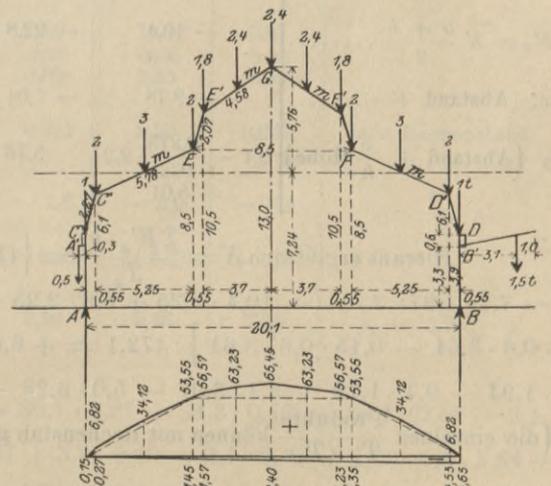


Abb. 34.

Die Auflagerdrücke der Belastung des Hauptdachs sind: $A = B = 1 + 2 + 3 + 2 + 1,8 + 2,4 + 1,2 = 13,4^t$ und der Vordächer $A = \frac{0,5 \cdot 20,4 - 1,5 \cdot 3,1}{20,1} = 0,276^t$, $B = \frac{1,5 \cdot 23,2 - 0,5 \cdot 0,3}{20,1} = 1,724^t$ zusammen $2,0^t$.

Aus den ersteren erhält man eine symmetrische Momentenfläche mit: $M_c = 12,4 \cdot 0,55 = 6,82$, $M_m = 6,82 + (12,4 - 2) \frac{5,25}{2} = 34,12$, $M_e = 34,12 + (10,4 - 3) \frac{5,25}{2} = 53,55$, $M_e = 53,55 + (7,4 - 2) 0,55 = 56,57$, $M_m = 56,57 + (5,4 - 1,8) 1,85 = 63,23$, $M_g = 63,23 + (3,6 - 2,4) 1,85 = 65,45^{\text{mt}}$ (der Index m bezeichnet die Mitte der Stäbe).

Die Momentenfläche der Vordächer ergibt sich aus $M_a = M_c = -0,5 \cdot 0,3 = -0,15^{\text{mt}}$ und $M_b' = M_d = -1,5 \cdot 3,1 = -4,65^{\text{mt}}$, und die Höhen des negativen Trapezes (s. Abb. 34) sind $M_c = -(0,15 + \frac{0,55}{20,1} \cdot 4,5) = -0,27$, $M_e = -1,45$, $M_e = -1,57$, $M_g = -2,40$, $M_f = -3,23$, $M_f = -3,35$, $M_a = -4,53^{\text{mt}}$ (dieselben Werte würden sich auch mit dem Auflagerdruck $A = 0,276^t$ ergeben).

Es sind nun die Momentenflächen F_o über den einzelnen Stäben mit ihren Schwerpunkten zu bestimmen, wobei die letzteren für die einzelnen Trapeze aus $e = \frac{h}{3} \cdot \frac{a+2b}{a+b}$ (bzw. $\frac{h}{3}$ in den Dreiecken) und die ersteren aus $F_o = h' \cdot \frac{a+b}{2}$ (h' = schiefe Stablänge) berechnet werden. Ferner ist x_s = Abstand der Trapeze von der y achse $\mp e$ und y' = Abstand der Stabenden vom Scheitel $\mp \frac{e}{h} \times$ Höhe der Stäbe. Man erhält alsdann folgende Tabelle für die positiven Momentenflächen der Trapeze (von G nach links):

Trapez	1	2	3	4	5	6	1-6
$a + 2b$	191,91	176,37	163,67	121,79	47,76	6,82	
$a + b$	128,68	119,80	110,12	87,67	40,94	6,82	
h (h' schief)	1,85	1,85	0,55	2,625	2,625	0,55	
$e = \frac{h}{3} \frac{a+2b}{a+b}$	0,92	0,91	0,272	1,21	1,02	$\frac{0,55}{3}$	(mit Rechenstab)
$F_o = h' \frac{a+b}{2}$	147,3	137,2	114,0	126,7	58,2	7,7	
x_s (Abstand $\mp e$)	0,92	2,76	3,97	5,46	7,90	9,68	
y' (Abstand $\mp \frac{e}{h}$ Höhe)	$\frac{0,92}{3,7} \cdot 2,5 = 0,62$	1,86	3,49	5,05	6,17	7,63	$y_s = 5,76 - y'$

Ebenso erhält man die negativen Momentenflächen der Trapeze (von D nach links):

Trapez	1	2	3	4	5	6	7	8	1-8
$a + 2b$	13,71	11,23	9,81	8,03	5,54	4,47	1,99	0,57	
$a + b$	9,18	7,88	6,58	5,63	3,97	3,02	1,72	0,42	
h (h' schief)	0,55	5,25	0,55	3,70	3,70	0,55	5,25	0,55	
$e = \frac{h}{3} \frac{a+2b}{a+b}$	0,273	2,49	0,273	1,76	1,72	0,272	2,03	0,249	(mit Rechenstab)
$F_o = h' \frac{a+b}{2}$	-10,4	-22,8	-6,8	-12,9	-9,1	-3,1	-5,0	-0,5	
x_s (Abstand $\mp e$)	-9,78	-7,01	-3,98	-1,94	+1,72	+3,97	+6,28	+9,75	
y' (Abstand $\mp \frac{e}{h}$ Höhe)	$9,1 - \frac{0,273}{0,55} \cdot 2,2 = 8,01$	5,76	3,51	1,31	1,16	3,49	5,43	7,89	$y_s = 5,76 - y'$

Hieraus ergibt sich $X = \frac{\sum F_o' \cdot y_s}{T_x} = \left\{ (147,3 \cdot 5,14 + 137,2 \cdot 3,90 + 114,0 \cdot 2,27 + 126,7 \cdot 0,71 - 58,2 \cdot 0,41 - 7,7 \cdot 1,87) \cdot 2 - (-10,4 \cdot 2,25 + 6,8 \cdot 2,25 + 12,9 \cdot 4,45 + 9,1 \cdot 4,60 + 3,1 \cdot 2,27 + 5,0 \cdot 0,33 - 0,5 \cdot 2,13) - 4,65 \cdot 0,6 \cdot 3,64 - 0,15 \cdot 0,6 \cdot 3,64 \right\} : 472,1 = +6,60^t$, $Y = \frac{\sum F_o' \cdot x_s}{T_y} = (10,4 \cdot 9,78 + 22,8 \cdot 7,01 + 6,8 \cdot 3,98 + 12,9 \cdot 1,94 - 9,1 \cdot 1,72 - 3,1 \cdot 3,97 - 5,0 \cdot 6,28 - 0,5 \cdot 9,75 + 4,65 \cdot 0,6 \cdot 10,05 - 0,15 \cdot 0,6 \cdot 10,05) : 1902,0 = +0,146^t$ (die einzelnen $\frac{\text{Produkte}}{T_x (T_y)}$ können mit Rechenstab gerechnet werden), $Z = -\frac{\sum F_o'}{G} = -\left\{ (147,3 + 137,2 + 114,0 + 126,7 + 58,2 + 7,7) \cdot 2 - (10,4 + 22,8 + 6,8 + 12,9 + 9,1 + 3,1 + 5,0 + 0,5) - 0,6 (4,65 + 0,15) \right\} : 37,2 = -29,80^{\text{mt}}$ (die letzte Klammer entspricht den seitlichen Momentenflächen).

Für die Schneebelastung des Hauptdachs (s. Abb. 35) erhält man als Auflagerdrücke:

$$A = B = 0,5 + 0,9 + 0,5 + 0,4 + 0,7 + 0,35 = 3,35 \text{ t}$$

und von den Vordächern:

$$A = 0,5 - \frac{3,1 \cdot 0,8}{20,1} = 0,377 \text{ t}, \quad B = 0,5 + \frac{0,8 \cdot 23,2}{20,1} = 1,423 \text{ t} \text{ zusammen } 1,8 \text{ t.}$$

Für die erstere erhält man eine symmetrische Momentenfläche

mit

$$M_{e'} = 3,35 \cdot 0,55 = 1,84,$$

$$M_m = 1,84 + (3,35 - 0,5) \frac{5,25}{2} = 9,32,$$

$$M_e = 9,32 + (2,85 - 0,9) \frac{5,25}{2} = 14,44,$$

$$M_{e'} = 14,44 + (1,95 - 0,5) \cdot 0,55 = 15,24,$$

$$M_m = 15,24 + (1,45 - 0,4) \cdot 1,85 = 17,18,$$

$$M_g = 17,18 + (1,05 - 0,7) \cdot 1,85 = 17,83 \text{ mt.}$$

Die Momentenfläche der Vordächer ergibt sich aus $M_{a'} = M_e = -0,5 \cdot 0,3 = -0,15$, $M_{b'} = M_d = -0,5 \cdot 0,3 - 0,8 \cdot 3,1 = -2,63 \text{ mt}$, und dazwischen $M_{c'} = 0,15 + \frac{0,55}{20,1} \cdot 2,48 = -0,22$, $M_e = -0,87$, $M_{e'} = -0,93$, $M_g = -1,39$, $M_{f'} = -1,85$, $M_f = -1,91$, $M_{d'} = -2,56 \text{ mt}$.

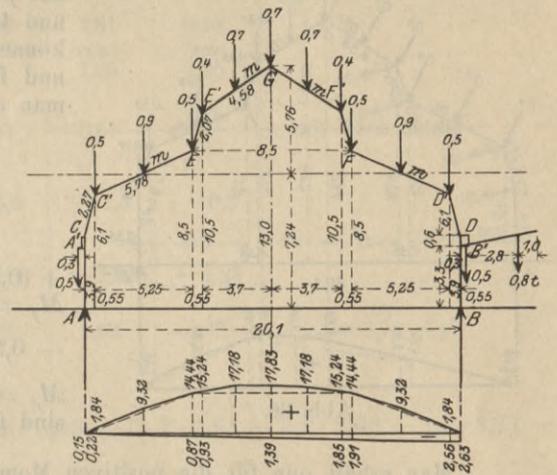


Abb. 35.

Man erhält daher für die positiven Momentenflächen der Trapeze (von G nach links):

Trapez	1	2	3	4	5	6	1-6
$a + 2b$	52,19	47,66	44,12	33,08	13,00	1,84	
$a + b$	35,01	32,42	29,68	23,76	11,16	1,84	
h (h' schief)	^(2,29) 1,85	^(2,29) 1,85	^(2,07) 0,55	^(2,89) 2,625	^(2,89) 2,625	^(2,27) 0,55	
$e = \frac{h}{3} \frac{a + 2b}{a + b}$	0,92	0,91	0,272	1,22	1,02	$\frac{0,55}{3}$	(mit Rechenstab)
$F'_0 = h' \frac{a + b}{2}$	40,1	37,1	30,7	34,3	16,1	2,1	
x_s (Abstand $+ e$)	0,92	2,76	3,97	5,47	7,90	9,68	
y' (Abstand $+ \frac{e}{h}$ Höhe)	0,62	1,86	3,49	5,06	6,17	7,63	⁽¹³⁾ $y_s = 5,76 - y'$

Ebenso erhält man für die negativen Momentenflächen der Trapeze (von D nach links):

Trapez	1	2	3	4	5	6	7	8	1-8
$a + 2b$	7,75	6,38	5,61	4,63	3,25	2,67	1,31	0,52	
$a + b$	5,19	4,47	3,76	3,24	2,32	1,80	1,09	0,37	
h (h' schief)	^(2,27) 0,55	^(5,78) 5,25	^(2,07) 0,55	^(4,58) 3,70	^(4,58) 3,70	^(2,07) 0,55	^(5,78) 5,25	^(2,27) 0,55	
$e = \frac{h}{3} \frac{a + 2b}{a + b}$	0,273	2,50	0,273	1,76	1,73	0,272	2,10	0,257	(mit Rechenstab)
$F'_0 = h' \frac{a + b}{2}$	- 5,9	- 12,9	- 3,9	- 7,4	- 5,3	- 1,9	- 3,2	- 0,4	
x_s (Abstand $\mp e$)	- 9,78	- 7,00	- 3,98	- 1,94	+ 1,73	+ 3,97	+ 6,35	+ 9,76	
y' (Abstand $\mp \frac{e}{h}$ Höhe)	8,01	57,6	3,51	1,31	1,17	3,49	5,46	7,93	⁽¹³⁾ $y_s = 5,76 - y'$

Hieraus ergibt sich $X = \frac{\sum F'_0 y_s}{T_x} = \{ (40,1 \cdot 5,14 + 37,1 \cdot 3,90 + 30,7 \cdot 2,27 + 34,3 \cdot 0,70 - 16,1 \cdot 0,41 - 2,1 \cdot 1,87) 2 - (- 5,9 \cdot 2,25 + 3,9 \cdot 2,25 + 7,4 \cdot 4,45 + 5,3 \cdot 4,59 + 1,9 \cdot 2,27 + 3,2 \cdot 0,30 - 0,4 \cdot 2,17) + 2,63 \cdot 0,6 \cdot 3,64 + 0,15 \cdot 0,6 \cdot 3,64 \} : 472,1 = + 1,73 \text{ t}$, $Y = \frac{\sum F'_0 x_s}{T_y} = (5,9 \cdot 9,78 + 12,9 \cdot 7,0 + 3,9 \cdot 3,98 + 7,4 \cdot 1,94 - 5,3 \cdot 1,73 - 1,9 \cdot 3,97 - 3,2 \cdot 6,35 - 0,4 \cdot 9,76 + 2,63 \cdot 0,6 \cdot 10,05 - 0,15 \cdot 0,6 \cdot 10,05) : 1902,0 = + 0,080 \text{ t}$ (für symme-

trische Belastung ist $Y=0$), $Z = -\frac{\Sigma F'_0}{G} = -\{ (40,1 + 37,1 + 30,7 + 34,3 + 16,1 + 2,1) 2 - (5,9 + 12,9 + 3,9 + 7,4 + 5,3 + 1,9 + 3,2 + 0,4) - 0,6 (2,63 + 0,15) \} : 37,2 = -7,48 \text{ mt.}$

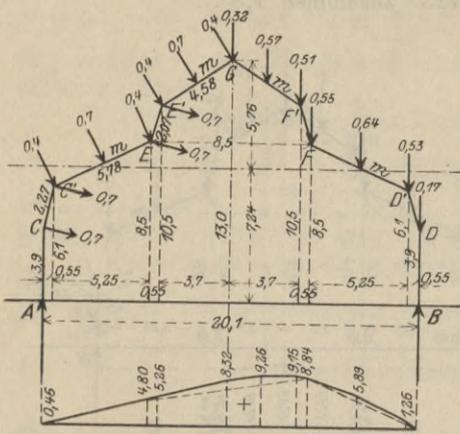


Abb. 36.

Die in Abb. 36 eingezeichnete linksseitige Windbelastung ergibt sich aus $p \sin^2 (\alpha + 10)$ pro qm Dachfläche mit $p = 150$, $\alpha =$ Neigung der Stäbe und $4,5 \text{ m}$ Belastungsbreite. Die senkrecht zur Dachfläche wirkenden Winddrücke können nun in ihre vertikalen und horizontalen Komponenten zerlegt werden, und für die auf der rechten Seite eingetragenen vertikalen Belastungen erhält man als Auflagerdrücke:

$$A = (0,55 \cdot 0,53 + 3,175 \cdot 0,64 + 5,8 \cdot 0,55 + 6,35 \cdot 0,51 + 8,2 \cdot 0,57 + 10,05 \cdot 0,32) : 20,1 = 0,828 \text{ t,}$$

$$B = 3,29 - 0,828 = 2,462 \text{ t.}$$

Die Momente sind alsdann $M_g = 0,828 \cdot 10,05 = 8,32$, $M_m = 8,32 + (0,828 - 0,32) 1,85 = 9,26$, $M_f = 9,26 + (0,508 - 0,57) 1,85 = 9,15$, $M_j = 9,15 + (-0,062 - 0,51) 0,55 = 8,84$, $M_n = 8,84 + (-0,572 - 0,55) \frac{5,25}{2} = 5,89$, $M_w = 5,89 + (-1,122 - 0,64) \frac{5,25}{2} = 1,26$, $M_d = 1,26 + (-1,762 - 0,53) 0,55 = 0$. Die Momente links von G sind für die Ecken $= 5,26; 4,80; 0,46 \text{ mt.}$

Man erhält nun für die positiven Momentenflächen der Trapeze (von D nach links):

Trapez	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1-10
$a + 2b$	2,52	13,04	23,57	27,14	27,67	25,90	18,84	14,86	5,72	0,46	
$a + b$	1,26	7,15	14,73	17,99	18,41	17,58	13,58	10,06	5,26	0,46	
h (h' schieb)	0,55	2,625	2,625	0,55	1,85	1,85	3,70	0,55	5,25	0,55	
$e = \frac{h}{3} \cdot \frac{a+2b}{a+b}$	$\frac{1,1}{3}$	1,59	1,40	0,277	0,92	0,91	1,71	0,270	1,90	$\frac{0,55}{3}$	(mit Rechenstab)
$F'_0 = k \cdot \frac{a+b}{2}$	1,4	10,3	21,3	18,6	21,1	20,1	31,1	10,4	15,2	0,5	
$x_s =$ Abstand $\mp e$..	- 9,68	- 7,91	- 5,48	- 3,97	- 2,78	- 0,94	+ 1,71	+ 3,97	+ 6,15	+ 9,68	
$y' =$ Abst. $\mp \frac{e}{h}$ Höhe	7,63	6,17	5,06	3,49	1,88	0,64	1,16	3,48	5,37	7,63	$y_s = \frac{(13)}{5,76} - y'$

Hieraus ergibt sich $X = \frac{\Sigma F'_0 \cdot y_s}{T_x} = \{ -1,4 \cdot 1,87 - 10,3 \cdot 0,41 + 21,3 \cdot 0,70 + 18,6 \cdot 2,27 + 21,1 \cdot 3,88 + 20,1 \cdot 5,12 + 31,1 \cdot 4,60 + 10,4 \cdot 2,28 + 15,2 \cdot 0,39 - 0,5 \cdot 1,87 \} : 472,1 = 0,862 \text{ t,}$
 $Y = \frac{\Sigma F'_0 \cdot x_s}{T_y} = \{ -1,4 \cdot 9,68 - 7,91 \cdot 10,3 - 5,48 \cdot 21,3 - 18,6 \cdot 3,97 - 21,1 \cdot 2,78 - 20,1 \cdot 0,94 + 31,1 \cdot 1,71 + 10,4 \cdot 3,97 + 15,2 \cdot 6,15 + 0,5 \cdot 9,68 \} : 1902,0 = -0,087 \text{ t,}$
 $Z = -\frac{\Sigma F''_0}{G} = -\{ 1,4 + 10,3 + 21,3 + 18,6 + 21,1 + 20,1 + 31,1 + 10,4 + 15,2 + 0,5 \} : 37,2 = -4,03 \text{ mt.}$

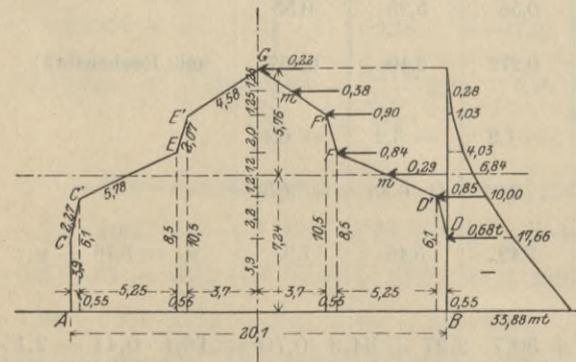


Abb. 37.

Als horizontale Winddrücke ergeben sich die in Abb. 37 eingezeichneten Kräfte, wobei der Winddruck auf die Wand BD vernachlässigt worden ist, da dieselbe gewöhnlich durch Züge verdeckt wird.

Bei Annahme eines freischwebenden Endes bei A erhält man die folgenden Momentenflächen mit

$$M_m = -1,25 \cdot 0,22 = -0,28,$$

$$M_f = -0,28 - 1,25 (0,22 + 0,38) = -1,03,$$

$$M_j = -1,03 - 2 (0,60 + 0,90) = -4,03,$$

$$M_w = -4,03 - 1,2 (1,50 + 0,84) = -6,84, \quad M_u = -6,84 - 1,2 (2,34 + 0,29) = -10,00,$$

$$M_d = -10,00 - 2,2 (2,63 + 0,85) = -17,66, \quad M_b = -17,66 - 3,9 (3,48 + 0,68) = -33,88 \text{ mt.}$$

Hieraus erhält man für die negativen Momentenflächen der Trapeze von B aus:

Trapez	1	2	3	4	5	6	7	1—7
$a + 2b$	69,20	37,66	23,68	14,90	6,09	1,59	0,28	
$a + b$	51,54	27,66	16,84	10,87	5,06	1,31	0,28	
h (h' schief)	$\begin{matrix} (3,9) \\ 3,9 \end{matrix}$	$\begin{matrix} (2,27) \\ 2,2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} (2,89) \\ 1,2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} (2,89) \\ 1,2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} (2,07) \\ 2,0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} (2,29) \\ 1,25 \end{matrix}$	$\begin{matrix} (2,29) \\ 1,25 \end{matrix}$	
$e = \frac{h}{3} \cdot \frac{a + 2b}{a + b}$	1,74	1,00	0,56	0,55	0,80	0,51	$\frac{1,25}{3}$	(mit Rechenstab)
$F'_0 = h' \cdot \frac{a + b}{2}$	-100,5	-31,4	-24,3	-15,7	-5,2	-1,5	-0,3	
$x_s = \text{Abstand} - \frac{e}{h} \text{ Breite}$	-10,05	-9,80	-8,27	-5,67	-4,03	-2,94	-1,23	
$y' = \text{Abstand} - e$	11,26	8,1	6,34	5,15	3,70	1,99	0,83	$y_s = \overset{(13)}{5,76} - y'$

Es ist daher $X = \frac{\sum F'_0 \cdot y_s}{T_x} = \{100,5 \cdot 5,5 + 31,4 \cdot 2,34 + 24,3 \cdot 0,58 - 15,7 \cdot 0,61 - 5,2 \cdot 2,06 - 1,5 \cdot 3,77 - 0,3 \cdot 4,93\} : 472,1 = + 1,30^t$, $Y = \frac{\sum F'_0 \cdot x_s}{T_y} = \{100,5 \cdot 10,05 + 31,4 \cdot 9,80 + 24,3 \cdot 8,27 + 15,7 \cdot 5,67 + 5,2 \cdot 4,03 + 1,5 \cdot 2,94 + 0,3 \cdot 1,23\} : 1902,0 = + 0,860^t$, $Z = - \frac{\sum F'_0}{G} = - \{-100,5 - 31,4 - 24,3 - 15,7 - 5,2 - 1,5 - 0,3\} : 37,2 = + 4,81^{\text{mt}}$.

Für zwei Gelenke bei A und B gelten dieselben Momentenflächen, und dieselbe Formel für den Horizontalschub X , nur mit der veränderten x achse durch die Gelenke.

Es ist daher $T'_x = T_x + z_u^2 \cdot \Sigma w = 472,1 + 7,24^2 \cdot 37,2 = 2422,1$ und $y_s = 13 - y'$ (in den Tabellen), so daß man für das Eigengewicht erhält:

$X = \frac{\sum F'_0 \cdot y_s}{T'_x} = \{(147,3 \cdot 12,38 + 137,2 \cdot 11,14 + 114,0 \cdot 9,51 + 126,7 \cdot 7,95 + 58,2 \cdot 6,83 + 7,7 \cdot 5,37) 2 - (10,4 \cdot 4,99 + 22,8 \cdot 7,24 + 6,8 \cdot 9,49 + 12,9 \cdot 11,69 + 9,1 \cdot 11,84 + 3,1 \cdot 9,51 + 5,0 \cdot 7,57 + 0,5 \cdot 5,11) - (0,15 + 4,65) 0,6 \cdot 3,6\} : 2422,1 = + 4,604^t$.

Ebenso erhält man für die Schneebelastung:

$X = \frac{\sum F'_0 \cdot y_s}{T'_x} = \{(40,1 \cdot 12,38 + 37,1 \cdot 11,14 + 30,7 \cdot 9,51 + 34,3 \cdot 7,94 + 16,1 \cdot 6,83 + 2,1 \cdot 5,37) 2 - (5,9 \cdot 4,99 + 12,9 \cdot 7,24 + 3,9 \cdot 9,49 + 7,4 \cdot 11,69 + 5,3 \cdot 11,83 + 1,9 \cdot 9,51 + 3,2 \cdot 7,54 + 0,4 \cdot 5,07) - (0,15 + 2,63) 0,6 \cdot 3,6\} : 2422,1 = + 1,171^t$.

Ferner erhält man vom vertikalen Winddruck:

$X = \frac{\sum F'_0 \cdot y_s}{T'_x} = \{1,4 \cdot 5,37 + 10,3 \cdot 6,83 + 21,3 \cdot 7,94 + 18,6 \cdot 9,51 + 21,1 \cdot 11,12 + 20,1 \cdot 12,36 + 31,1 \cdot 11,84 + 1,04 \cdot 9,52 + 15,2 \cdot 7,63 + 0,5 \cdot 5,37\} : 2422,1 = + 0,617^t$.

Endlich erhält man vom horizontalen Winddruck:

$X = \frac{\sum F'_0 \cdot y_s}{T'_x} = - \{100,5 \cdot 1,74 + 31,4 \cdot 4,9 + 24,3 \cdot 6,66 + 15,7 \cdot 7,85 + 5,2 \cdot 9,30 + 1,5 \cdot 11,01 + 0,3 \cdot 12,17\} : 2422,1 = - 0,282^t$. Für den vertikalen Gegendruck bei A ist $V = \frac{33,88}{20,1} = 1,685^t$, und man erhält nach S. 11

$X = \frac{V \cdot G \cdot z_u \cdot l}{2 T'_x} = \frac{1,685 \cdot 37,2 \cdot 7,24 \cdot 20,1}{2 \cdot 2422,1} = 1,883^t$, somit als Differenz $X = 1,883 - 0,282 = + 1,601^t$ (aus der Momentenfläche der Kraft V erhielte man denselben Wert, und bei ihrer Zusammensetzung mit der negativen Momentenfläche des Winddrucks ergibt sich ein Moment = 0 bei B).

Zur Berechnung der Biegemomente an den Ecken (bzw. auch zwischen denselben) gilt bei Eingespanntsein des Rahmens die Formel $M_x = M + M_0 - H \cdot y - V \cdot x$, und man erhält für das Eigengewicht: $H = 6,60^t$, $V = 0,15^t$, $M = - 29,80^{\text{mt}}$, und M_0 entspricht der Differenz der positiven und negativen Momente der einzelnen Querschnitte (s. Abb. 34), somit ist:

$M_a = - 29,8 + 6,6 \cdot 7,24 - 0,15 \cdot 10,05 = + 16,48$, $M_c = - 29,8 - 0,15 + 6,6 \cdot 3,34 - 0,15 \cdot 10,05 = - 9,41$,
 $M_{c'} = - 29,8 + 6,55 + 6,6 \cdot 1,14 - 0,15 \cdot 9,5 = - 17,15$, $M_e = - 29,8 + 52,10 - 6,6 \cdot 1,26 - 0,15 \cdot 4,25 = + 13,35$,
 $M_{e'} = - 29,8 + 55,0 - 6,6 \cdot 3,26 - 0,15 \cdot 3,7 = + 3,13$, $M_g = - 29,8 + 63,05 - 6,6 \cdot 5,76 = - 4,77$,
 $M_{f'} = - 29,8 + 53,34 - 6,6 \cdot 3,26 + 0,15 \cdot 3,7 = + 2,58$, $M_f = - 29,8 + 50,2 - 6,6 \cdot 1,26 + 0,15 \cdot 4,25 = + 12,72$,
 $M_{a'} = - 29,8 + 2,29 + 6,6 \cdot 1,14 + 0,15 \cdot 9,5 = - 18,56$, $M_d = - 29,8 - 4,65 + 6,6 \cdot 3,34 + 0,15 \cdot 10,05 = - 10,90^{\text{mt}}$,
 $M_b = - 29,8 + 6,6 \cdot 7,24 + 0,15 \cdot 10,05 = + 19,49^{\text{mt}}$.

Ebenso erhält man von der Schneebelastung: $H = 1,73 \text{ t}$, $V = 0,08 \text{ t}$, $M = -7,48 \text{ mt}$ und

$$\begin{aligned} M_a &= -7,48 + 1,73 \cdot 7,24 - 0,08 \cdot 10,05 = +4,24, & M_c &= -7,48 - 0,15 + 1,73 \cdot 3,34 - 0,08 \cdot 10,05 = -2,66, \\ M_{c'} &= -7,48 + 1,62 + 1,73 \cdot 1,14 - 0,08 \cdot 9,5 = -4,65, & M_e &= -7,48 + 13,57 - 1,73 \cdot 1,26 - 0,08 \cdot 4,25 = +3,57, \\ M_{e'} &= -7,48 + 14,31 - 1,73 \cdot 3,26 - 0,08 \cdot 3,7 = +0,89, & M_g &= -7,48 + 16,44 - 1,73 \cdot 5,76 = -1,00, \\ M_{f'} &= -7,48 + 13,39 - 1,73 \cdot 3,26 + 0,08 \cdot 3,7 = +0,57, & M_f &= -7,48 + 12,53 - 1,73 \cdot 1,26 + 0,08 \cdot 4,25 = +3,21, \\ M_{d'} &= -7,48 - 0,72 + 1,73 \cdot 1,14 + 0,08 \cdot 9,5 = -5,47, & M_d &= -7,48 - 2,63 + 1,73 \cdot 3,34 + 0,08 \cdot 10,05 = -3,53, \\ M_b &= -7,48 + 1,73 \cdot 7,24 + 0,08 \cdot 10,05 = +5,85 \text{ mt.} \end{aligned}$$

Ferner erhält man von der vertikalen Windbelastung: $H = 0,86 \text{ t}$, $V = -0,09 \text{ t}$, $M = -4,03 \text{ mt}$ und

$$\begin{aligned} M_a &= -4,03 + 0,86 \cdot 7,24 + 0,09 \cdot 10,05 = +3,10, & M_c &= -4,03 + 0,86 \cdot 3,34 + 0,09 \cdot 10,05 = -0,25, \\ M_{c'} &= -4,03 + 0,46 + 0,86 \cdot 1,14 + 0,09 \cdot 9,5 = -1,74, & M_e &= -4,03 + 4,80 - 0,86 \cdot 1,26 + 0,09 \cdot 4,25 = +0,06, \\ M_{e'} &= -4,03 + 5,26 - 0,86 \cdot 3,26 + 0,09 \cdot 3,7 = -1,24, & M_g &= -4,03 + 8,32 - 0,86 \cdot 5,76 = -0,66, \\ M_{f'} &= -4,03 + 9,15 - 0,86 \cdot 3,26 - 0,09 \cdot 3,7 = +1,98, & M_f &= -4,03 + 8,84 - 0,86 \cdot 1,26 - 0,09 \cdot 4,25 = +3,35, \\ M_{d'} &= -4,03 + 1,26 + 0,86 \cdot 1,14 - 0,09 \cdot 9,5 = -2,65, & M_d &= -4,03 + 0,86 \cdot 3,34 - 0,09 \cdot 10,05 = -2,06, \\ M_b &= -4,03 + 0,86 \cdot 7,24 - 0,09 \cdot 10,05 = +1,29 \text{ mt.} \end{aligned}$$

Endlich erhält man für den horizontalen Winddruck $H = 1,30 \text{ t}$, $V = 0,86 \text{ t}$, $M = +4,81 \text{ mt}$ und

$$\begin{aligned} M_a &= 4,81 + 1,3 \cdot 7,24 - 0,86 \cdot 10,05 = +5,58, & M_c &= 4,81 + 1,3 \cdot 3,34 - 0,86 \cdot 10,05 = +0,51, \\ M_{c'} &= 4,81 + 1,3 \cdot 1,14 - 0,86 \cdot 9,5 = -1,88, & M_e &= 4,81 - 1,3 \cdot 1,26 - 0,86 \cdot 4,25 = -0,48, \\ M_{e'} &= 4,81 - 1,3 \cdot 3,26 - 0,86 \cdot 3,7 = -2,61, & M_g &= 4,81 - 1,3 \cdot 5,76 = -2,68, \\ M_{f'} &= 4,81 - 1,03 - 1,3 \cdot 3,26 + 0,86 \cdot 3,7 = +2,72, & M_f &= 4,81 - 4,03 - 1,3 \cdot 1,26 + 0,86 \cdot 4,25 = +2,80, \\ M_{d'} &= 4,81 - 10,0 + 1,3 \cdot 1,14 + 0,86 \cdot 9,5 = +4,46, & M_d &= 4,81 - 17,66 + 1,3 \cdot 3,34 + 0,86 \cdot 10,05 = +0,13, \\ M_b &= 4,81 - 33,88 + 1,3 \cdot 7,24 + 0,86 \cdot 10,05 = -11,02 \text{ mt.} \end{aligned}$$

Durch die Summierung dieser Momente und zwar für halben Schnee- und ganzen Winddruck sowie umgekehrt, und auch für Winddruck rechts und links (wobei die Momente rechts und links vertauscht werden) erhält man:

bei Winddruck rechts

bei Winddruck links

$$M_a = 16,48 + \frac{4,24}{2} + 3,10 + 5,58 = +27,28,$$

$$M_a = 16,48 + \left(\frac{4,24}{2}\right) + 1,29 - 11,02 = +6,75,$$

$$M_c = -9,41 \left(-\frac{2,66}{2}\right) - 0,25 + 0,51 = -9,15,$$

$$M_c = -9,41 - 2,66 - \frac{2,06 + 0,13}{2} = -13,04,$$

$$M_{c'} = -17,15 - 4,65 - \frac{1,74 - 1,88}{2} = -23,61,$$

$$M_{c'} = -17,15 \left(-\frac{4,65}{2}\right) - 2,65 + 4,46 = -15,34,$$

$$M_e = 13,35 \left(+\frac{3,57}{2}\right) + 0,06 - 0,48 = +12,93,$$

$$M_e = 13,35 + \frac{3,57}{2} + 3,35 + 2,80 = +21,49,$$

$$M_{e'} = 13,13 \left(+\frac{0,89}{2}\right) - 1,24 - 2,61 = -0,72,$$

$$M_{e'} = 13,13 + \frac{0,89}{2} + 1,98 + 2,72 = +8,28,$$

$$M_g = -4,77 - \frac{1,0}{2} - 0,66 - 2,68 = -8,61,$$

$$M_g = -4,77 \left(-\frac{1,0}{2} - 0,66 - 2,68\right) = -4,77,$$

$$M_{f'} = 2,58 + \frac{0,57}{2} + 1,98 + 2,72 = +7,57,$$

$$M_{f'} = 2,58 \left(+\frac{0,57}{2}\right) - 1,24 - 2,61 = -1,27,$$

$$M_f = 12,72 + \frac{3,21}{2} + 3,35 + 2,80 = +20,48,$$

$$M_f = 12,72 \left(+\frac{3,21}{2}\right) + 0,06 - 0,48 = +12,30,$$

$$M_{d'} = -18,56 \left(-\frac{5,47}{2}\right) - 2,65 + 4,46 = -16,75,$$

$$M_{d'} = -18,56 - 5,47 - \frac{1,74 - 1,88}{2} = -25,84,$$

$$M_d = -10,90 - 3,53 - \frac{2,06 + 0,13}{2} = -15,40,$$

$$M_d = -10,90 \left(-\frac{3,53}{2}\right) - 0,25 + 0,51 = -10,64,$$

$$M_b = 19,49 \left(+\frac{5,85}{2}\right) + 1,29 - 11,02 = +9,76,$$

$$M_b = 19,49 + \frac{5,85}{2} + 3,10 + 5,58 = +31,10 \text{ mt.}$$

In dieser Zusammenstellung der größten positiven und negativen Biegemomente fallen die eingeklammerten Zahlen weg, und die kleinere Zahl für Schnee- oder Winddruck ist mit zwei dividiert, so daß die ungünstigsten positiven und negativen Werte entstehen, welche in Abb. 38 eingeschrieben sind.

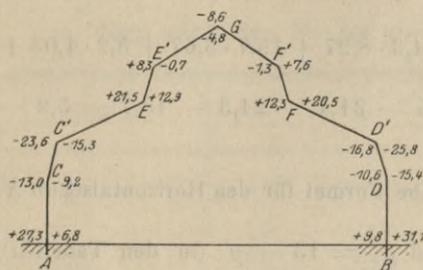


Abb. 38.

Die Momente des Zweigelenrahmens ergeben sich aus dem Moment des Horizontalschubs H (beim horizontalen Winddruck auch des Gegendrucks V) und den positiven sowie negativen Momentenflächen (wie beim eingespannten Rahmen), und man erhält für das Eigengewicht $H = 4,61^t$ und

$$\begin{aligned} M_a &= 0, & M_c &= -4,61 \cdot 3,9 - 0,15 = -18,13, & M_{c'} &= -4,61 \cdot 6,1 + 6,55 = -21,57, \\ M_e &= -4,61 \cdot 8,5 + 52,10 = +12,92, & M_{e'} &= -4,61 \cdot 10,5 + 55,0 = +6,60, & M_g &= -4,61 \cdot 13 + 63,05 = +3,12, \\ M_f &= -4,61 \cdot 10,5 + 53,34 = +4,94, & M_{f'} &= -4,61 \cdot 8,5 + 50,20 = +11,02, & M_{d'} &= -4,61 \cdot 6,1 + 2,29 = -25,83, \\ M_d &= -4,61 \cdot 3,9 - 4,65 = -22,63 \text{ mt}, & M_b &= 0. \end{aligned}$$

Ebenso erhält man für die Schneebelastung $H = 1,17^t$ und

$$\begin{aligned} M_a &= 0, & M_c &= -1,17 \cdot 3,9 - 0,15 = -4,71, & M_{c'} &= -1,17 \cdot 6,1 + 1,62 = -5,52, \\ M_e &= -1,17 \cdot 8,5 + 13,57 = +3,63, & M_{e'} &= -1,17 \cdot 10,5 + 14,31 = +2,03, & M_g &= -1,17 \cdot 13 + 16,44 = +1,23, \\ M_f &= -1,17 \cdot 10,5 + 13,39 = +1,11, & M_{f'} &= -1,17 \cdot 8,5 + 12,53 = +2,59, & M_{d'} &= -1,17 \cdot 6,1 - 0,72 = -7,86, \\ M_d &= -1,17 \cdot 3,9 - 2,63 = -7,19 \text{ mt}, & M_b &= 0. \end{aligned}$$

Ferner erhält man von dem vertikalen Winddruck $H = 0,62^t$ und

$$\begin{aligned} M_a &= 0, & M_b &= -0,62 \cdot 3,9 = -2,42, & M_{c'} &= -0,62 \cdot 6,1 + 0,46 = -3,32, \\ M_e &= -0,62 \cdot 8,5 + 4,80 = -0,47, & M_{e'} &= -0,62 \cdot 10,5 + 5,26 = -1,25, & M_g &= -0,62 \cdot 13 + 8,32 = +0,26, \\ M_f &= -0,62 \cdot 10,5 + 9,15 = +2,64, & M_{f'} &= -0,62 \cdot 8,5 + 8,84 = +3,57, & M_{d'} &= -0,62 \cdot 6,1 + 1,26 = -2,52, \\ M_d &= -0,62 \cdot 3,9 = -2,42 \text{ mt}, & M_b &= 0. \end{aligned}$$

Endlich erhält man von dem horizontalen Winddruck $H = 1,60^t$, $V = 1,685^t$, und

$$\begin{aligned} M_a &= 0, \\ M_c &= -1,6 \cdot 3,9 = -6,24, \\ M_{c'} &= -1,6 \cdot 6,1 + 1,685 \cdot 0,55 = -8,83, \\ M_e &= -1,6 \cdot 8,5 + 1,685 \cdot 5,8 = -3,83, \\ M_{e'} &= -1,6 \cdot 10,5 + 1,685 \cdot 6,35 = -6,10, \\ M_g &= -1,6 \cdot 13 + 1,685 \cdot 10,05 = -3,87, \\ M_{f'} &= -1,6 \cdot 10,5 - 1,03 + 1,685 \cdot 13,75 = +5,37, \\ M_f &= -1,6 \cdot 8,5 - 4,03 + 1,685 \cdot 14,3 = +6,47, \\ M_{d'} &= -1,6 \cdot 6,1 - 10,0 + 1,685 \cdot 19,55 = +13,18, \\ M_d &= -1,6 \cdot 3,9 - 17,66 + 1,685 \cdot 20,1 = +9,97 \text{ mt}, & M_b &= 0. \end{aligned}$$

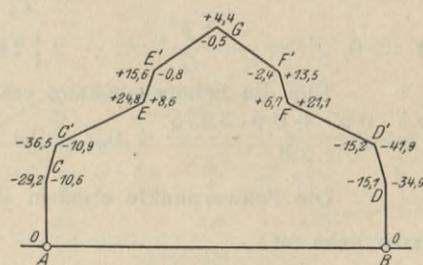


Abb. 39.

Durch Summierung dieser Momente erhält man für den Zweigelenrahmen in derselben Weise wie oben:

bei Winddruck rechts

$$M_a = M_b = 0, \quad M_c = -18,13 - \frac{4,71}{2} - 2,42 - 6,24 = -29,15,$$

$$M_{c'} = -21,57 - \frac{5,52}{2} - 3,32 - 8,83 = -36,49,$$

$$M_e = 12,92 + \left(\frac{3,63}{2}\right) - 0,47 - 3,83 = +8,62,$$

$$M_{e'} = 6,60 + \left(\frac{2,03}{2}\right) - 1,25 - 6,10 = -0,75,$$

$$M_g = 3,12 + \left(\frac{1,23}{2}\right) + 0,26 - 3,87 = -0,49,$$

$$M_{f'} = 4,94 + \frac{1,11}{2} + 2,64 + 5,37 = +13,51,$$

$$M_f = 11,02 + \frac{2,59}{2} + 3,57 + 6,47 = +21,06,$$

$$M_{d'} = -25,83 - \left(\frac{7,86}{2}\right) - 2,52 + 13,18 = -15,17,$$

$$M_d = -22,63 - \left(\frac{7,19}{2}\right) - 2,42 + 9,97 = -15,08,$$

bei Winddruck links

$$M_c = -18,13 - \left(-\frac{4,71}{2}\right) - 2,42 + 9,97 = -10,58,$$

$$M_{c'} = -21,57 - \left(-\frac{5,52}{2}\right) - 2,52 + 13,18 = -10,91,$$

$$M_e = 12,92 + \frac{3,63}{2} + 3,57 + 6,47 = +24,78,$$

$$M_{e'} = 6,60 + \frac{2,03}{2} + 2,64 + 5,37 = +15,63,$$

$$M_g = 3,12 + 1,23 \left(\frac{+0,26 - 3,87}{2}\right) = +4,35,$$

$$M_{f'} = 4,94 + \left(\frac{1,11}{2}\right) - 1,25 - 6,10 = -2,41,$$

$$M_f = 11,02 + \left(\frac{2,59}{2}\right) - 0,47 - 3,88 = +6,67,$$

$$M_{d'} = -25,83 - \frac{7,86}{2} - 3,32 - 8,83 = -41,91,$$

$$M_d = -22,63 - \frac{7,19}{2} - 2,42 - 6,24 = -34,89 \text{ mt}.$$

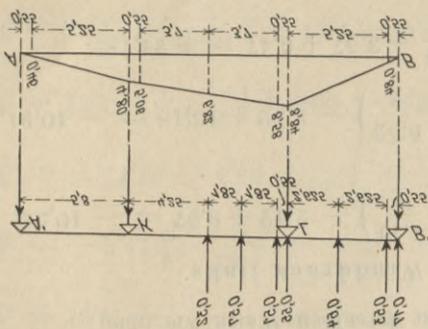
Die Momente des Zweigelenrahmens werden daher wesentlich ungünstiger als diejenigen des eingespannten Rahmens, und bei ersterem hat das Fundament den Horizontalschub aufzunehmen, und bei letzterem muß es die Einspannung bewirken.

λ (Vratsung $\pm \frac{y}{6}$ Höhe)	1'03	2'31	3'21	1'30	1'10	3'40	2'31	1'03	$\lambda^* = 2'10 - \lambda$ (12)
α^* (Vratsung $\pm \epsilon$)	- 2'08	- 0'12	- 3'08	- 1'05	+ 1'10	+ 3'01	+ 0'12	+ 2'08	
$E^0 = y \cdot \frac{5}{\alpha + y}$	1'0	38'0	18'1	32'3	31'5	10'5	12'5	0'2	
$\epsilon = \frac{3}{y} \cdot \frac{\alpha + y}{\alpha + 5y}$	$\frac{3}{1'10}$	3'32	0'513	1'18	1'10	0'513	1'00	$\frac{3}{0'22}$	(mit Beschränkung)
y (y schiefer)	0'22 (3'51)	2'52 (2'12)	0'22 (3'01)	2'1 (4'28)	3'1 (4'28)	0'22 (3'01)	2'52 (2'12)	0'22 (3'51)	
$\alpha + y$	0'87	2'08	1'45	12'40	11'88	2'80	2'50	0'40	
$\alpha + 5y$	1'08	18'25	20'00	35'55	10'87	14'00	2'15	0'40	
Tragere	1	5	3	4	2	6	1	8	1-8

Die Werte von E^0 , α^* und λ für die einzelnen Tragere von B nach links sind folgende:

$= 1'253$, und den Momenten $M^e = 0'858 \cdot 2'8 = 2'40 \text{ mt}$, $M^l = 1'253 \cdot 2'8 = 3'508 \text{ mt}$ (s. App. 45).

APP. 45



$N = \frac{30'1}{2'8 \cdot 1'031 + 14'3 \cdot 0'324} = 0'858$, $B = 0'324 + 1'031 - 0'858 =$

und die Momentenfläche ergibt sich aus

$\Gamma = \frac{5}{0'35} + \frac{8'2}{0'21 \cdot 0'1 + 0'21 \cdot 1'02} + 0'22 + \frac{2'8}{0'23 \cdot 0'22 + 0'04 \cdot 3'112} = 1'031$

Mittelstützen als Gegenkräfte $K = \frac{5}{0'35} + \frac{8'2}{0'21 \cdot 5'4 + 0'21 \cdot 0'22} = 0'324$

Für den vertikalen Winddruck erhält man zu den diskontinuierlichen $+ 50'0 + 42'1 + 1'0$: $31'5 = - 1'10 \text{ mt}$.

$\cdot 0'30 - 1'0 \cdot 1'81$: $415'1 = 1'01$, $\lambda = 0$, $N = - \frac{G}{\Sigma E_n} = - 3 \{ 0'1 +$

Es ist daher $X = \frac{\Sigma M_n^w}{\Sigma E_n \cdot \lambda^*} = 3 \{ 0'1 \cdot 4'21 + 50'0 \cdot 2'50 + 42'1 \cdot$

$E^0 = \frac{5}{14'44 + 1'31} \cdot 2'18 = 42'1$, $\alpha^* = 0'12$, $\lambda^* = 0'30$, $E^0 = 5'51 \cdot \frac{5}{1'31} = 1'0$, $\alpha^* = 2'08$, $\lambda^* = - 1'81$.

$E^0 = 14'44 \cdot 4'28 = 61'1$, $\alpha^* = 1'82$, $\lambda^* = 4'21$, $E^0 = 14'44 \cdot 5'01 = 72'0$, $\alpha^* = 3'08$, $\lambda^* = 5'50$

nach links ist:

Die Schwerpunkte ergeben sich aus $\epsilon = \frac{3}{2'52} \cdot \frac{14'44 + 1'31}{14'44 + 5 \cdot 1'31} = 1'00$ und $\epsilon = \frac{3}{0'22}$ und von der Mitte

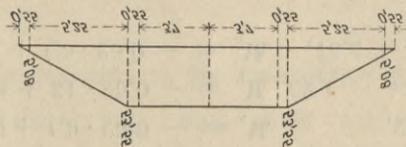
$\frac{2'8}{0'2 \cdot 0'22 + 0'04 \cdot 3'112} + 0'2 + 0'4 + 0'1 + 0'32 = 5'40$, und als Moment $2'8 \cdot 5'40 = 15'12 \text{ mt}$ (s. App. 32).

Für die Schwerbelastung erhält man als Auflagerdruck

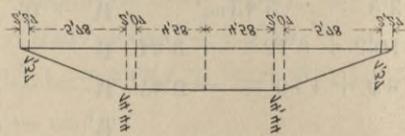
$X = 0$, $N = - \frac{G}{\Sigma E_n} = - 3 \{ 542'3 + 110'8 + 100'4 + 2'8 \}$: $31'5 = - 58'20 \text{ mt}$.

Man erhält daher $X = \frac{\Sigma M_n^w}{\Sigma E_n \cdot \lambda^*} = 3 \{ 542'3 \cdot 4'21 + 110'8 \cdot 2'50 + 100'4 \cdot 0'30 - 2'8 \cdot 1'81 \}$: $415'1 = + 2'01$

APP. 40



APP. 41



$E^0 = 5'51 \cdot \frac{5}{2'08} = 2'8$, $\alpha^* = 2'08$, $\lambda^* = 2'10 - 1'03 = - 1'07$.

$E^0 = \frac{5}{23'22 + 2'08} \cdot 2'18 = 100'4$, $\alpha^* = 0'12$, $\lambda^* = 2'10 - (4'2 + \frac{2'52}{1'0} \cdot 5'4) = 0'30$

$E^0 = 23'22 \cdot 5'01 = 110'8$, $\alpha^* = 3'08$, $\lambda^* = 2'10 - 3'2 = 5'50$

$E^0 = 23'22 \cdot 4'28 = 542'3$, $\alpha^* = 1'82$, $\lambda^* = 2'10 - 1'32 = 4'21$

nach links ist (vgl. die schiefen Lagen y in App. 41):

Die Schwerpunkte ergeben sich aus $\epsilon = \frac{3}{2'52} \cdot \frac{23'22 + 2'08}{23'22 + 5 \cdot 2'08} = 1'00$ und $\epsilon = \frac{3}{0'22}$ und von der Mitte

die Teilflächen mit ihren Schwerpunkten bestimmt werden müssen.

so daß die Gegenkräfte der Stützen das einbeschriebene (Restrechte) Tragere als Momentenfläche erhalten, für welches

(s. App. 34) $= \frac{2'8}{5'0 \cdot 0'22 + 3'0 \cdot 3'112} + 5'0 + 1'8 + 5'4 + 1'5 = 2'535$, und ein Moment $= 2'535 \cdot 2'8 = 7'10 \text{ mt}$

Werden bei E und F Stützen angesetzt, so erhalten dieselben eine diskontinuierliche Belastung vom Eigengewicht

5. Berechnung des eingespannten und des Zweifelhaken-Verhaltens mit Mittelstützen.

Hieraus ergibt sich $X = \frac{\sum F'_0 \cdot y_s}{T_x} = \{-1,0 \cdot 1,87 + 28,0 \cdot 0,39 + 18,1 \cdot 2,25 + 35,3 \cdot 4,46 + 27,2 \cdot 4,57 + 10,2 \cdot 2,27 + 15,2 \cdot 0,39 - 0,5 \cdot 1,87\} : 472,1 = +0,76 \text{ t}$,

$$Y = \frac{\sum F'_0 \cdot x_s}{T_y} = \{-(1,0 \cdot 9,68 + 28,0 \cdot 6,15 + 18,1 \cdot 3,98 + 35,3 \cdot 1,92) + (27,2 \cdot 1,76 + 10,2 \cdot 3,97 + 15,2 \cdot 6,15 + 0,5 \cdot 9,68)\} : 1902,0 = -0,07 \text{ t}$$

$$Z = -\frac{\sum F'_0}{G} = -\{1,0 + 28,0 + 18,1 + 35,3 + 27,2 + 10,2 + 15,2 + 0,5\} : 37,2 = -3,64 \text{ mt}$$

Durch den horizontalen Winddruck entsteht nach Abb. 43 eine vertikale Druck- bzw. Zugkraft in den Mittelstützen, und zwar $= \frac{M_w}{2BL} = \frac{33,88}{2 \cdot 5,8} = 2,92 \text{ t}$.

Es kann nun der Einfluß der vertikalen Kräfte (s. Abb. 43) auf den Rahmen bestimmt werden, und man erhält aus ihnen die nebengezeichnete positive Momentenfläche.

Für das Trapez ergibt sich nach Abb. 40:

$$X = \frac{16,94}{53,55} \cdot 5,98 = 1,892 \text{ t}, \quad Y = 0, \quad Z = -\frac{16,94}{53,55} \cdot 28,56 = -9,04 \text{ mt}$$

Für das Dreieck und Rechteck erhält man:

$$F_0 = \frac{33,88 + 30,67}{2} \cdot 2,27 = 73,3, \quad x_s = 10,05 - \frac{0,55}{3} \cdot \frac{33,88 + 2 \cdot 30,67}{33,88 + 30,67} = -9,78, \quad y' = 9,1 - \frac{0,27}{0,55} \cdot 2,2 = 8,02,$$

$$F_0 = \frac{30,67}{2} \cdot 5,78 = 88,6, \quad x_s = 9,5 - \frac{5,25}{3} = -7,75, \quad y' = 6,9 - \frac{2,4}{3} = 6,10,$$

$$F_0 = 33,88 \cdot 3,9 = 132,1, \quad x_s = -10,05, \quad y' = 9,1 + 1,95 = 11,05,$$

(y_s ist $= \overset{(13)}{5,76} - y'$).

Es ist daher

$$X = \frac{\sum F'_0 \cdot y_s}{T_x} = \{-73,3 \cdot 2,26 - 88,6 \cdot 0,34 - 132,1 \cdot 5,29\} : 472,1 = -1,895 \text{ t}$$

$$Y = \frac{\sum F'_0 \cdot x_s}{T_y} = \{-73,3 \cdot 9,78 - 88,6 \cdot 7,75 - 132,1 \cdot 10,05\} : 1902,0 = -1,44 \text{ t}$$

$$Z = -\frac{\sum F'_0}{G} = -\{88,6 + 73,3 + 132,1\} : 37,2 = -7,90 \text{ mt}, \text{ somit zusammen:}$$

$$X = 0, \quad Y = -1,44 \text{ t}, \quad Z = -9,04 - 7,90 = -16,94 \text{ mt}$$

Bei Berücksichtigung der Mittelstützen sind daher obige Werte von denjenigen für den Rahmen ohne Mittelstützen abziehen, so daß man erhält:

$$\text{für Eigengewicht: } X = 6,60 - 5,98 = +0,62 \text{ t}, \quad Y = 0,15 - 0 = +0,15 \text{ t}, \quad Z = -29,80 + 28,56 = -1,34 \text{ mt}$$

$$\text{für Schneebelastung: } X = 1,73 - 1,61 = +0,12 \text{ t}, \quad Y = 0,08 - 0 = +0,08 \text{ t}, \quad Z = -7,48 + 7,70 = +0,22 \text{ mt}$$

$$\text{für vertikalen Winddruck: } X = 0,86 - 0,76 = +0,10 \text{ t}, \quad Y = -0,09 + 0,07 = -0,02 \text{ t}, \quad Z = -4,03 + 3,64 = -0,39 \text{ mt}$$

$$\text{für horizontalen Winddruck: } X = 1,30 - 0 = 1,30 \text{ t}, \quad Y = 0,86 - 1,44 = -0,58 \text{ t}, \quad Z = +4,81 - 16,94 = -12,13 \text{ mt}$$

Diese Werte sind nun in die Gleichung $M_x = M + M_0 - H \cdot y - V \cdot x$ einzusetzen, wo M_0 der Differenz der Momente ohne Mittelstützen (s. Abb. 34–37) und für die letzteren (s. Abb. 40–43) entspricht.

Man erhält daher für die einzelnen Belastungsfälle (vergl. S. 31–32):

vom Eigengewicht $H = 0,62 \text{ t}$, $V = 0,15 \text{ t}$, $M = -1,34 \text{ mt}$, und

$$M_a = -1,34 + 0,62 \cdot 7,24 - 0,15 \cdot 10,05 = +1,64,$$

$$M_c = -1,34 - 0,15 + 0,62 \cdot 3,34 - 0,15 \cdot 10,05 = -0,93,$$

$$M_{c'} = -1,34 + 6,55 - 5,08 + 0,62 \cdot 1,14 - 0,15 \cdot 9,5 = -0,59,$$

$$M_e = -1,34 + 52,10 - 53,55 - 0,62 \cdot 1,26 - 0,15 \cdot 4,25 = -4,21,$$

$$M_{e'} = -1,34 + 55,00 - 53,55 - 0,62 \cdot 3,26 - 0,15 \cdot 3,70 = -2,47,$$

$$M_g = -1,34 + 63,05 - 53,55 - 0,62 \cdot 5,76 = +4,59,$$

$$M_f = -1,34 + 53,34 - 53,55 - 0,62 \cdot 3,26 + 0,15 \cdot 3,70 = -3,02,$$

$$M_{f'} = -1,34 + 50,20 - 53,55 - 0,62 \cdot 1,26 + 0,15 \cdot 4,25 = -4,83,$$

$$M_{a'} = -1,34 + 2,29 - 5,08 + 0,62 \cdot 1,14 + 0,15 \cdot 9,5 = -2,00,$$

$$M_d = -1,34 - 4,65 + 0,62 \cdot 3,34 + 0,15 \cdot 10,05 = -2,41,$$

$$M_b = -1,34 + 0,62 \cdot 7,24 + 0,15 \cdot 10,05 = +4,66 \text{ mt}$$

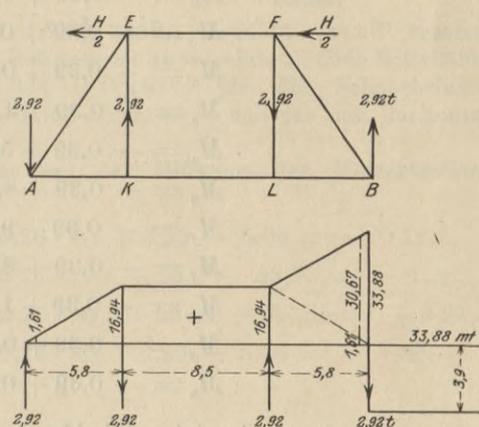


Abb. 43.

Für die Schneebelastung ist $H = 0,12^t$, $V = 0,08^t$, $M = 0,22^{mt}$, und

$$\begin{aligned} M_a &= 0,22 + 0,12 \cdot 7,24 - 0,08 \cdot 10,05 = + 0,29, \\ M_c &= 0,22 - 0,15 + 0,12 \cdot 3,34 - 0,08 \cdot 10,05 = - 0,33, \\ M_{c'} &= 0,22 + 1,62 - 1,37 + 0,12 \cdot 1,14 - 0,08 \cdot 9,5 = - 0,15, \\ M_e &= 0,22 + 13,57 - 14,44 - 0,12 \cdot 1,26 - 0,08 \cdot 4,25 = - 1,14, \\ M_{e'} &= 0,22 + 14,31 - 14,44 - 0,12 \cdot 3,26 - 0,08 \cdot 3,70 = - 0,61, \\ M_g &= 0,22 + 16,44 - 14,44 - 0,12 \cdot 5,76 = + 1,53, \\ M_{f'} &= 0,22 + 13,39 - 14,44 - 0,12 \cdot 3,26 + 0,08 \cdot 3,70 = - 0,94, \\ M_f &= 0,22 + 12,53 - 14,44 - 0,12 \cdot 1,26 + 0,08 \cdot 4,25 = - 1,50, \\ M_{d'} &= 0,22 - 0,72 - 1,37 + 0,12 \cdot 1,14 + 0,08 \cdot 9,5 = - 0,97, \\ M_d &= 0,22 - 2,63 + 0,12 \cdot 3,34 + 0,08 \cdot 10,05 = - 1,21, \\ M_b &= 0,22 + 0,12 \cdot 7,24 + 0,15 \cdot 10,05 = + 1,89^{mt}. \end{aligned}$$

Für den vertikalen Winddruck ist $H = 0,10^t$, $V = - 0,02^t$, $M = - 0,39^{mt}$, und

$$\begin{aligned} M_a &= - 0,39 + 0,1 \cdot 7,24 + 0,02 \cdot 10,05 = + 0,54, \\ M_c &= - 0,39 + 0,1 \cdot 3,34 + 0,02 \cdot 10,05 = + 0,15, \\ M_{c'} &= - 0,39 + 0,46 - 0,46 + 0,1 \cdot 1,14 + 0,02 \cdot 9,5 = - 0,09, \\ M_e &= - 0,39 + 4,8 - 4,8 - 0,1 \cdot 1,26 + 0,02 \cdot 4,25 = - 0,43, \\ M_{e'} &= - 0,39 + 5,26 - 5,06 - 0,1 \cdot 3,26 + 0,02 \cdot 3,70 = - 0,44, \\ M_g &= - 0,39 + 8,32 - 6,82 - 0,1 \cdot 5,76 = + 0,53, \\ M_{f'} &= - 0,39 + 9,15 - 8,58 - 0,1 \cdot 3,26 - 0,02 \cdot 3,70 = - 0,37, \\ M_f &= - 0,39 + 8,84 - 8,84 - 0,1 \cdot 1,26 - 0,02 \cdot 4,25 = - 0,60, \\ M_{d'} &= - 0,39 + 1,26 - 0,84 + 0,1 \cdot 1,14 - 0,02 \cdot 9,5 = - 0,05, \\ M_d &= - 0,39 + 0,1 \cdot 3,34 - 0,02 \cdot 10,05 = - 0,26, \\ M_b &= - 0,39 + 0,1 \cdot 7,24 - 0,02 \cdot 10,05 = + 0,12^{mt}. \end{aligned}$$

Für den horizontalen Winddruck ist $H = 1,30^t$, $V = - 0,58^t$, $M = - 12,13^{mt}$, und

$$\begin{aligned} M_a &= - 12,13 + 1,3 \cdot 7,24 + 0,58 \cdot 10,05 = + 3,11, & M_c &= - 12,13 + 1,3 \cdot 3,34 + 0,58 \cdot 10,05 = - 1,96, \\ M_{c'} &= - 12,13 + 1,61 + 1,3 \cdot 1,14 + 0,58 \cdot 9,5 = - 3,53, \\ M_e &= - 12,13 + 16,94 - 1,3 \cdot 1,26 + 0,58 \cdot 4,25 = + 5,64, \\ M_{e'} &= - 12,13 + 16,94 - 1,3 \cdot 3,26 + 0,58 \cdot 3,70 = + 2,72, \\ M_g &= - 12,13 + 16,94 - 1,3 \cdot 5,76 = - 2,68, \\ M_{f'} &= - 12,13 - 1,03 + 16,94 - 1,3 \cdot 3,26 - 0,58 \cdot 3,70 = - 2,60, \\ M_f &= - 12,13 - 4,03 + 16,94 - 1,3 \cdot 1,26 - 0,58 \cdot 4,25 = - 3,32, \\ M_{d'} &= - 12,13 - 10,00 + 32,27 + 1,3 \cdot 1,14 - 0,58 \cdot 9,5 = + 6,11, \\ M_d &= - 12,13 - 17,66 + 33,88 + 1,3 \cdot 3,34 - 0,58 \cdot 10,05 = + 2,60, \\ M_b &= - 12,13 - 33,88 + 33,88 + 1,3 \cdot 7,24 - 0,58 \cdot 10,05 = - 8,55^{mt}. \end{aligned}$$

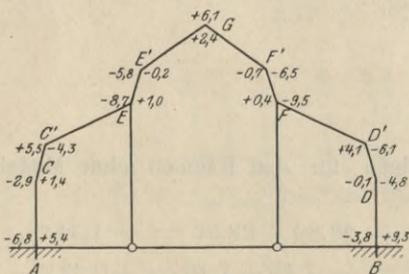


Abb. 44.

Durch Summierung dieser Momente wie auf S. 32 erhält man:

bei Winddruck rechts

bei Winddruck links

$$M_a = 1,64 + \frac{0,29}{2} + 0,54 + 3,11 = + 5,44,$$

$$M_a = 1,64 \left(+ \frac{0,29}{2} \right) + 0,12 - 8,55 = - 6,79,$$

$$M_c = - 0,93 - \frac{0,33}{2} + 0,15 - 1,96 = - 2,91,$$

$$M_c = - 0,93 \left(- \frac{0,33}{2} \right) - 0,26 + 2,60 = + 1,41,$$

$$M_{c'} = - 0,59 - \frac{0,15}{2} - 0,09 - 3,53 = - 4,29,$$

$$M_{c'} = - 0,59 \left(- \frac{0,15}{2} \right) - 0,05 + 6,11 = + 5,47,$$

$$M_e = - 4,21 \left(- \frac{1,14}{2} \right) - 0,43 + 5,64 = + 1,00,$$

$$M_e = - 4,21 - \frac{1,14}{2} - 0,60 - 3,32 = - 8,70,$$

$$M_{e'} = - 2,47 \left(- \frac{0,61}{2} \right) - 0,44 + 2,72 = - 0,19,$$

$$M_{e'} = - 2,47 - \frac{0,61}{2} - 0,37 - 2,60 = - 5,75,$$

$$M_g = 4,59 + 1,53 \left(\frac{+ 0,53 - 2,68}{2} \right) = + 6,12,$$

$$M_g = 4,59 \left(+ \frac{1,53}{2} \right) + 0,53 - 2,68 = + 2,44,$$

$$M_{f'} = - 3,02 - \frac{0,94}{2} - 0,37 - 2,60 = - 6,46,$$

$$M_{f'} = - 3,02 \left(- \frac{0,94}{2} \right) - 0,44 + 2,72 = - 0,74,$$

bei Winddruck rechts

$$M_f = -4,83 - \frac{1,50}{2} - 0,60 - 3,32 = -9,50,$$

$$M_{d'} = -2,00 \left(-\frac{0,97}{2} \right) - 0,05 + 6,11 = +4,06,$$

$$M_d = -2,41 \left(-\frac{1,21}{2} \right) - 0,26 + 2,60 = -0,07,$$

$$M_b = 4,66 \left(+\frac{1,89}{2} \right) + 0,12 - 8,55 = -3,77,$$

bei Winddruck links

$$M_f = -4,83 \left(-\frac{1,50}{2} \right) - 0,43 + 5,64 = +0,38,$$

$$M_{d'} = -2,00 - \frac{0,97}{2} - 0,09 - 3,53 = -6,11,$$

$$M_d = -2,41 - \frac{1,21}{2} + 0,15 - 1,96 = -4,83,$$

$$M_b = 4,66 + \frac{1,89}{2} + 0,54 + 3,11 = +9,26 \text{ mt.}$$

Bei dem Rahmen mit zwei Gelenken ist die Wirkung der Gegendrücke in derselben Weise zu berücksichtigen, nur ist die x -achse durch die Gelenke zu legen, so daß man aus den Zahlenwerten auf S. 34 erhält (bei y_s ist 7,24 zu addieren oder 13 - y' anzunehmen):

$$\text{für das Eigengewicht: } X = 2 \{ 245,3 \cdot 11,75 + 110,8 \cdot 9,5 + 169,4 \cdot 7,63 + 5,8 \cdot 5,37 \} : 2422,1 = +4,344 \text{ t,}$$

$$\text{für die Schneebelastung } X = 2 \{ 66,1 \cdot 11,75 + 29,9 \cdot 9,5 + 45,7 \cdot 7,63 + 1,6 \cdot 5,37 \} : 2422,1 = +1,176 \text{ t,}$$

$$\text{für den vertikalen Winddruck: } X = \{ 1,0 \cdot 5,37 + 28,0 \cdot 7,63 + 1,81 \cdot 9,49 + 35,3 \cdot 11,70 + 27,2 \cdot 11,81 + 10,2 \cdot 9,51 + 15,2 \cdot 7,63 + 0,5 \cdot 5,37 \} : 2422,1 = +0,553 \text{ t, für den horizontalen Winddruck vom Trapez } \frac{16,94}{53,55} \cdot 4,61 = 1,458$$

und vom Dreieck und Rechteck $X = \{ 73,3 \cdot 4,98 + 88,6 \cdot 6,90 + 132,1 \cdot 1,95 \} : 2422,1 = 0,509$, somit zusammen $1,458 + 0,509 = +1,967 \text{ t}$. Diese Werte sind wieder von denjenigen für den Rahmen mit zwei Gelenken ohne Mittelstützen abzuziehen, und man erhält für das Eigengewicht $H = 4,604 - 4,344 = 0,260 \text{ t}$, für die Schneebelastung $1,171 - 1,176 = -0,005 \text{ t}$, für den vertikalen Winddruck $H = 0,617 - 0,553 = 0,064 \text{ t}$, und für den horizontalen Winddruck $H = -0,282 + 1,967 = 1,685 \text{ t}$ (s. S. 31).

Die Momente sind nun wie auf S. 33 zu berechnen, und zwar mit der Differenz der Momentenflächen (s. S. 35), so daß man für das Eigengewicht erhält $H = 0,260 \text{ t}$, und

$$M_a = 0, \quad M_c = -0,26 \cdot 3,9 - 0,15 = -1,16,$$

$$M_e = -0,26 \cdot 8,5 + 52,1 - 53,55 = -3,66,$$

$$M_g = -0,26 \cdot 13 + 63,05 - 53,55 = +6,12,$$

$$M_f = -0,26 \cdot 8,5 + 50,2 - 53,55 = -5,56,$$

$$M_{d'} = -0,26 \cdot 3,9 - 4,65 = -5,66, \quad M_b = 0.$$

$$M_{c'} = -0,26 \cdot 6,1 + 6,55 - 5,08 = -0,12,$$

$$M_{e'} = -0,26 \cdot 10,5 + 55,0 - 53,55 = -1,28,$$

$$M_{f'} = -0,26 \cdot 10,5 + 53,34 - 53,55 = -2,94,$$

$$M_{d''} = -0,26 \cdot 6,1 + 2,29 - 5,08 = -4,38,$$

Ebenso für die Schneebelastung $H = -0,005 \text{ t}$, und

$$M_a = 0, \quad M_b = 0,005 \cdot 3,9 - 0,15 = -0,13,$$

$$M_e = 0,005 \cdot 8,5 + 13,57 - 14,44 = -0,82,$$

$$M_g = 0,005 \cdot 13 + 16,44 - 14,44 = +2,07,$$

$$M_f = 0,005 \cdot 8,5 + 12,53 - 14,44 = -1,86,$$

$$M_{d'} = 0,005 \cdot 3,9 - 2,63 = -2,61,$$

$$M_{c'} = 0,005 \cdot 6,1 + 1,62 - 1,37 = +0,28,$$

$$M_{e'} = 0,005 \cdot 10,5 + 14,31 - 14,44 = -0,08,$$

$$M_{f'} = 0,005 \cdot 10,5 + 13,39 - 14,44 = -1,00,$$

$$M_{d''} = 0,005 \cdot 6,1 - 0,72 - 1,37 = -2,06,$$

$$M_b = 0.$$

Ferner für den vertikalen Winddruck $H = 0,064 \text{ t}$, und

$$M_a = 0, \quad M_c = -0,064 \cdot 3,9 = -0,25,$$

$$M_e = -0,064 \cdot 8,5 + 4,8 - 4,8 = -0,54,$$

$$M_g = -0,064 \cdot 13 + 8,32 - 6,82 = +0,67,$$

$$M_f = -0,064 \cdot 8,5 + 8,84 - 8,84 = -0,54,$$

$$M_{d'} = -0,064 \cdot 3,9 = -0,25,$$

$$M_{c'} = -0,064 \cdot 6,1 + 0,46 - 0,46 = -0,39,$$

$$M_{e'} = -0,064 \cdot 10,5 + 5,26 - 5,06 = -0,47,$$

$$M_{f'} = -0,064 \cdot 10,5 + 9,15 - 8,58 = -0,10,$$

$$M_{d''} = -0,064 \cdot 6,1 + 1,26 - 0,84 = +0,03,$$

$$M_b = 0.$$

Endlich für den horizontalen Winddruck $H = 1,685 \text{ t}$, und

$$M_a = 0,$$

$$M_c = -1,685 \cdot 3,9 = -6,57,$$

$$M_{c'} = -1,685 \cdot 6,1 + 1,61 = -8,67,$$

$$M_e = -1,685 \cdot 8,5 + 16,94 = +2,62,$$

$$M_{e'} = -1,685 \cdot 10,5 + 16,94 = -0,75,$$

$$M_g = -1,685 \cdot 13 + 16,94 = -4,97,$$

$$M_{f'} = -1,685 \cdot 10,5 - 1,03 + 16,94 = -1,78,$$

$$M_f = -1,685 \cdot 8,5 - 4,03 + 16,94 = -1,41, \quad M_{d'} = -1,685 \cdot 6,1 - 10,0 + 32,27 = +11,99,$$

$$M_{d''} = -1,685 \cdot 3,9 - 17,66 + 33,88 = +9,65, \quad M_b = 0.$$

Durch die Summierung dieser Momente wie auf S. 32 erhält man $M_a = M_b = 0$,

bei Winddruck rechts

$$M_c = -1,16 - \frac{0,13}{2} - 0,25 - 6,57 = -8,05,$$

$$M_{c'} = -0,12 \left(+\frac{0,28}{2} \right) - 0,39 - 8,67 = -9,18,$$

bei Winddruck links

$$M_c = -1,16 \left(-\frac{0,13}{2} \right) - 0,25 + 9,65 = +8,24,$$

$$M_{c'} = -0,12 + \frac{0,28}{2} + 0,03 + 11,99 = +12,04,$$

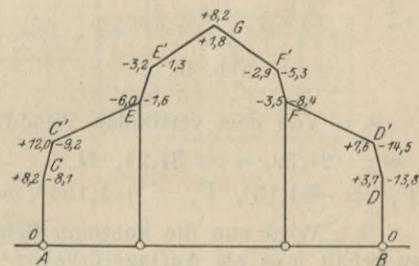


Abb. 45.

bei Winddruck rechts

$$\begin{aligned}
 M_e &= -3,66 \left(-\frac{0,82}{2} \right) - 0,54 + 2,62 = -1,58, \\
 M_{e'} &= -1,28 \left(-\frac{0,08}{2} - 0,47 - 0,75 \right) = -1,28, \\
 M_g &= 6,12 + 2,07 \left(\frac{+0,67 - 4,97}{2} \right) = +8,19, \\
 M_{f'} &= -2,94 - \frac{1,00}{2} - 0,10 - 1,78 = -5,32, \\
 M_f &= -5,56 - \frac{1,86}{2} - 0,54 - 1,41 = -8,44, \\
 M_{a'} &= -4,38 \left(-\frac{2,06}{2} \right) + 0,03 + 11,99 = +7,64, \\
 M_a &= -5,66 \left(-\frac{2,61}{2} \right) - 0,25 + 9,65 = +3,74,
 \end{aligned}$$

bei Winddruck links

$$\begin{aligned}
 M_e &= -3,66 - \frac{0,82}{2} - 0,54 - 1,41 = -6,02, \\
 M_{e'} &= -1,28 - \frac{0,08}{2} - 0,10 - 1,78 = -3,20, \\
 M_g &= 6,12 \left(+\frac{2,07}{2} \right) + 0,67 - 4,97 = +1,82, \\
 M_{f'} &= -2,94 \left(-\frac{1,00}{2} - 0,47 - 0,75 \right) = -2,94, \\
 M_f &= -5,56 \left(-\frac{1,86}{2} \right) - 0,54 + 2,62 = -3,48, \\
 M_{a'} &= -4,38 - \frac{2,06}{2} - 0,39 - 8,67 = -14,47, \\
 M_a &= -5,66 - \frac{2,61}{2} - 0,25 - 6,57 = -13,79 \text{ mt.}
 \end{aligned}$$

In Abb. 15 sind die Momente für diskontinuierliche Berechnung der Gegendrücke mit denjenigen für die kontinuierliche Berechnung derselben und mit der genauen Berechnung derselben verglichen, und es soll daher noch auf die beiden letzteren Berechnungen hingewiesen werden.

Die große Abweichung der kontinuierlichen Berechnung von den beiden anderen, welche fast genau übereinstimmen, zeigt, daß ein Rahmen mit Mittelstützen nicht kontinuierlich berechnet werden kann, indem die festen Ecken eine Kontinuität verhindern. Deshalb hat sich auch bei der genauen Berechnung der Gegendrücke für das dreifach statisch unbestimmte System des festen Rahmens mit Gelenken bei A , B , E , F , K und L gezeigt, daß die diskontinuierliche Berechnung der Mittelstützen viel genauere Resultate ergibt als die kontinuierliche Berechnung derselben.

Die letztere kann nach der Clapeyronschen Gleichung für die in Abb. 34–36 enthaltene Belastung aus

$$M_r l_r + 2 M_{r+1} (l_r + l_{r+1}) + 2 M_{r+2} l_{r+1} = -\frac{1}{l_r} \sum P \cdot a (l_r^2 - a^2) - \frac{1}{l_{r+1}} \sum^{r+1} P b (l_{r+1}^2 - b^2)$$

berechnet werden, so daß man erhält: $M_1 \cdot 5,8 + 2 M_2 (5,8 + 8,5) + M_3 \cdot 8,5 = -m$,

$$M_2 \cdot 8,5 + 2 M_3 (8,5 + 5,8) + M_4 \cdot 5,8 = -n,$$

und bei Einsetzung der Lasten P in den Abständen a vom linken und b vom rechten Auflager der Oeffnungen r und $r+1$ ergibt sich für das Eigengewicht $m = 239,05 (-5,8 \cdot 0,15) = 238,18$ und $n = 239,05 (-5,8 \cdot 4,65) = 212,05$ (da $M_1 = -0,15$ und $M_4 = -4,65$ ist), und hieraus $M_2 = \frac{-28,6 m + 8,5 n}{28,6^2 - 8,5^2} = -6,72 \text{ mt}$ und $M_3 = \frac{-28,6 n + 8,5 m}{28,6^2 - 8,5^2} = -5,42 \text{ mt}$.

Die Auflagerdrücke ergeben sich aus den Gleichungen $V_r' = \frac{M_{r+1} - M_r}{l_r} + \frac{\sum P \cdot (l_r - a)}{l_r}$, $V_r'' = \frac{M_{r+1} - M_r}{l_r} - \frac{\sum P \cdot a}{l_r}$, wo $a =$ den Abständen der Lasten P vom linken Auflager und M_r sowie M_{r+1} , mit ihren Vorzeichen einzusetzen sind.

Man erhält alsdann für das Eigengewicht die Werte $V_1' = -2,96 \text{ t}$, $V_2' = +5,55 \text{ t}$, $V_2'' = -5,25 \text{ t}$, $V_3' = +1,96 \text{ t}$ und die Auflagerdrücke aus $Q_r = V_r' - V_{r-1}'$, somit $Q_2 = 8,51 + 2,0 = 10,51 \text{ t}$, $Q_3 = 7,21 + 2,0 = 9,21 \text{ t}$.

Bei A und B erhält man $Q_1 = V_1' = 3,04 + 0,5 = 3,54 \text{ t}$ und $Q_4 = V_3'' = 4,04 + 1,5 = 5,54 \text{ t}$.

In derselben Weise erhält man für die Schneebelastung $m = 68,04 (-5,8 \cdot 0,15) = 67,17$ und $n = 68,04 (-5,8 \cdot 2,63) = 52,79$ und hieraus wie oben $M_2 = -1,97 \text{ mt}$, $M_3 = -1,26 \text{ mt}$ und die Auflagerdrücke ergeben sich aus $V_1' = -0,85 \text{ t}$, $V_2' = +1,53 \text{ t}$, $V_2'' = -1,37 \text{ t}$, $V_3' = +0,30 \text{ t}$, somit ist $Q_2 = 2,38 + 0,5 = 2,88 \text{ t}$, $Q_3 = 1,67 + 0,5 = 2,17 \text{ t}$ und bei A' und B' : $Q_1 = V_1' = 0,55 + 0,5 = 1,05 \text{ t}$, $Q_4 = V_3'' = 1,10 + 1,30 = 2,40 \text{ t}$.

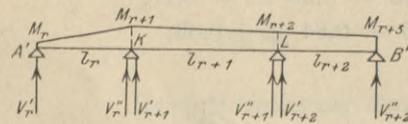


Abb. 46.

Von dem vertikalen Winddruck erhält man:

$$m = 21,79, n = 37,21, M_2 = -0,41 \text{ mt}, M_3 = -1,18 \text{ mt}, V_1'' = -0,071 \text{ t}, V_2' = +0,264 \text{ t}, V_2'' = -1,13 \text{ t}, V_3' = +1,154 \text{ t},$$

somit $Q_2 = 0,335 \text{ t}$, $Q_3 = 2,290 \text{ t}$ und $Q' = V_1' = -0,071 \text{ t}$, $Q_4 = V_3'' = +0,736 \text{ t}$.

Wird nun die kontinuierliche Berechnung der Stützen mit der Rahmenberechnung ohne Mittelstützen verbunden, so erhält man als Auflagerdrücke:

$$\text{beim Eigengewicht: } A' = 13,68 - 3,54 = 10,12 \text{ t}, B' = 15,12 - 5,54 = 9,58 \text{ t}, K = 10,51 \text{ t}, L = 9,21 \text{ t},$$

$$\text{bei der Schneebelastung: } A' = 3,73 - 1,05 = 2,68 \text{ t}, B' = 4,77 - 2,40 = 2,37 \text{ t}, K = 2,88 \text{ t}, L = 2,17 \text{ t},$$

$$\text{beim vertikalen Winddruck: } A' = 0,828 - (-0,071) = 0,899 \text{ t}, B' = 2,462 - 0,736 = 1,726 \text{ t}, K = 0,335 \text{ t}, L = 2,290 \text{ t}.$$

Hierbei ist $A' + B' = K + L$, und mit diesen Auflagerdrücken der vier Stützen erhält man die untengezeichneten Vierecke als Momentenflächen, und es ergibt sich wie oben beim Zweigelenrahmen für die einzelnen Trapeze mit ihren Schwerpunktsabständen x_s und $y_s = 13 - y'$:

$$\text{beim Eigengewicht: } X = +4,618 \text{ t und als Differenz } 4,604 - 4,618 = -0,014 \text{ t},$$

$$\text{bei der Schneebelastung: } X = +1,189 \text{ t und als Differenz } 1,171 - 1,189 = -0,018 \text{ t},$$

$$\text{beim vertikalen Winddruck: } X = +0,618 \text{ t und als Differenz } 0,620 - 0,618 = +0,02 \text{ t},$$

wobei die wirklichen Auflagerdrücke aus der kontinuierlichen Berechnung

$A = 13,68 - 10,12 = 3,54^t$ für Eigengewicht, $A = 3,73 - 2,68 = 1,05^t$ für Schneebelastung, $A = 0,828 - 0,899 = -0,071^t$ für vertikalen Winddruck sind (ebenso ist $B = 5,54^t$, bzw. $= 2,40^t$ und $= 0,736^t$).

Für den horizontalen Winddruck gilt die obige Berechnung für den Zweigelenrahmen mit diskontinuierlichen Mittelstützen.

Bei der Berechnung des dreifach statisch unbestimmten Zweigelenrahmens nach Professor Dr. Müller-Breslau haben sich die folgenden Auflagerdrücke ergeben, und zwar

für das Eigengewicht: $Q_1 = 4,07^t$, $Q_2 = 9,94^t$, $Q_3 = 8,77^t$, $Q_4 = 6,02^t$,
zusammen $28,80^t$,

ebenso diskontinuierlich: $Q_1 = 13,68 - 9,23 = 4,45^t$, $Q_2 = 9,23^t$, $Q_3 = 9,23^t$,
 $Q_4 = 15,12 - 9,23 = 5,89^t$, zusammen $28,80^t$,

und kontinuierlich: $Q_1 = 3,54^t$, $Q_2 = 10,51^t$, $Q_3 = 9,21^t$, $Q_4 = 5,54^t$,
zusammen $28,80^t$,

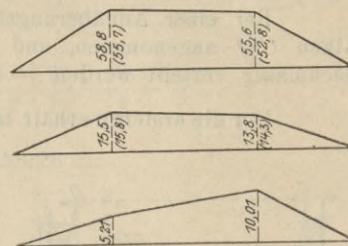


Abb. 47.

und man erhält für die eingeklammerten Zahlen in Abb. 47: $X = 4,405^t$ und als Differenz (s. S. 31) $X = 4,604 - 4,405 = +0,199^t$ statt $0,205^t$ der graphischen Berechnung.

Für die Schneebelastung ergibt sich $Q_1 = 1,006^t$, $Q_2 = 2,904^t$, $Q_3 = 2,296^t$, $Q_4 = 2,294^t$, zusammen $8,50^t$, ebenso diskontinuierlich $Q_1 = 3,73 - 2,49 = 1,24^t$, $Q_2 = 2,49^t$, $Q_3 = 2,49^t$, $Q_4 = 4,77 - 2,48 = 2,28^t$, zusammen $8,50^t$, und kontinuierlich $Q_1 = 1,05^t$, $Q_2 = 2,88^t$, $Q_3 = 2,17^t$, $Q_4 = 2,40^t$, zusammen $8,50^t$, und man erhält für die eingeklammerten Zahlen in Abb. 47: $X = 1,224^t$ und als Differenz (s. S. 31) $X = 1,171 - 1,224 = -0,047$ statt $-0,045^t$ der graphischen Berechnung.

Die eingeklammerten Zahlen haben sich hierbei aus den Auflagerdrücken:

beim Eigengewicht: $A' = 13,68 - 4,07 = 9,61^t$, $B' = 15,12 - 6,02 = 9,10^t$, somit $A' + B' = K + L = 18,71^t$, bei der Schneebelastung: $A' = 3,73 - 1,006 = 2,724^t$, $B' = 4,77 - 2,294 = 2,476^t$ somit $A' + B' = K + L = 5,20^t$ ergeben. Der Winddruck konnte nicht verglichen werden, da er in schiefer Richtung (statt der vertikalen und horizontalen Komponenten) graphisch berechnet wurde.

IV. Berechnung eines Güterschuppens ohne und mit oberen Gelenken sowie Mittelstützen.

1. Berechnung des eingespannten Rahmens mit oberen Gelenken.

Die Belastungsannahmen sind für das Hauptdach: Bimsbeton $1:2:4$ ($6,5^{\text{cm}}$ stark) 120^{kg} , Doppelklebepappe mit Anstrich 15^{kg} , Eigengewicht der Binder, Unterzüge und Anschlüsse aus Eisen 20^{kg} , Wind senkrecht nach unten (für die Neigung $1:10$) 10^{kg} , zusammen mit Berücksichtigung des Oberlichts in der Mitte rund $170^{\text{kg/qm}}$. Hierzu

kommt die halbe Schneelast von $\frac{75}{2}^{\text{kg/qm}}$

(bei ganzem Winddruck von $150^{\text{kg/qm}}$), oder die ganze Schneelast von $75^{\text{kg/qm}}$ (bei halbem Winddruck von $75^{\text{kg/qm}}$), somit zusammen rund $210^{\text{kg/qm}}$ oder $250^{\text{kg/qm}}$.

Der Winddruck mit 10° Neigung gegen die Horizontale ergibt $p \cdot \sin^2(\alpha + 10)$ pro qm Grundriß und Aufriß, und für die Vordächer ist der nach oben wirkende Winddruck (für die Neigung $1:5$) von 10^{kg} und außerdem 10^{kg} für die Deckenträger sowie die 10^{kg} des vertikalen Winddrucks abzuziehen, so daß hier ohne Schnee rund $140^{\text{kg/qm}}$, mit halbem Schnee rund $180^{\text{kg/qm}}$ und mit ganzem Schnee rund $220^{\text{kg/qm}}$ gerechnet werden können (die 10^{kg} des vertikalen Winddrucks werden daher nur für das Hauptdach gerechnet, und zwar der einfacheren Rechnung wegen für die ganze Dachfläche).

Die Annahme einer gleichförmigen Belastung für das Hauptdach und für die Vordächer vereinfacht die Berechnung, und ergibt angenähert dieselben Resultate. Ebenso kann das Verhältnis des mittleren Trägheitsmoments in den Säulen bei A und B zu den Trägheitsmomenten der drei Dachbinder für 9^{m} Breite (welche noch durch die Bimsbetondecke versteift werden) angenähert $= 2:1$ gesetzt werden, da eine Abweichung von diesem Verhältnis nur

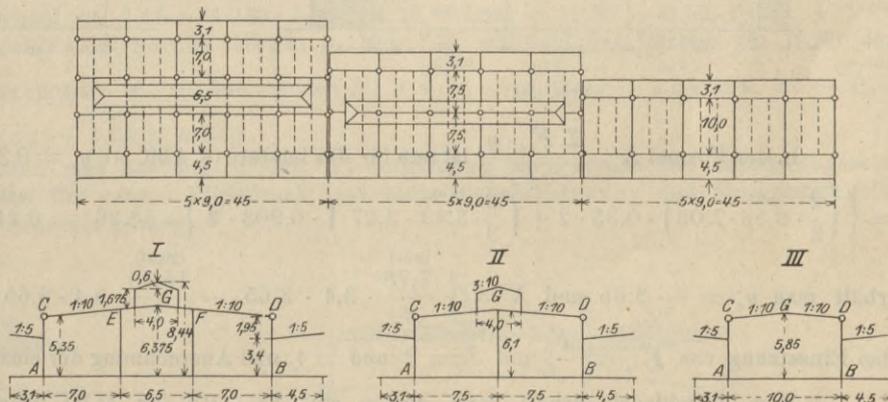


Abb. 48.

wenig ausmacht. Für den Rahmen mit Eingespanntsein bei A und B in einem Betonfundament (und zwar durch einen Eisenbetonfußboden auf Unterzügen oder durch Verankerung der eisernen Säulen in dem Fundament) sowie zwei Gelenken bei C und D kann die x -achse zur Bestimmung des Horizontalschubs durch die letzteren gelegt werden (s. Berechnung der Eisenbetonkonstruktionen 1910 S. 73), und man erhält alsdann dieselben Formeln wie für den eingespannten Rahmen mit veränderter x -achse.

Bei einer Annäherungsberechnung (zur vorläufigen Dimensionierung) kann statt des flachen Dachs ein gerader Balken CD angenommen, und die unsymmetrische Belastung der Vordächer sowie der Winddruck auf beide Säulen gleichmäßig verteilt werden.

Für die ersteren erhält man links $M_a = -9 \cdot 0,18 \cdot \frac{3,1^2}{2} = -7,78$ mt und rechts $M_b = +9 \cdot 0,18 \cdot \frac{4,5^2}{2} = 16,40$ mt,

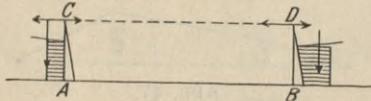


Abb. 49.

und wenn der Rahmen $ABCD$ im Gleichgewicht ist, und beide Säulen denselben Widerstand leisten (bzw. den durch das mittlere Trägheitsmoment bedingten Teil, weil die Durchbiegung proportional zu demselben ist), so wirkt die Differenz der halben Momente links in derselben und rechts in der entgegengesetzten Richtung des Moments

der Vordächer. Diese Differenz ist $= \frac{16,40 - 7,78}{2} = 4,31$ mt und es wird $M_a =$

$$= 4,31 + 7,78 = 12,09 \text{ und } M_b = 16,40 - 4,31 = 12,09 \text{ mt.}$$

Der Einfluß des Winddrucks kann angenähert dadurch bestimmt werden, daß jede Säule den halben Winddruck aufnimmt (bei verschiedenem Trägheitsmoment ist der Widerstand proportional demselben). Die 2,5 m hohe, ein Stein starke Wand kann den Winddruck von 150 kg/qm mit 5 kg/qcm Beanspruchung aufnehmen, und es ist nur die Torbreite von 3,5 m (mit Berücksichtigung der Säulen 3,6 m) und der obere Teil der 1/2 Stein starken Wand auf 9 m Breite in Rechnung zu ziehen, so daß man nach S. 40 als Moment vom Winddruck $M_a = 30,18$ mt erhält, somit pro Säule 15,09 mt. Dies ergibt zusammen bei ganzem Winddruck und halber Schneelast $M_a = 12,09 + 15,09 = 27,18$ mt und bei halbem Winddruck und ganzer Schneelast $M_a = 14,78 + 7,54 = 22,32$ mt.

Die genaue Berechnung nach den Formeln von Müller-Breslau, und zwar mit der durch die zwei Gelenke gehenden x -achse, ergibt für den Rahmen I als Trägheitsmoment:

$$T_x = \int \frac{y^2 ds}{J} = \left(\frac{10,3}{1} \cdot \frac{1,025^2}{3} + \frac{5,35}{2} \cdot \frac{5,35^2}{3} \right) \cdot 2 = 58,26.$$

Die Momentenflächen für die vertikale Belastung sind unter Berücksichtigung der Gegendrucke an den Mittelstützen, und der negativen Momente durch die Vordächer zu bestimmen. Hierbei kann jedoch infolge von Gelenken bei C und D keine Drehung von CE und DF durch die letzteren eintreten, so daß über CE , EF und DF Parabeln ohne negativen Abzug erhalten werden. Die Momentenflächen der Vordächer ergeben sich aus der Annahme $X = 0$ für die Horizontalschübe bei C und D (beim eingespannten Rahmen wird der Horizontalschub bei A und $B = 0$ angenommen, so daß die Momentenflächen oberhalb der Vordächer liegen), und es ist $M_{c'} = -7,78$ mt und $M_{d'} = +16,40$ mt. Für

das Hauptdach erhält man $M_{e'} = M_{f'} = \frac{3 \cdot 0,21 \cdot 7^2}{8} = +3,86$ und $M_g = \frac{3 \cdot 0,21 \cdot 6,5^2}{8} = 3,33$ mt, indem auf die

durchgehenden Hauptdachbinder nur $\frac{1}{3}$ der Belastung für 9 m Breite fällt.

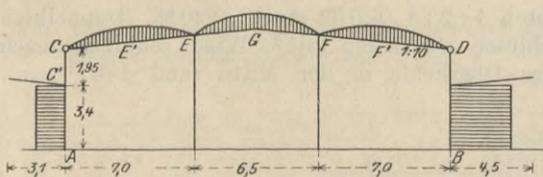


Abb. 50.

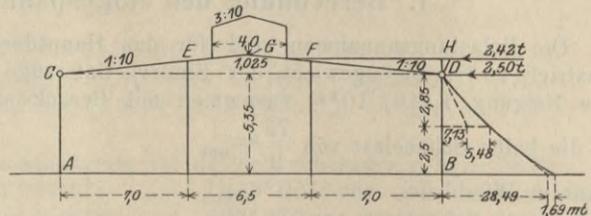


Abb. 51.

In der Formel $X = \frac{\sum F'_0 \cdot y_s}{T_x}$ ist nun für das letztere (s. Abb. 50) $y_s = 0,35$ und $= 1,025 - \frac{3}{8} \cdot \frac{3,25}{10} = 0,903$ und $X =$

$$= \left\{ \left(\frac{2}{3} \cdot 3,86 \cdot 7,03 \right) \cdot 0,35 \cdot 2 + \left(\frac{2}{3} \cdot 3,33 \cdot 3,27 \right) \cdot 0,903 \cdot 2 \right\} : 58,26 = 0,217 + 0,226 = 0,44 \text{ t, und für die ersteren}$$

erhält man $y_s = -3,65$ und $X = \left\{ \frac{7,78}{2} \cdot 3,4 \cdot 3,65 - \frac{16,40}{2} \cdot 3,4 \cdot 3,65 \right\} : 58,26 = 0,828 - 1,750 = -0,92 \text{ t}$

(bei Einsetzung von $F'_0 = \frac{F_0}{J}$ mit $J = 2$ und $= 1$, und Ausrechnung der einzelnen $\frac{\text{Produkte}}{T_x}$ mit Rechenstab).

Vom Winddruck erhält man aus $p \sin^2 (\alpha + 10)$ für 3:10 Neigung des Oberlichtdachs 30 kg/qm und für 1:10 Neigung des Hauptdachs 11 kg/qm, so daß am Fuße des Oberlichts eine Einzellast $= 0,6 \cdot 30 \cdot 9 + + 1,675 \cdot 150 \cdot 9 = 2,42 \text{ t}$ wirkt, und wenn (der Einfachheit halber) der Gegendruck nur in D angenommen wird, so ist bei H ein Moment $M = 2,42 \cdot 0,825 + (0,825 \cdot 0,011 \cdot 9) \cdot \frac{0,825}{2} = -2,03 \text{ mt}$

vorhanden. Bei 2,5 m Höhe ist: $M = 2,502 \cdot 2,85 + (0,15 \cdot 9 \cdot 2,85) \frac{2,85}{2} = 7,13 + 5,48 = -12,61 \text{ mt}$, und bei B :

$$M = 12,61 + (2,502 + 3,848) 2,5 + (3,6 \cdot 0,15 \cdot 2,5) \frac{2,5}{2} = 12,61 + 15,88 + 1,69 = -30,18 \text{ mt.}$$

Man erhält daher für die x achse CD (mit Einsetzung von $\frac{F'_0}{\sin \alpha}$ und $F'_0 = \frac{F_0}{J}$ und für den Schwerpunktsabstand des unteren Trapezes bei $\frac{2,5}{3} \cdot \frac{2 \cdot 28,49 + 12,61}{28,49 + 12,61} = 1,41$ m von der Oberkante desselben sowie demjenigen der Parabelflächen mit $\frac{1}{3} bh$ Inhalt bei $\frac{1}{4} h$):

$$X = \left\{ - \left(\frac{2,03 \cdot 8,25}{2} \right) \cdot \frac{2 \cdot 0,825}{3} + \left(\frac{7,13}{2} \cdot \frac{2,85}{2} \right) \cdot 2 \cdot \frac{2,85}{3} + \left(\frac{5,48}{3} \cdot \frac{2,85}{2} \right) \cdot \frac{3 \cdot 2,85}{4} + \left(\frac{12,61 + 28,48}{2} \cdot \frac{2,5}{2} \right) (2,85 + 1,41) + \left(\frac{1,69}{3} \cdot \frac{2,5}{2} \right) \left(5,35 - \frac{2,5}{4} \right) \right\} : 58,26 = -0,080 + 0,166 + 0,096 + 1,880 + 0,057 = +2,12^t.$$

Die in Abb. 52 eingeschriebenen Horizontalkräfte bei C und D sind daher für das Hauptdach $0,44^t$, für die Vordächer zusammen $= \frac{16,40}{5,35} = 3,07^t$, somit bei $D = 0,92^t$ und bei $C = 1,61 - 0,92 = 0,69^t$ und für den Winddruck zusammen $= \frac{30,18}{5,35} = 5,64^t$, somit bei $D = 2,12^t$ und bei $C = 5,64 - 2,12 = 3,52^t$, und dieselben sind zusammen im Gleichgewicht mit den äußeren Kräften.

Werden nun die Momente der Horizontalschübe für die einzelnen Belastungen mit den in Abb. 50—51 gezeichneten Momentenflächen verbunden, so erhält man für die Vordächer:

$$M_a = 7,78 + 5,35 \cdot 0,69 = 11,47 \text{ mt}, \quad M_b = 16,40 - 0,92 \cdot 5,35 = 11,47 \text{ mt} \text{ und für linksseitigen Winddruck: } M_a = 30,18 - 5,35 \cdot 3,52 = 11,34, \quad M_b = 2,12 \cdot 5,35 = 11,34^t, \text{ so daß die Momente bei gleichstarken Säulen links und rechts gleich groß sind. Diejenigen für das Hauptdach werden } M_a = 5,35 \cdot 0,44 = 2,35 \text{ mt} = M_b.$$

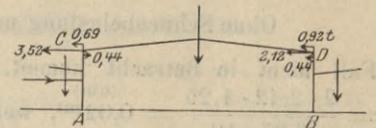


Abb. 52.

Das Vorzeichen dieser Momente geht aus der tatsächlichen Wirkung der einzelnen Horizontalschübe auf die Säulen bei A und B hervor (s. Abb. 53), und dieselben bewirken alle eine Verschiebung von links nach rechts, nur für die Belastung des Hauptdachs ist das Moment links abziehen und rechts kommt es hinzu, so daß man als Gesamtmomente erhält:

$$M_a = -2,35 + 11,34 + 11,47 = 20,46 \text{ mt} \text{ und } M_b = 2,35 + 11,34 + 11,47 = 25,16 \text{ mt}.$$

Werden die Gegendrücke der Mittelsäulen bei E und F von dem horizontalen Winddruck bzw. auch von der horizontal wirkenden Vordachbelastung berücksichtigt, so erhält man eine vertikale Zug- bzw. Druckkraft

$$= \frac{M_w}{2 \cdot 7,0} = \frac{30,18}{14,0} = 2,16^t \text{ (statt } \frac{30,18}{20,5} = 1,48^t \text{) bzw. } = \frac{11,47}{14,0} = 0,82^t \text{ (statt } \frac{11,47}{20,5} = 0,56^t \text{)}.$$

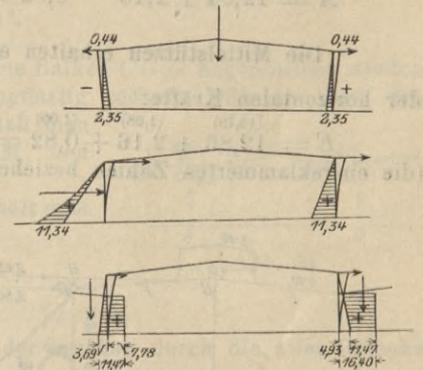


Abb. 53.

Man erhält dadurch bei E und F ein Moment $= (2,16 - 1,48) \cdot 7,0 = 4,76$ mt bzw. $= (0,82 - 0,56) \cdot 7,0 = 1,82$ mt, und zwar kann das erstere für E und F positiv oder negativ werden (s. Abb. 51), während das letztere bei E für den Gegendruck negativ und bei F für den Gegenzug positiv ist, so daß man bei E : $\pm 4,76 - 1,82 = +2,94$ bzw. $= -6,58$ und bei F : $\pm 4,76 + 1,82 = +6,58$ bzw. $= -2,94$ mt erhält.

Die unten gezeichneten Momentenflächen sind aus den in Abb. 53 enthaltenen Momentenflächen zusammengesetzt worden, und die ersteren (in Abb. 54) gelten für ganzen Winddruck und halbe Schneebelastung und die letzteren (in Abb. 55) für halben Winddruck und ganze Schneebelastung.

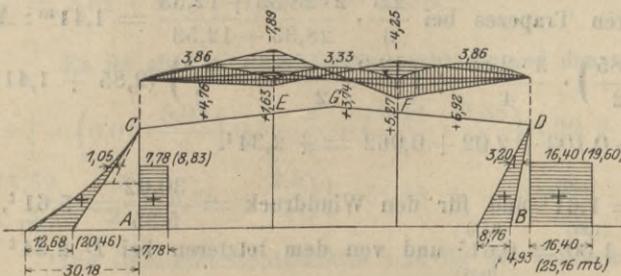


Abb. 54.

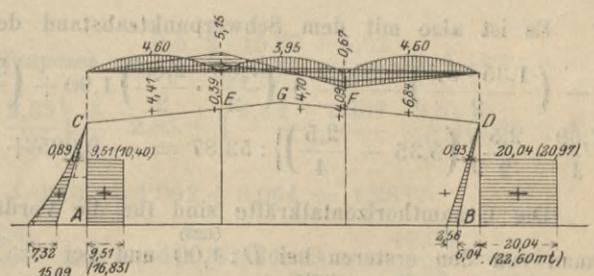


Abb. 55.

Zur Bestimmung der in dem Hauptdach bei E und F wirkenden Momente ist in Betracht zu ziehen, daß die Horizontalschübe H bei C und D einen Druck oder Zug auf den oberen Balken CGD ausüben, und daß die Werte von

H bei C und D gleich groß und entgegengesetzt gerichtet sein müssen. Dies geht auch aus den in Abb. 56 eingetragenen Horizontalkräften hervor, welche den Zug oder Druck auf den oberen Balken vergegenwärtigen.

Für den Zug durch die verschiedene Belastung der Vordächer und für den Druck durch den Wind ist dies ohne weiteres klar, und bei der vertikalen Belastung des Hauptdachs ist davon auszugehen, daß infolge Nachgiebigkeit

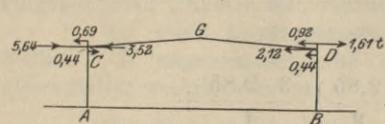


Abb. 56.

der Stützen bei A und B statt des großen Horizontalschubs $\frac{M_g}{1,025}$

$$= 0,53 \text{ t} = 0,44 \text{ t}$$

entsteht, welcher auch als Druck auf den oberen Balken wirkt. Man erhält daher $H_c = H_d = 0,44 + 2,12 - 0,69 = 1,87 \text{ t}$ und mit Berücksichtigung der obigen Momente

$$M_e = -6,58 - 0,7 \cdot 1,87 = -7,89, M_f = 6,58 - 0,7 \cdot 1,87 = +5,27 \text{ mt}$$

$$\text{bei Winddruck links, } M_e = 2,94 - 0,7 \cdot 1,87 = +1,63, M_f = -2,94 - 0,7 \cdot 1,87 = -4,25 \text{ mt}$$

bei Winddruck rechts. Für halbe Schneebelastung ohne Winddruck erhält man $H_c = H_d = 0,44 - 0,69 = -0,25 \text{ t}$ und

$$M_e = -1,82 + 0,7 \cdot 0,25 = -1,65 \text{ mt}, M_f = 1,82 + 0,7 \cdot 0,25 = +2,00 \text{ mt}$$

Ohne Schneebelastung und ohne Winddruck erhält man ein kleineres $M_g = \frac{3 \cdot 0,17 \cdot 6,5^2}{8} = 2,69 \text{ mt}$, so daß dieser

Fall nicht in Betracht kommt. Ebenso ist der Einfluß der Einzelkraft $2,42 \text{ t}$ vom Winddruck auf das Dach nur $= \frac{2 \cdot 2,42 \cdot 1,25}{3,25 \cdot 10} = 0,02 \text{ mt}$, wenn die zum Dach senkrechte Komponente $\frac{2,42}{10}$ für den Stab $FG = 3,25 \text{ m}$ berücksichtigt wird.

Hiermit erhält man auch die Horizontalschübe H , welche eine Druck- oder Zugspannung in dem Balken CGD bewirken, und sind dieselben bei einer Eisenkonstruktion für die Knickung in vertikaler Richtung zu berücksichtigen (seitlich werden die eisernen Binder durch die Bimsbetondecke festgehalten).

Zur Berechnung der eisernen Säulen (aus Blechträgern) sind noch die Auflagerdrücke zu bestimmen, und man erhält von der vertikalen Belastung:

$$A = 9 \cdot 0,18 \cdot 3,1 + 9 \cdot 0,21 \cdot 3,5 + 1,2 = 12,84 \text{ t}, B = 9 \cdot 0,18 \cdot 4,5 + 9 \cdot 0,21 \cdot 3,5 + 1,2 = 15,11 \text{ t}$$

und mit Berücksichtigung der horizontalen Kräfte wird:

$$A = 12,84 \pm 2,16 - 0,82 = 14,18 \text{ bzw. } = 9,86 \text{ t}, B = 15,11 \pm 2,16 + 0,82 = 18,09 \text{ bzw. } = 13,71 \text{ t}$$

Die Mittelstützen erhalten eine vertikale Belastung $= \frac{7 + 6,5}{2} \cdot 0,21 \cdot 9 + 0,6 = 12,86 \text{ t}$ und mit Berücksichtigung

der horizontalen Kräfte:

$$E = 12,86 \pm 2,16 + 0,82 = 15,84 \text{ bzw. } = 11,52 \text{ t}, F = 12,86 \pm 2,16 - 0,82 = 14,20 \text{ bzw. } = 9,88 \text{ t}$$

(die eingeklammerten Zahlen beziehen sich immer auf ganze Schneelast und halben Winddruck).

Für den nebengezeichneten Rahmen II mit zwei oberen Gelenken erhält man:

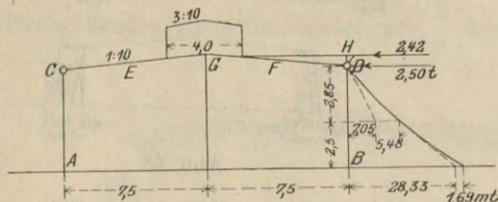


Abb. 57.

$$T_x = \left\{ \frac{5,35}{2} \cdot \frac{5,35^2}{3} + 7,53 \cdot \frac{0,75^2}{3} \right\} \cdot 2 = 53,87$$

Für das Hauptdach ist $M_e = M_f = \frac{3 \cdot 0,21 \cdot 7,5^2}{8} = 4,43 \text{ mt}$ (bei

Verteilung der Belastung auf drei Dachbinder), und bei Annahme der x achse durch die zwei Gelenke wird

$$X = \frac{\sum F'_0 \cdot y_s}{T_x} = \left\{ \left(\frac{2}{3} \cdot 4,43 \cdot 7,53 \right) \cdot 0,375 \cdot 2 \right\} : 53,87 = 0,31 \text{ t}$$

Der Horizontalschub der Vordächer ist $X = \frac{58,26}{53,87} \cdot 0,92 = -1,00 \text{ t}$.

Für den Winddruck erhält man eine horizontale Einzelkraft $2,42 \text{ t}$ im Abstand $0,55 \text{ m}$, somit bei H ein $M = 2,42 \cdot 0,55 + (0,011 \cdot 9 \cdot 0,55) \cdot \frac{0,55}{2} = -1,35 \text{ mt}$, und bei $2,5 \text{ m}$ Höhe ist $M = 2,475 \cdot 2,85 + (1,35 \cdot 2,85) \cdot \frac{2,85}{2} = 7,05 + 5,48 = -12,53 \text{ mt}$, und bei $B = 12,53 + 15,80 + 1,69 = -30,02 \text{ mt}$.

Es ist also mit dem Schwerpunktsabstand des unteren Trapezes bei $\frac{2,5}{3} \cdot \frac{2 \cdot 28,33 + 12,53}{28,33 + 12,53} = 1,41 \text{ m}$: $X =$

$$= \left\{ - \left(\frac{1,35 \cdot 5,5}{2} \right) \frac{0,55 \cdot 2}{3} + \left(\frac{7,05}{2} \cdot \frac{2,85}{2} \right) 1,90 + \left(\frac{5,48}{3} \cdot \frac{2,85}{2} \right) \cdot \frac{3 \cdot 2,85}{4} + \left(\frac{12,53 + 28,33}{2} \cdot \frac{2,5}{2} \right) (2,85 + 1,41) + \left(\frac{1,69}{3} \cdot \frac{2,5}{2} \right) \left(5,35 - \frac{2,5}{4} \right) \right\} : 53,87 = -0,025 + 0,177 + 0,103 + 2,02 + 0,062 = +2,34 \text{ t}$$

Die Gesamthorizontalkräfte sind für die Vordächer $= 1,61 \text{ t}$ und für den Winddruck $= \frac{30,02}{5,35} = 5,61 \text{ t}$, so daß man von den ersteren bei D : $1,00$ und bei C : $1,61 - 1,00 = 0,61 \text{ t}$ und von dem letzteren bei D $2,34 \text{ t}$ und bei $C = 5,61 - 2,34 = 3,27 \text{ t}$ und von dem Hauptdach bei C und D : $0,31 \text{ t}$ erhält (vgl. Abb. 53 u. 60).

Wird die Wirkung der Horizontalschübe für die einzelnen Belastungen mit deren Momentenflächen verbunden, so erhält man bei den Vordächern: $M_a = 7,78 + 5,35 \cdot 0,61 = 11,05 \text{ mt}$, $M_b = 16,40 - 5,35 \cdot 1,00 = 11,05$, und

bei linksseitigem Winddruck $M_a = 30,02 - 5,35 \cdot 3,27 = 12,52$ mt, $M_b = 5,35 \cdot 2,34 = 12,52$ mt, und vom Hauptdach $M_a = M_b = 5,35 \cdot 0,31 = 1,66$ mt, somit zusammen:

$$M_a = -1,66 + 12,52 + 11,05 = 21,91 \text{ mt}, M_b = 1,66 + 12,52 + 11,05 = 25,23 \text{ mt}.$$

Bei Berücksichtigung des Gegendrucks der Mittelsäule bei G erhält man eine vertikale Zug- bzw. Druckkraft $= \frac{M_w}{2 \cdot 7,5} = \frac{30,02}{15} =$

$$= 2,00 \text{ t vom Winddruck und } = \frac{11,05}{15} = 0,74 \text{ t von den Vordächern.}$$

Das Moment wird bei $G = 0$, da sich Zug und Druck in der Mittelsäule aufheben.

Als Horizontalschübe der Dachbinder erhält man nach Abb. 60:

$$H_c = 0,31 + 2,34 - 0,61 = 2,04 \text{ t} = H_d \text{ und}$$

$$M_g = -0,75 \cdot 2,04 = -1,53 \text{ mt.}$$

Für halbe Schneebelastung ohne Winddruck erhält man

$$H_c = 0,31 - 0,61 = -0,30 \text{ t} = H_d,$$

$$M_g = +0,75 \cdot 0,30 = +0,23 \text{ mt.}$$

Die Auflagerdrücke sind von der vertikalen Belastung:

$$A = 9 \cdot 0,18 \cdot 3,1 + 9 \cdot 0,21 \cdot 3,75 + 1,2 = 13,31 \text{ t,}$$

$$B = 9 \cdot 0,18 \cdot 4,5 + 9 \cdot 0,21 \cdot 3,75 + 1,2 = 15,58 \text{ t.}$$

Als Gesamtauflagerdrücke erhält man bei Berücksichtigung der horizontalen Kräfte:

$$A = 13,31 \pm 2,00 - 0,74 = 14,57 \text{ bzw. } 10,57 \text{ t, } B = 15,58 \pm 2,00 + 0,74 = 18,32 \text{ bzw. } 14,32 \text{ t.}$$

Die Mittelstütze erhält eine vertikale Belastung $G = \frac{7,5}{2} \cdot 0,21 \cdot 9 = 7,09 \text{ t.}$

Da auch hier oben eine teilweise Einspannung zwischen der Mittelsäule und dem Balken CGD angenommen werden kann, so genügt die diskontinuierliche Berechnung des letzteren, und wenn man ungünstig rechnen will, so kann das Stützenmoment und der Auflagerdruck für Kontinuität berücksichtigt werden, so daß man beide Fälle in Betracht zieht, und mit dem ungünstigeren Werte des positiven M_e und negativen M_g rechnet.

Für den nebeingezeichneten Rahmen III (Abb. 61) mit zwei oberen Gelenken erhält man

$$T_x = \left\{ \frac{5,35}{2} \cdot \frac{5,35^2}{3} + 5,02 \cdot \frac{0,5^2}{3} \right\} \cdot 2 = 51,88.$$

Für das Hauptdach ist $M_g = \frac{3 \cdot 0,21 \cdot 10^2}{8} = 7,88$ mt und bei Annahme der x -achse durch die zwei Gelenke

$$\text{wird mit dem Schwerpunktsabstand } \frac{3}{8} \cdot 5 = 1,875 : X = \frac{\sum F'_0 \cdot y_s}{T_x} = \left\{ \left(\frac{2}{3} \cdot 7,88 \cdot 5,02 \right) 0,3125 \cdot 2 \right\} : 51,88 = 0,32 \text{ t.}$$

Der Horizontalschub der Vordächer ist $X = \frac{58,26}{51,88} \cdot 0,92 = -1,02 \text{ t.}$

Für den Winddruck erhält man bei $H : M = (0,011 \cdot 9 \cdot 0,5) \cdot \frac{0,5}{2} = -0,01$ mt, und bei 2,5 m Höhe ist $M = 0,05 \cdot 2,85 + (1,35 \cdot 2,85) \frac{2,85}{2} = 0,14 + 5,48 = -5,62$ mt und bei $B = 5,62 + (0,05 + 3,85) 2,5 + (3,6 \cdot 0,15 \cdot 2,5) \cdot \frac{2,5}{2} = 5,62 + 9,75 + 1,69 = -17,06$ mt.

Es ist also mit dem Schwerpunktsabstand des unteren Trapezes $= \frac{2,5}{3} \cdot \frac{2 \cdot 15,37 + 5,62}{15,37 + 5,62} = 1,44$ m:

$$X = \left\{ - \left(0,01 \cdot \frac{5,02}{3} \right) 0,5 \cdot \frac{3}{4} + \left(\frac{0,14}{2} \cdot \frac{2,85}{2} \right) 1,90 + \left(\frac{5,48}{3} \cdot \frac{2,85}{2} \right) \frac{3}{4} \cdot 2,85 + \left(\frac{5,62 + 15,37}{2} \cdot \frac{2,5}{2} \right) (2,85 + 1,44) + \left(\frac{1,69}{3} \cdot \frac{2,5}{2} \right) \left(5,35 - \frac{2,5}{4} \right) \right\} : 51,88 = -0,0001 + 0,0036 + 0,107 + 1,082 + 0,064 = 1,26 \text{ t.}$$

Die Gesamthorizontalkräfte sind für die Vordächer $= 1,61$ t und für den Winddruck $= \frac{17,06}{5,35} = 3,19$ t, so daß man von den ersteren bei $D : 1,03$ t und bei $C : 1,61 - 1,03 = 0,58$ t und von dem letzteren bei $D : 1,26$ t und bei $C : 3,19 - 1,26 = 1,93$ t und von dem Hauptdach bei C und $D : 0,32$ t erhält (s. Abb. 53 u. 64).

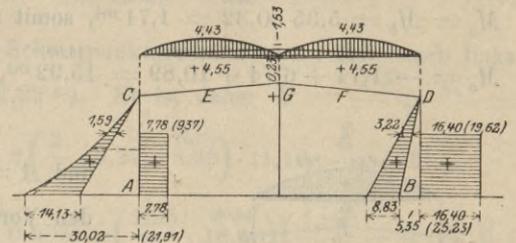


Abb. 58.

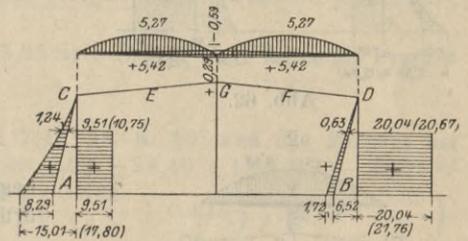


Abb. 59.

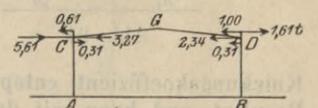


Abb. 60.

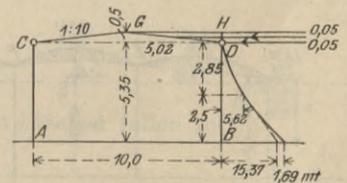


Abb. 61.

Wird die Wirkung der Horizontalschübe für die Einzelbelastungen mit deren Momentenflächen verbunden, so erhält man bei den Vordächern:

$$M_a = 7,78 + 5,35 \cdot 0,58 = 10,89 \text{ mt}, \quad M_b = 16,40 - 5,35 \cdot 1,03 = 10,89 \text{ mt}, \text{ und bei linksseitigem Winddruck}$$

$$M_a = 17,06 - 5,35 \cdot 1,93 = 6,74 \text{ mt}, \quad M_b = 5,35 \cdot 1,26 = 6,74 \text{ mt}, \text{ und vom Hauptdach}$$

$$M_a = M_b = 5,35 \cdot 0,32 = 1,71 \text{ mt}, \text{ somit zusammen:}$$

$$M_a = -1,71 + 6,74 + 10,89 = 15,92 \text{ mt}, \quad M_b = 1,71 + 6,74 + 10,89 = 19,34 \text{ mt}.$$

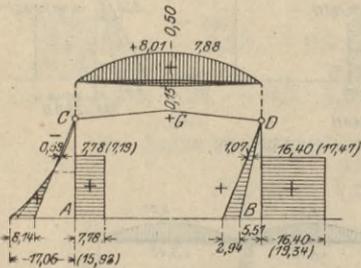


Abb. 62.

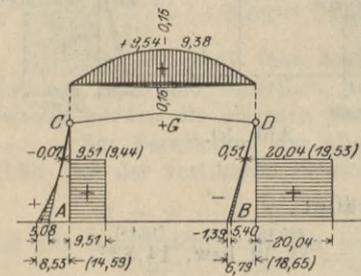


Abb. 63.

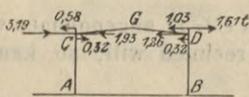


Abb. 64.

Als Gegendrücke erhält man eine vertikale Druck- und Zugkraft bei B und $A = \frac{M_w}{10} = \frac{17,06}{10} = 1,71 \text{ t}$ vom Winddruck und $= \frac{10,89}{10} = 1,09 \text{ t}$ von den Vordächern.

Als Horizontalschübe der Dachbinder erhält man nach Abb. 64:

$$H_c = H_d = 0,32 + 1,26 - 0,58 = +1,00 \text{ t} \text{ und}$$

$$M_g = -0,5 \cdot 1,00 = -0,50 \text{ mt}.$$

Für halbe Schneebelastung ohne Winddruck erhält man:

$$H_c = H_d = 0,32 - 0,58 = -0,26 \text{ t}, \quad M_g = +0,5 \cdot 0,26 = +0,13 \text{ mt}.$$

Denn die Horizontalschübe bei C sind nach rechts positiv und nach links negativ, so daß hieraus auch das Vorzeichen von M_g bestimmt ist. Die Auflagerdrücke von der vertikalen Belastung sind

$$A = 9 \cdot 0,18 \cdot 3,1 + 9 \cdot 0,21 \cdot 5 + 1,2 = 15,67 \text{ t},$$

$$B = 9 \cdot 0,18 \cdot 4,5 + 9 \cdot 0,21 \cdot 5 + 1,2 = 17,94 \text{ t}.$$

Als Gesamtauflagerdrücke erhält man bei Berücksichtigung der horizontalen Kräfte:

$$A = 15,67 \pm 1,71 - 1,09 = 16,29 \text{ t} \text{ bzw. } 12,87 \text{ t},$$

$$B = 17,94 \pm 1,71 + 1,09 = 20,74 \text{ t} \text{ bzw. } 17,32 \text{ t}.$$

Die Dimensionierung der aus Blechträgern und I-Balken bestehenden Säulen und Dachbinder erfolgt aus der Summierung der Spannungen für M_x und N_x

(bzw. A oder B) durch $\sigma_e = \frac{M_x}{W} + \frac{N_x}{F} \cdot k$, wenn $k = 1 + 0,0001 \cdot \frac{F^0 \cdot l^2}{J^0}$ dem

Knickungskoeffizient entspricht (die Reduktion der zulässigen Spannung durch den Knickkoeffizient ergibt dasselbe Resultat, und kann mit der ersteren bis zu 1400 kg gegangen werden).

2. Berechnung des eingespannten Rahmens ohne obere Gelenke.

Zur Vergleichung soll derselbe Güterschuppen auch ohne obere Gelenke berechnet werden, und es kann hierbei von denselben Belastungsannahmen ausgegangen werden. Man erhält alsdann für $J_1:J_2 = 2:1$ beim Rahmen I:

$$z = \frac{\sum w \cdot y'}{\sum w} = \left\{ \frac{5,35}{2} \left(\frac{5,35}{2} + 1,025 \right) + \frac{10,3}{1} \cdot \frac{1,025}{2} \right\} : \left(\frac{5,35}{2} + \frac{10,3}{1} \right) = 1,170 \text{ m} \text{ mit } G = \sum w = 5,35 + 2 \cdot 10,3 = 25,95.$$

Ebenso ist $T_x = \int \frac{y^2 ds}{J} = 58,26$ (s. o.) $- (1,17 - 1,025)^2 \cdot 25,95 = 57,7$ und $T_y = \int \frac{x^2 ds}{J} = \left\{ \frac{10,3}{1} \cdot \frac{10,25^2}{3} + \frac{5,35}{2} \cdot 10,25^2 \right\} \cdot 2 = 1283,5.$

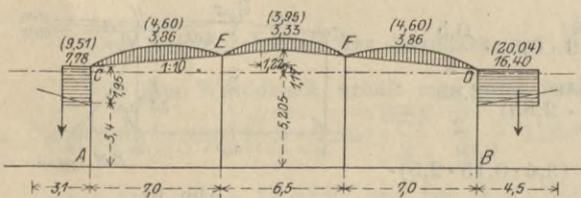


Abb. 65.

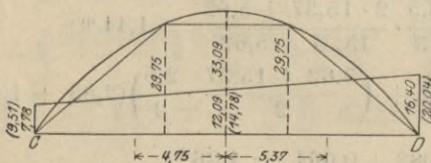


Abb. 66.

Die Momentenflächen ergeben sich aus den Auflagerdrücken der vertikalen Belastung, wobei die Wirkung der Vordächer zu berücksichtigen ist, und erhält man ohne Berücksichtigung der Mittelsäulen (der Gegendruck derselben $= 9 \cdot 0,21 \cdot 6,75 = 12,76 \text{ t}$ ist daher wieder abzuziehen):

$$A = 9 \cdot 0,21 \cdot 10,25 + 1,2 + \frac{5,02 \cdot 22,05 - 7,29 \cdot 2,25}{20,5} = 25,17 \text{ t},$$

$$B = 19,37 + 1,2 + \frac{7,29 \cdot 22,75 - 5,02 \cdot 1,55}{20,5} = 28,28 \text{ t}.$$

Doch kommt bei den Dachbindern nur 3 m Belastungsbreite in Betracht, und die in Abb. 65 gezeichneten

Momentenflächen ergeben sich aus der Differenz der Parabel in Abb. 66 mit $\frac{3 \cdot 0,21 \cdot 20,5^2}{8} = 33,09 \text{ mt}$ Höhe, und des in

dieselbe einbeschriebenen Trapezes von den Gegendrücken bei E und $F = 3 \cdot 0,21 \cdot 6,75 = 4,25^t$ mit $M_e = M_f = 7 \cdot 4,25 = 29,75^t$. Die Momente des Hauptdachs werden daher $M_e = M_f = \frac{7^2 \cdot 0,21 \cdot 3}{8} = 3,86^t$,

$M_g = \frac{6,5^2 \cdot 0,21 \cdot 3}{8} = 3,33^t$, und von den Vordächern erhält man die beiderseitigen Rechtecke mit $M_c = -7,78$,

$M_d = -16,40^t$, und das über CD liegende negative Trapez und seine Schwerpunktsabstände $= 4,75^m$ nach links und $= 5,37^m$ nach rechts (in der oberen Parabel erhält man $\frac{3}{8} \cdot 3,25 = 1,22^m$). Es ist daher $X = \frac{\sum F'_0 \cdot y_s}{T_x} =$

$$= \left\{ \left(\frac{1,95 \cdot 7,78}{2} \right) \left(\frac{1,95}{2} - 0,145 \right) + 2 \left(\frac{2}{3} \cdot 7,03 \cdot 3,86 \right) (0,145 + 0,35) + 2 \left(\frac{2}{3} \cdot 3,27 \cdot 3,33 \right) \cdot (1,17 - 0,122) - \left(\frac{7,78 + 12,09}{2} \cdot 10,3 \right) (1,17 - 0,475) - \left(\frac{12,09 + 16,40}{2} \cdot 10,3 \right) (1,17 - 0,537) + \left(\frac{1,95 \cdot 16,40}{2} \right) \left(\frac{1,95}{2} - 0,145 \right) \right\} :$$

$$: 57,7 = -1,93^t, Y = \frac{\sum F'_0 \cdot x_s}{T_y} = \left\{ -7,59 \cdot 10,25 - 102,33 \cdot 4,75 + 146,72 \cdot 5,37 + 15,99 \cdot 10,25 \right\} : 1283,5 = +0,30^t,$$

und $Z = -\frac{\sum F'_0}{G} = -\left\{ -7,59 + 36,18 + 14,52 - 102,33 - 146,72 - 15,99 \right\} : 25,95 = +8,55^t$ (in Y fallen die symmetrischen Flächen fort).

Für den Winddruck erhält man die Momentenfläche aus der Einzelkraft $2,42^t$ (s. S. 40) und das Moment bei $D = -2,03^t$, bei $2,5^m$ Höhe $= 2,03 + 7,13 + 5,48 = -14,64^t$ und bei $B = 2,03 + 28,49 + 1,69 = -32,21^t$ ($2,03$ kommt zu den Momenten in Abb. 51). Hierfür ist $X = \left\{ -\left(\frac{2,03 \cdot 8,28}{2} \right) \left(\frac{0,825}{3} + 0,145 \right) + \left(2,03 \cdot \frac{5,35}{2} \right) \cdot \left(\frac{5,35}{2} - 0,145 \right) + \left(\frac{7,13 \cdot 2,85}{2} \right) \left(\frac{2}{3} \cdot 2,85 - 0,145 \right) + \left(\frac{5,48}{3} \cdot \frac{2,85}{2} \right) \left(\frac{3}{4} \cdot 2,85 - 0,145 \right) + \left(\frac{12,61 + 28,48}{2} \cdot \frac{2,5}{2} \right) (4,26 - 0,145) + \left(\frac{1,69 \cdot 2,5}{3} \right) \left(5,35 - 0,145 - \frac{2,5}{4} \right) \right\} : 57,7 =$

$$= +2,31^t, Y = \left\{ 8,40 \left(10,25 - \frac{8,25}{3} \right) + (5,43 + 5,08 + 2,60 + 25,68 + 0,70) 10,25 \right\} : 1283,5 = +0,365^t, Z = -\left\{ -8,40 - 39,49 \right\} : 25,95 = +1,85^t.$$

Durch die Mittelstützen entsteht eine vertikale Zug- bzw. Druckkraft $= \frac{M_w}{2 \cdot 7} = \frac{32,21}{14} = 2,30^t$ statt $\frac{32,21}{20,5} = 1,57^t$ oder eine Differenz $2,30 - 1,57 = 0,73^t$ mit dem Moment $0,73 \cdot 7 = 5,11^t$. Die genaue Berechnung ergibt sich aus der nebengezeichneten Darstellung der Momentenfläche durch die Gegendrücke, und es ist hierfür:

$$X = \left\{ 2 \left(\frac{7,03 \cdot 16,10}{2} \right) \left(\frac{2 \cdot 7}{3 \cdot 10} + 0,145 \right) + 2 \left(3,27 \cdot 16,10 \right) \left(1,17 - \frac{3,25}{2 \cdot 10} \right) + \left(\frac{7,03 \cdot 32,21}{2} \right) \left(\frac{7}{3 \cdot 10} + 0,145 \right) - \left(\frac{5,35 \cdot 32,21}{2} \right) \left(\frac{5,35}{2} - 0,145 \right) \right\} : 57,7 = 0,$$

$$Y = \left\{ -113,22 \left(3,25 + \frac{2 \cdot 7}{3} \right) - 86,16 \cdot 10,25 \right\} : 1283,5 = -1,39^t \text{ (die symmetrischen Flächen fallen fort),}$$

$$Z = -\left\{ 113,18 + 105,29 + 113,22 + 86,16 \right\} : 25,95 = -16,10^t.$$

Für den Rahmen II erhält man in derselben Weise mit $J_1 : J_2 = 2 : 1$:

$$z = \frac{\sum w y'}{\sum w} = \left\{ \frac{5,35}{2} \left(\frac{5,35}{2} + 0,75 \right) + 7,53 \cdot \frac{0,75}{2} \right\} : \left(\frac{5,35}{2} + 7,53 \right) = 1,175^m \text{ mit } G = \sum w = 20,41.$$

Ebenso ist

$$T_x = \int \frac{y^2 ds}{J} = 53,87 - 20,41 (1,175 - 0,75)^2 = 50,2 \text{ und}$$

$$T_y = \int \frac{x^2 ds}{J} = \left\{ \frac{7,53}{1} \cdot \frac{7,5^2}{3} + \frac{5,35}{2} \cdot 7,5^2 \right\} 2 = 583,3.$$

Die Auflagerdrücke der vertikalen Belastung sind bei Berücksichtigung der Vordächer und ohne Mittelsäule (ihr Gegendruck $= \frac{9 \cdot 0,21 \cdot 7,5}{2} =$

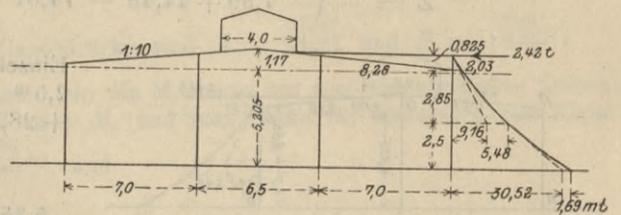


Abb. 67.

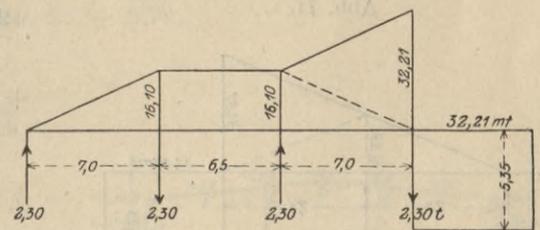


Abb. 68.

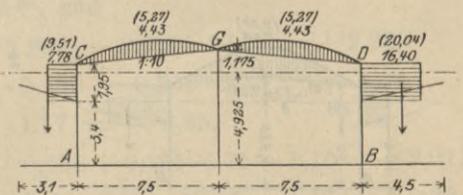


Abb. 69.

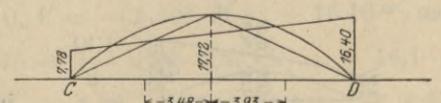


Abb. 70.

$$= \frac{14,18^{(16,88)}}{2} \text{ ist abzuziehen) : } A = 9 \cdot 0,21 \cdot 7,5 + 1,2 + \frac{5,02 \cdot 16,55 - 7,29 \cdot 2,25}{15} = 19,82^{\text{(23,51)}} \text{ t}$$

$$B = 14,175^{(16,875)} + 1,2 + \frac{7,29 \cdot 17,25 - 5,02 \cdot 1,55}{15} = 23,24^{\text{(27,69)}} \text{ t}$$

Wegen Verteilung der Belastung auf drei Dachbinder mit 3^m Abstand ergeben sich die in Abb. 69 gezeichneten Momentenflächen aus der Differenz der Parabel in Abb. 70 mit $\frac{3 \cdot 0,21 \cdot 15^2}{8} = 17,72^{\text{(21,09)}}$ mt Höhe, und des in dieselbe einbeschriebenen Dreiecks von dem Gegendruck bei $G = 3 \cdot 0,21 \cdot 7,5 = 4,73^{\text{(5,63)}}$ t mit $M_g = \frac{7,5 \cdot 4,73}{2} = 17,74^{\text{(21,11)}}$ mt.

Die Momente des Hauptdachs werden daher $M_e = M_f = \frac{3 \cdot 0,21 \cdot 7,5^2}{8} = 4,43^{\text{(5,27)}}$ mt, und von den Vordächern erhält man die beiderseitigen Rechtecke mit $M_c = -7,78^{\text{(9,51)}}$, $M_d = -16,40^{\text{(20,04)}}$ mt, und das über CD liegende negative Trapez, und seine Schwerpunktsabstände = 3,48^m nach links und = 3,93^m nach rechts.

$$\text{Es ist daher } X = \left\{ \left(\frac{1,95}{2} \cdot 7,78 \right) \left(\frac{1,95}{2} - 0,425 \right) + 2 \left(\frac{2}{3} \cdot 7,53 \cdot 4,43 \right) (0,425 + 0,375) - \left(\frac{7,78 + 12,09}{2} \cdot 7,53 \right) \right. \\ \left. (1,175 - 0,348) - \left(\frac{12,09 + 16,40}{2} \cdot 7,53 \right) (1,175 - 0,393) + \left(\frac{1,95}{2} \cdot 16,40 \right) \left(\frac{1,95}{2} - 0,425 \right) \right\} : 50,2 = -1,93^{\text{(-2,36)}}$$

$$Y = \{ -7,59 \cdot 7,5 - 74,81 \cdot 3,48 + 107,26 \cdot 3,93 + 15,99 \cdot 7,5 \} : 583,3 = +0,39^{\text{(9,27)}}$$
 t und

$$Z = - \{ -7,59 + 44,48 - 74,81 - 107,26 - 15,99 \} : 20,41 = +7,90^{\text{(9,82)}}$$
 mt.

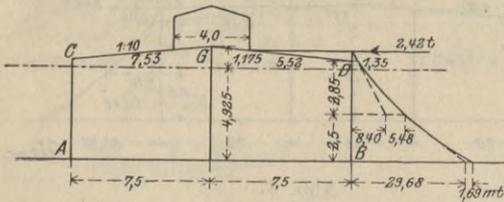


Abb. 71.

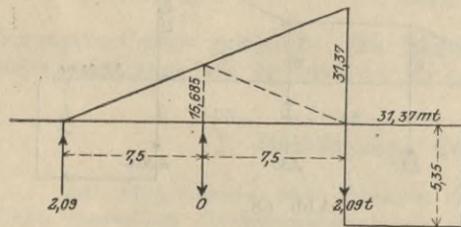


Abb. 72.

Für den Winddruck erhält man die Momentenfläche aus der Einzelkraft 2,42^t (s. S. 40) und das Moment bei $D = -1,35^{\text{mt}}$, bei 2,5^m Höhe = $1,35 + 7,05 + 5,48 = -13,88^{\text{mt}}$ und bei $B = 1,35 + 28,33 + 1,69 = 31,37^{\text{mt}}$ (1,35 kommt zu den Momenten in Abb. 57).

$$\text{Hierfür ist } X = \left\{ - \left(\frac{1,35 \cdot 5,52}{2} \right) \left(\frac{0,55}{3} + 0,425 \right) + \left(1,35 \cdot \frac{5,35}{2} \right) \cdot \left(\frac{5,35}{2} - 0,425 \right) + \left(\frac{7,05}{2} \cdot \frac{2,85}{2} \right) \left(\frac{2}{3} \cdot 2,85 - 0,425 \right) + \left(\frac{5,48}{3} \cdot \frac{2,85}{2} \right) \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot 2,85 - 0,425 \right) + \left(\frac{12,53 + 28,33}{2} \cdot \frac{2,5}{2} \right) (4,26 - 0,425) + \left(\frac{1,69}{3} \cdot \frac{2,5}{2} \right) \left(5,35 - 0,425 - \frac{2,5}{4} \right) \right\} : 50,2 = +2,37^{\text{t}}$$

$$Y = \{ 3,73 \cdot \left(7,5 - \frac{5,5}{3} \right) + (3,61 + 5,02 + 2,60 + 25,54 + 0,70) 7,5 \} : 583,3 = +0,52^{\text{t}}$$
 und $Z = - \{ -3,73 - 37,47 \} : 20,41 = +2,02^{\text{mt}}$

Die Wirkung der Mittelstütze äußert sich in dem Gegendruck am Auflager = $\frac{31,37}{2 \cdot 7,5} = 2,09^{\text{t}}$ und dem halben Moment in der Mitte

= $7,5 \cdot 2,09 = 15,685^{\text{mt}}$, und man erhält für die nebengezeichnete Momentenfläche:

$$X = \left\{ 2 \left(\frac{7,53 \cdot 15,685}{2} \right) \left(\frac{5}{10} + 0,425 \right) + \left(\frac{7,53 \cdot 31,37}{2} \right) \left(\frac{2,5}{10} + 0,425 \right) - \left(\frac{5,35}{2} \cdot 31,37 \right) \left(\frac{5,35}{2} - 0,425 \right) \right\} : 50,2 = 0,$$

$$Y = \{ -118,11 \cdot 5 - 83,91 \cdot 7,5 \} : 583,3 = -2,09^{\text{t}}$$

$$Z = - \{ 118,11 + 118,11 + 83,91 \} : 20,41 = -15,685^{\text{mt}}$$

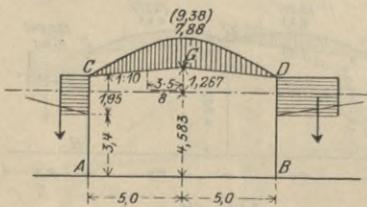


Abb. 73.

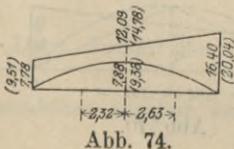


Abb. 74.

Für den Rahmen III erhält man ebenso mit $J_1 : J_2 = 2 : 1$:

$$z = \frac{\sum w y'}{\sum w} = \left\{ \frac{5,35}{2} \left(\frac{5,35}{2} + 0,5 \right) + 5,02 \cdot \frac{0,5}{2} \right\} : \left(\frac{5,35}{2} + 5,02 \right) = 1,267^{\text{m}} \text{ mit } G = \sum w = 15,39.$$

$$\text{Ebenso ist } T_x = \int \frac{y^2 ds}{J} = 51,88 \text{ (s. o.)} - (1,267 - 0,5)^2 \cdot 15,39 = 42,8,$$

$$\text{und } T_y = \int \frac{x^2 ds}{J} = \left\{ \frac{5,35}{2} \cdot 5^2 + 5,02 \cdot \frac{5^2}{3} \right\} 2 = 217,4.$$

Bei dem Rahmen ohne Mittelstütze ist $M_g = \frac{3 \cdot 0,21 \cdot 10^2}{8} = 7,88^{\text{(9,38)}}$ mt und in dem negativen Trapez mit den Schwerpunktsabständen 2,32^m nach links und 2,63^m nach rechts ist $M_c = -7,78^{\text{(9,51)}}$ mt, $M_d = -16,40^{\text{(20,04)}}$ mt, so daß man erhält:

$$X = \frac{\sum F'_0 y_s}{T_x} = \left\{ \left(\frac{1,95}{2} \cdot \overset{(9,51)}{7,78} \right) \left(\frac{1,95}{2} - 0,767 \right) + 2 \left(\frac{2}{3} \cdot \overset{(9,38)}{7,88} \cdot 5,02 \right) (1,267 - 0,188) - \left(\frac{\overset{(9,51)}{7,78} + \overset{(14,78)}{12,09}}{2} \cdot 5,02 \right) \right. \\ \left. \cdot (1,267 - 0,232) - \left(\frac{\overset{(14,78)}{12,09} + \overset{(20,04)}{16,40}}{2} \cdot 5,02 \right) (1,267 - 0,263) + \left(\frac{1,95}{2} \cdot \overset{(20,04)}{16,40} \right) \left(\frac{1,95}{2} - 0,767 \right) \right\} : 42,8 = - \overset{(-1,77)}{1,44} \text{ t}$$

$$Y = \frac{\sum F'_0 x_s}{T_y} = \left\{ - \overset{(9,27)}{7,59} \cdot 5 + \overset{(59,71)}{49,87} \cdot 2,32 + \overset{(87,40)}{71,51} \cdot 2,63 + \overset{(21,49)}{15,91} \cdot 5,0 \right\} : 217,4 = + \overset{(0,70)}{0,53} \text{ t, und}$$

$$Z = - \frac{\sum F'_0}{G} = - \left\{ - \overset{(9,27)}{7,59} + \overset{(62,78)}{52,74} - \overset{(59,71)}{49,87} - \overset{(87,40)}{71,51} - \overset{(21,49)}{15,99} \right\} : 15,39 = + \overset{(7,48)}{5,99} \text{ mt.}$$

Vom Winddruck erhält man die Momente bei $D = \overset{(0,05)}{(0,011 \cdot 9 \cdot 0,5)} \cdot \frac{0,5}{2} =$
 $= - 0,01 \text{ mt, bei } 2,5 \text{ m Höhe} = 0,01 + 0,05 \cdot 2,85 + \overset{(3,848)}{(1,35 \cdot 2,85)} \cdot \frac{2,85}{2} = 0,15 + 5,48 =$
 $= - 5,63 \text{ mt und bei } B = 5,63 + (0,05 + 3,848) \cdot 2,5 + (3,6 \cdot 0,15 \cdot 2,5) \frac{2,5}{2} = 5,63 +$
 $+ 9,75 + 1,69 = - 17,07 \text{ mt.}$

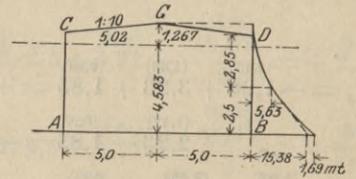


Abb. 75.

Es ist daher $X = \left\{ - \left(0,01 \cdot \frac{5,02}{3} \right) \left(\frac{0,5}{4} + 0,767 \right) + \left(\frac{0,01 + 0,15}{2} \cdot \frac{2,85}{2} \right) (1,90 - 0,767) + \left(\frac{5,48}{3} \cdot \frac{2,85}{2} \right) \right. \\ \left. \cdot (2,137 - 0,767) + \left(\frac{5,63 + 15,38}{2} \cdot \frac{2,5}{2} \right) (4,29 - 0,767) + \left(\frac{1,69}{3} \cdot \frac{2,5}{2} \right) \left(5,35 - 0,767 - \frac{2,5}{4} \right) \right\} : 42,8 = + 1,23 \text{ t,}$

$$Y = \left\{ 0,017 \cdot \frac{2 \cdot 5}{3} + (0,11 + 2,60 + 13,13 + 0,71) 5 \right\} : 217,4 = + 0,38 \text{ t und}$$

$$Z = - \left\{ - 0,017 - 16,55 \right\} : 15,39 = + 1,08 \text{ mt (die Auflagerdrücke sind } A = \overset{(17,54)}{14,81} \text{ und } B = \overset{(22,41)}{18,80} \text{ t).}$$

Mit diesen Werten von $X = H$, $Y = V$ und $Z = M$ können nun die Momente der drei eingespannten Rahmen berechnet werden, und zwar aus der Formel $M_x = M - H \cdot y - V \cdot x + M_0$ und man erhält für Rahmen I vom Eigengewicht mit Schneelast: $H = - \overset{(-2,36)}{1,93} \text{ t, } V = + \overset{(0,38)}{0,30} \text{ t, } M = + \overset{(10,59)}{8,55} \text{ mt, und}$

$$M_a = \overset{(10,59)}{8,55} - \overset{(2,36)}{1,93} \cdot 5,205 - \overset{(0,38)}{0,3} \cdot 10,25 = - \overset{(5,59)}{4,57},$$

$$M_c = \overset{(10,59)}{8,55} - \overset{(2,36)}{1,93} \cdot 1,805 - \overset{(0,38)}{0,3} \cdot 10,25 - \overset{(9,51)}{(-7,78)} = + \overset{(2,44)}{1,99} \text{ bzw. } = - \overset{(7,07)}{5,79},$$

$$M_e = \overset{(10,59)}{8,55} + \overset{(2,36)}{1,93} \cdot 0,145 - \overset{(0,38)}{0,3} \cdot 10,25 - \overset{(9,51)}{7,78} = + \overset{(0,61)}{0,49},$$

$$M_g = \overset{(10,59)}{8,55} + \overset{(2,36)}{1,93} \cdot 0,495 - \overset{(0,38)}{0,3} \cdot 6,75 + \overset{(4,60)}{3,86} - \overset{(11,31)}{9,25} = + \overset{(2,48)}{2,09},$$

$$M_i = \overset{(10,59)}{8,55} + \overset{(2,36)}{1,93} \cdot 0,845 - \overset{(0,38)}{0,3} \cdot 3,25 - \overset{(13,11)}{10,72} = - \overset{(1,76)}{1,51},$$

$$M_j = \overset{(10,59)}{8,55} + \overset{(2,36)}{1,93} \cdot 1,17 - \overset{(14,78)}{12,09} + \overset{(3,95)}{3,33} = + \overset{(2,52)}{2,05},$$

$$M_f = \overset{(10,59)}{8,55} + \overset{(2,36)}{1,93} \cdot 0,845 + \overset{(0,38)}{0,3} \cdot 3,25 - \overset{(16,44)}{13,46} = - \overset{(2,62)}{2,30},$$

$$M_h = \overset{(10,59)}{8,55} + \overset{(2,36)}{1,93} \cdot 0,495 + \overset{(0,38)}{0,3} \cdot 6,75 + \overset{(4,60)}{3,86} - \overset{(18,24)}{14,93} = + \overset{(0,68)}{0,46},$$

$$M_d = \overset{(10,59)}{8,55} - \overset{(2,36)}{1,93} \cdot 0,145 + \overset{(0,38)}{0,3} \cdot 10,25 - \overset{(20,04)}{16,40} = - \overset{(2,13)}{1,98},$$

$$M_u = \overset{(10,59)}{8,55} - \overset{(2,36)}{1,93} \cdot 1,805 + \overset{(0,38)}{0,3} \cdot 10,25 - \overset{(20,04)}{16,40} = + \overset{(10,29)}{8,14} \text{ bzw. } - \overset{(9,81)}{8,26},$$

$$M_b = \overset{(10,59)}{8,55} - \overset{(2,36)}{1,93} \cdot 5,205 + \overset{(0,38)}{0,3} \cdot 10,25 = + \overset{(2,20)}{1,58} \text{ mt.}$$

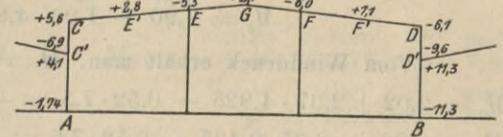


Abb. 76.

Vom Winddruck erhält man $H = + 2,31 \text{ t, } V = + 0,365 \text{ t, } M = + 1,85 \text{ mt, und}$

$$M_a = 1,85 + 2,31 \cdot 5,205 - 0,365 \cdot 10,25 = + 10,13, \quad M_c = 1,85 + 2,31 \cdot 1,805 - 0,365 \cdot 10,25 = + 2,28,$$

$$M_e = 1,85 - 2,31 \cdot 0,145 - 0,365 \cdot 10,25 = - 2,23, \quad M_g = 1,85 - 2,31 \cdot 0,495 - 0,365 \cdot 6,75 = - 1,76,$$

$$M_i = 1,85 - 2,31 \cdot 0,845 - 0,365 \cdot 3,25 = - 1,29, \quad M_j = 1,85 - 2,31 \cdot 1,17 = - 0,85,$$

$$M_f = 1,85 - 2,31 \cdot 0,845 + 0,365 \cdot 3,25 - 0,30 = + 0,78, \quad M_h = 1,85 - 2,31 \cdot 0,495 + 0,365 \cdot 6,75 - 1,16 = + 2,01,$$

$$M_d = 1,85 - 2,31 \cdot 0,145 + 0,365 \cdot 10,25 - 2,03 = + 3,23, \quad M_u = 1,85 + 2,31 \cdot 1,805 + 0,365 \cdot 10,25 - 9,47 = + 0,29,$$

$$M_b = 1,85 + 2,31 \cdot 5,205 + 0,365 \cdot 10,25 - 32,30 = - 14,69 \text{ mt.}$$

Von dem Gegendruck (-zug) der Mittelstützen für Winddruck erhält man $H = 0$, $V = - 1,39 \text{ t, } M = - 16,10 \text{ mt, und}$

$$M_a = - 16,1 + 1,39 \cdot 10,25 = - 1,85 = M_c = M_e, \quad M_g = - 16,1 + 1,39 \cdot 6,75 + \frac{16,1}{2} = + 1,33, \quad M_i = - 16,1 +$$

$$+ 1,39 \cdot 3,25 + 16,1 = + 4,52, \quad M_j = - 16,1 + 16,1 = 0, \quad M_f = - 16,1 - 1,39 \cdot 3,25 + 16,1 = - 4,52,$$

$$M_h = - 16,1 - 1,39 \cdot 6,75 + 16,1 \cdot 1,5 = - 1,33, \quad M_d = - 16,1 - 1,39 \cdot 10,25 + 32,2 = + 1,85 = M_u = M_b.$$

Für die vertikale Belastung ist bei 4,5 m Abstand der Dachbinder das Moment

$$M_p = M_p = M_k = \frac{4,5 \cdot 0,21 \cdot 5^2}{8} = 2,95 \text{ mt, somit wird}$$

$$X = \frac{\sum F'_0 \cdot y_s}{T_x} = \left\{ 2 \left(5,02 \cdot 2,95 \cdot \frac{2}{3} \right) 0,25 + 2 \left(2,51 \cdot 2,95 \cdot \frac{2}{3} \right) \left(0,75 - \frac{3}{8} \cdot \frac{2,5}{10} \right) \right\} : 17,46 = + 0,65 \text{ t.}$$

Vom Winddruck erhält man die Momente für $L = (0,011 \cdot 4,5 \cdot 0,75) \frac{0,75}{2} = - 0,014 \text{ mt}$ und für

$$D = 0,037 \cdot 2,8 + (0,15 \cdot 4,5 \cdot 2,8) 1,4 = 0,104 + 2,646 = - 2,75 \text{ mt}$$

und hieraus

$$X = \left\{ - \left(\frac{0,014 \cdot 7,53}{2} \right) \frac{2}{3} \cdot 0,75 + \left(\frac{0,104 \cdot 2,8}{2} \right) \frac{2 \cdot 2,8}{3} + \left(\frac{2,646 \cdot 2,8}{3} \right) \frac{3}{4} \cdot 2,8 \right\} : 17,46 = + 0,31 \text{ t.}$$

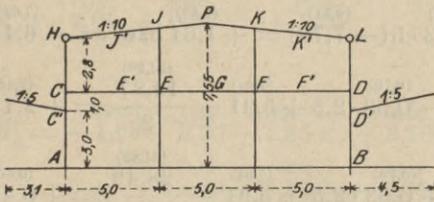


Abb. 79.

Aus dem Gesamtwinddruck ergibt sich eine Horizontalkraft $= \frac{2,75}{2,8} =$

$$= 0,98 \text{ t, somit ist dieselbe bei } H = 0,31 \text{ t, und bei } L = 0,98 - 0,31 = 0,67 \text{ t.}$$

Das Moment des Winddrucks ist daher $M_c = 0,31 \cdot 2,8 = 0,87 \text{ mt}$, $M_d = 2,75 - 0,67 \cdot 2,8 = 0,87 \text{ mt}$ und von der Dachbelastung $M_c = M_d = 0,65 \cdot 2,8 = 1,82 \text{ mt}$, somit zusammen (s. Abb. 81 und 83):

$$M_c = M_d = \mp 1,82 - 0,87 = - 2,69 \text{ mt bzw. } = + 0,95 \text{ mt.}$$

Als Gegendruck (-zug) erhält man bei K und J vom Winddruck $\frac{2,75}{2 \cdot 5} = 0,28 \text{ t}$ statt $\frac{2,75}{15} = 0,18 \text{ t}$, somit $M_i = M_k = \pm 0,10 \cdot 5 = \pm 0,50 \text{ mt}$.

Der auf den Dachbinder wirkende Horizontalschub ist $H = 0,31 + 0,65 = 0,96 \text{ t}$, und er ergibt ein Moment $M_i = M_k = - 0,96 \cdot 0,5 = - 0,48 \text{ mt}$, somit zusammen $= - 0,48 \pm 0,50 = + 0,02$ bzw. $= - 0,98 \text{ mt}$ und ohne Winddruck $= - 0,65 \cdot 0,5 = - 0,33 \text{ mt}$.

Die Auflagerdrücke sind $C = D = 4,5 \cdot 0,21 \cdot 2,5 \pm 0,28 + 0,2 = 2,84$ bzw. $= 1,28 \text{ t}$ und $J = K = 4,5 \cdot 0,21 \cdot 5 \pm 0,28 + 0,2 = 5,21$ bzw. $= 4,65 \text{ t}$.

Die Berechnung des unteren Teils als eingespannter Rahmen mit zwei Mittelstützen kann wie in IV 2 geschehen, wenn die Dachneigung = 0 gesetzt wird, und man erhält mit $J_1 : J_2 = 2 : 1$:

$$z = \frac{\sum w y'}{\sum w} = \left\{ \frac{4,0}{2} \cdot 2 + 7,5 \cdot 0 \right\} : \left(\frac{4,0}{2} + 7,5 \right) = \frac{4,0}{9,5} = 0,42 \text{ m mit } G = \sum w = 2 \cdot 9,5 = 19,0.$$

$$\text{Ferner ist } T_x = \int \frac{y^2 ds}{J} = \left(\frac{4,0}{2} \cdot \frac{4^2}{3} + \frac{7,5}{1} \cdot 0 \right) 2 - 0,42^2 \cdot 19,0 = 18,0, T_y = \int \frac{x^2 ds}{J} = \left(\frac{4,0}{2} \cdot 7,5^2 + 7,5 \cdot \frac{7,5^2}{3} \right) 2 = 506,2.$$

Der obere Boden ist mit 800 kg/qm Nutzlast zu berechnen, und genügen für denselben Querschwellen $18/24 \text{ cm}$ im Abstand $0,55 \text{ m}$ mit einem Dielenbelag von 6 cm Stärke, wofür mit den eisernen Blechträgern im Abstand von $4,5 \text{ m}$ eine Gesamtbelastung von 140 kg/qm gerechnet werden kann.

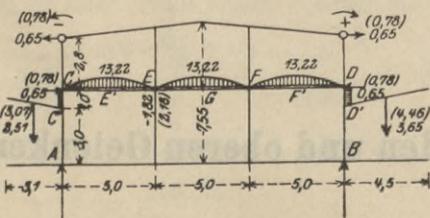


Abb. 81.

Die Belastung der Vordächer ist mit $3,1 \cdot 0,18 \cdot 4,5 = 2,51 \text{ t}$ und $4,5 \cdot 0,18 \cdot 4,5 = 3,65 \text{ t}$ zu berechnen, so daß hierfür die Momente $M_c = 2,51 \cdot 1,55 = 3,89 \text{ mt}$ und $M_d = 3,65 \cdot 2,25 = 8,21 \text{ mt}$ erhalten werden.

Die Gesamtauflagerdrücke sind daher (ohne Berücksichtigung der Mittelstützen):

$$A = 0,94 \cdot 7,5 \cdot 4,5 + 1,0 + \frac{2,51 \cdot 16,55 - 3,65 \cdot 2,25}{15} = 31,72 + 1,0 + 2,22 = 34,94 \text{ t,}$$

$$B = 0,94 \cdot 7,5 \cdot 4,5 + 1,0 + \frac{3,65 \cdot 17,25 - 2,51 \cdot 1,55}{15} = 31,72 + 1,0 + 3,94 = 36,66 \text{ t.}$$

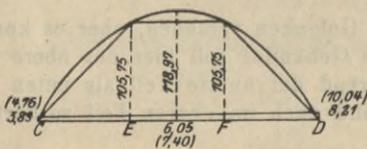


Abb. 82.

Für den Rahmen ohne Mittelstützen ist $M_g = \frac{0,94 \cdot 4,5 \cdot 15^2}{8} = 118,97 \text{ mt}$, und die Gegendrücke sind $E = F = 0,94 \cdot 4,5 \cdot 5 = 21,15 \text{ t}$ und ihr Moment ist $= 21,15 \cdot 5 = 105,75 \text{ mt}$, und dasselbe entspricht den Ordinaten der

Parabel in Abb. 82 bei E und F , so daß die kleinen Parabeln mit der mittleren Höhe $M_e = M_g = M_f = \frac{0,94 \cdot 4,5 \cdot 5^2}{8} = 13,22 \text{ mt}$ für Vollbelastung und $= \frac{0,14 \cdot 4,5 \cdot 5^2}{8} = 1,97 \text{ mt}$ für Eigengewicht als Differenz übrig bleiben.

Von der Dachbelastung des oberen Teils erhält man eine negative Momentenfläche über CD mit $M = -1,82 \text{ mt}$, somit ist $X = \frac{\sum F'_0 \cdot y_s}{T_x} = - \left\{ (1,82 \cdot 15) \cdot 0,42 \right\} : 18 = -0,64 \text{ t}$, $Y = 0$, $Z = -(-27,3) : 19 = +1,44 \text{ mt}$, und von der Bodenbelastung erhält man $X = \left\{ (13,22 \cdot 5 \cdot \frac{2}{3}) \cdot 3 \cdot 0,42 \right\} : 18 = +3,09 \text{ t}$, $Y = 0$, $Z = -(132,2) : 19 = -6,96 \text{ mt}$.

Von der Belastung der Vordächer erhält man nach Abb. 82:

$$X = \left\{ \left(\frac{1,0}{2} \cdot 3,89 \right) \left(\frac{1,0}{2} - 0,42 \right) - \left(\frac{3,89 + 6,05}{2} \cdot 7,5 \right) 0,42 - \left(\frac{6,05 + 8,21}{2} \cdot 7,5 \right) 0,42 + \left(\frac{1,0}{2} \cdot 8,21 \right) \left(\frac{1,0}{2} - 0,42 \right) \right\} : 18,0 = -2,15 \text{ t}$$

$$Y = \left\{ -1,945 \cdot 7,5 - 37,275 \cdot 3,48 + 53,475 \cdot 3,94 + 4,105 \cdot 7,5 \right\} : 506,2 = +0,192 \text{ t}$$

$$Z = - \left\{ -1,945 - 37,275 - 53,445 - 4,105 \right\} : 19,0 = +5,09 \text{ mt}$$

Von dem Winddruck des oberen Teils erhält man bei D (s. Abb. 81 u. 83) eine Einzelkraft $= 0,037 + (0,15 \cdot 4,5 \cdot 2,8) = 1,93 \text{ t}$ und bei B ein Moment $= 1,93 \cdot 4,0 + (0,15 \cdot 4,5 \cdot 4) \cdot 2 = 7,72 + 5,40 = -13,12 \text{ mt}$, wozu noch die negative Momentenfläche mit $-0,87 \text{ mt}$ über CD und mit $2 \cdot 0,87 = -1,74 \text{ mt}$ über BD kommt, somit zusammen $-14,86 \text{ mt}$. Hierfür ist $X = \frac{\sum F'_0 \cdot y_s}{T_x} = \left\{ - (0,87 \cdot 15) 0,42 + \left(1,74 \cdot \frac{4}{2} \right) (2 - 0,42) + \left(\frac{7,72}{2} \cdot \frac{4}{2} \right) \left(\frac{8}{3} - 0,42 \right) + \left(\frac{5,4}{3} \cdot \frac{4}{2} \right) (3 - 0,42) \right\} : 18 = +1,48 \text{ t}$

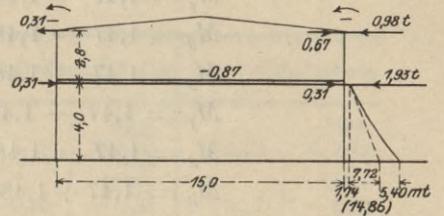


Abb. 83.

Durch die Mittelstützen entsteht eine vertikale Zug- bzw. Druckkraft $= \frac{M_w}{2 \cdot 5} = \frac{14,86}{10} = 1,486 \text{ t}$ statt $\frac{14,86}{15} = 0,991 \text{ t}$ und eine Differenz $= 1,486 - 0,991 = 0,495 \text{ t}$ mit einem Moment $= \pm 0,495 \cdot 5 = \pm 2,48 \text{ mt}$.

Die genaue Berechnung (s. unten) ergibt sich aus der Darstellung der Momentenfläche in Abb. 84 und man erhält hierfür

$$X = \left\{ \left(7,43 \cdot \frac{15 + 5}{2} \right) 0,42 + \left(\frac{5 \cdot 14,86}{2} \right) 0,42 - \left(\frac{4}{2} \cdot 14,86 \right) (2 - 0,42) \right\} : 18 = 0,$$

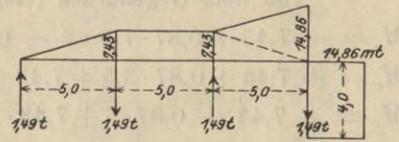


Abb. 84.

$$Y = \left\{ -37,15 \cdot 5,83 - 29,72 \cdot 7,5 \right\} : 506,2 = -0,870 \text{ t}$$

$$Z = - \left\{ 74,3 + 37,15 + 29,72 \right\} : 19 = -7,43 \text{ mt}$$

2. Bestimmung der Momentenflächen und Auflagerdrücke für dieselben.

Für diese Werte von $X = H$, $Y = V$, $Z = M$ ist nun $M_x = M - H \cdot y - V \cdot x + M_0$ zu berechnen, wobei immer die richtigen Vorzeichen einzusetzen sind, und man erhält von der Bodenbelastung: $H = +3,09 \text{ t}$, $V = 0$, $M = -6,96 \text{ mt}$, somit

$$M_a = -6,96 + 3,09 \cdot 3,58 = +4,10 = M_b, \quad M_c = -6,96 + 3,09 \cdot 0,58 = -5,17 = M_d,$$

$$M_e = -6,96 - 3,09 \cdot 0,42 = -8,26 = M_f = M_g, \quad M_h = -8,26 + 13,22 = +4,96 = M_i = M_j.$$

Von der Belastung durch die Vordächer ist $H = -2,15 \text{ t}$, $V = +0,192 \text{ t}$, $M = +5,09 \text{ mt}$, und

$$M_a = 5,09 - 2,15 \cdot 3,58 - 0,192 \cdot 7,5 = -4,05,$$

$$M_c = 5,09 - 2,15 \cdot 0,58 - 0,192 \cdot 7,5 (-3,89) = +2,40 \text{ bzw. } -1,49,$$

$$M_e = 5,09 + 2,15 \cdot 0,42 - 0,192 \cdot 7,5 - 3,89 = +0,66,$$

$$M_h = 5,09 + 2,15 \cdot 0,42 - 0,192 \cdot 5 - \frac{3,89 + 5,33}{2} = +0,42,$$

$$M_i = 5,09 + 2,15 \cdot 0,42 - 0,192 \cdot 2,5 - 5,33 = +0,18,$$

$$M_j = 5,09 + 2,15 \cdot 0,42 - 6,05 = -0,06,$$

$$M = 5,09 + 2,15 \cdot 0,42 + 0,192 \cdot 2,5 = -0,30,$$

$$M_f = 5,09 + 2,15 \cdot 0,42 + 0,192 \cdot 5 - \frac{6,77 + 8,21}{2} = -0,54,$$

$$M_a = 5,09 + 2,15 \cdot 0,42 + 0,192 \cdot 7,5 - 8,21 = -0,78,$$

$$M_{a'} = 5,09 - 2,15 \cdot 0,58 + 0,192 \cdot 7,5 - 8,21 = +5,28 \text{ bzw. } = -2,93,$$

$$M_b = 5,09 - 2,15 \cdot 3,58 + 0,192 \cdot 7,5 = -1,17 \text{ mt.}$$

Von der vertikalen Belastung des oberen Teils ist $H = -0,64^t$, $V = 0$, $M = +1,44^{\text{mt}}$, und

$$M_a = 1,44 - 0,64 \cdot 3,58 = -0,85 = M_b, \quad M_{c'} = 1,44 - 0,64 \cdot 0,58 = +1,07 = M_{a'}, \text{ seitlich}$$

$$M_c = 1,44 + 0,64 \cdot 0,42 = +1,71 = M_{a'}, \text{ oben } M_c = M_{c'} = M_e = M_g = M_f = M_{a'} = M_a = 1,71 - 1,82 = -0,11^{\text{mt}}.$$

Von der Belastung durch den Winddruck ist: $H = +1,48^t$, $V = +0,22^t$, $M = +1,47^{\text{mt}}$, und

$$M_a = 1,47 + 1,48 \cdot 3,58 - 0,22 \cdot 7,5 = +5,12,$$

$$M_{c'} = 1,47 + 1,48 \cdot 0,58 - 0,22 \cdot 7,5 = +0,68,$$

$$M_c = 1,47 - 1,48 \cdot 0,42 - 0,22 \cdot 7,5 (-0,87) = -0,80 \text{ bzw. } = -1,67,$$

$$M_{c'} = 1,47 - 1,48 \cdot 0,42 - 0,22 \cdot 5 - 0,87 = -1,12,$$

$$M_e = 1,47 - 1,48 \cdot 0,42 - 0,22 \cdot 2,5 - 0,87 = -0,57,$$

$$M_g = 1,47 - 1,48 \cdot 0,42 = -0,02,$$

$$M_f = 1,47 - 1,48 \cdot 0,42 + 0,22 \cdot 2,5 - 0,87 = +0,53,$$

$$M_{f'} = 1,47 - 1,48 \cdot 0,42 + 0,22 \cdot 5 - 0,87 = +1,08,$$

$$M_d = 1,47 - 1,48 \cdot 0,42 + 0,22 \cdot 7,5 - 0,87 (-1,74) = +1,63 \text{ bzw. } = +0,76,$$

$$M_{a'} = 1,47 + 1,48 \cdot 0,58 + 0,22 \cdot 7,5 - 4,01 = -0,03,$$

$$M_b = 1,47 + 1,48 \cdot 3,58 + 0,22 \cdot 7,5 - 14,86 = -6,44^{\text{mt}}.$$

Von dem Gegendruck (-zug) der Mittelstützen erhält man $H = 0$, $V = -0,87^t$, $M = -7,43^{\text{mt}}$, und

$$M_a = -7,43 + 0,87 \cdot 7,5 = -0,90 = M_{c'} = M_c, \quad M_{c'} = -7,43 + 0,87 \cdot 5 + 3,72 = +0,64,$$

$$M_e = -7,43 + 0,87 \cdot 2,5 + 7,43 = +2,18, \quad M_g = -7,43 + 7,43 = 0, \quad M_{f'} = -7,43 - 0,87 \cdot 2,5 + 7,43 = -2,18,$$

$$M_{f'} = -7,43 - 0,87 \cdot 5 + 7,43 \cdot 1,5 = -0,64, \quad M_d = -7,43 - 0,87 \cdot 7,5 + 14,86 = +0,90 = M_{a'} = M_b.$$

Außer dem Eigengewicht und der Vollbelastung des oberen Bodens können noch vier Belastungsfälle unterschieden werden, und zwar für die Belastung von Oeffnung 2, 1 und 3, 1 und 2, 2 und 3, und bei etwaiger Entfernung des Bodens wird dieselbe = 0. Man erhält daher für die Belastung der

$$2. \text{ Oeffnung: } X = \left\{ (13,22 - 1,95) \cdot 5 \cdot \frac{2}{3} \cdot 0,42 \right\} : 18 = +0,88^t, \quad Y = 0, \quad Z = -\left(\frac{112,5}{3} \right) : 19 = -1,98^{\text{mt}},$$

$$1. \text{ und } 3. \text{ Oeffnung: } X = 2 \cdot 0,88 = +1,76^t, \quad Y = 0, \quad Z = -2 \cdot 1,98 = -3,96^{\text{mt}},$$

$$1. \text{ und } 2. \text{ Oeffnung: } X = +1,76^t, \quad Y = \left\{ (13,22 - 1,97) \cdot 5 \cdot \frac{2}{3} \cdot 5 \right\} : 506,2 = +0,37^t, \quad Z = -3,96^{\text{mt}},$$

$$2. \text{ und } 3. \text{ Oeffnung: } X = +1,76^t, \quad Y = -0,37^t, \quad Z = -3,96^{\text{mt}}.$$

Für diese vier Belastungsfälle ist also $H = +1,76^t$, $V = \pm 0,37^t$, $M = -3,96^{\text{mt}}$, und

$$M_a = -3,96 + 1,76 \cdot 3,58 \mp 0,37 \cdot 7,5 = +2,35 \text{ bzw. } = +5,12,$$

$$M_{c'} = -3,96 + 1,76 \cdot 0,58 \mp 0,37 \cdot 7,5 = -2,94 \text{ bzw. } = -0,16,$$

$$M_c = -3,96 - 1,76 \cdot 0,42 \mp 0,37 \cdot 7,5 = -4,70 \text{ bzw. } = -1,92,$$

$$M_{c'} = -3,96 - 1,76 \cdot 0,42 \mp 0,37 \cdot 5 (+11,25) = +6,55 \text{ bzw. } = -2,85,$$

$$M_e = -3,96 - 1,76 \cdot 0,42 \mp 0,37 \cdot 2,5 = -4,70 \text{ bzw. } = -3,77,$$

$$M_g = -3,96 - 1,76 \cdot 0,42 (+11,25) = -4,70 \text{ bzw. } = +6,55,$$

$$M_f = -3,96 - 1,76 \cdot 0,42 \pm 0,37 \cdot 2,5 = -4,70 \text{ bzw. } = -5,62,$$

$$M_{f'} = -3,96 - 1,76 \cdot 0,42 \pm 0,37 \cdot 5 (+11,25) = +6,55 \text{ bzw. } = +4,70,$$

$$M_d = -3,96 - 1,76 \cdot 0,42 \pm 0,37 \cdot 7,5 = -4,70 \text{ bzw. } = -7,47,$$

$$M_{a'} = -3,96 + 1,76 \cdot 0,58 \pm 0,37 \cdot 7,5 = -2,94 \text{ bzw. } = -5,71,$$

$$M_b = -3,96 + 1,76 \cdot 3,58 \pm 0,37 \cdot 7,5 = +2,35 \text{ bzw. } = -0,43^{\text{mt}}.$$

Die Reihenfolge dieser Momente (vgl. die vier Zahlen nach dem zweiten =) entspricht Oeffnung 1 und 3 (2) bzw. 2 und 3 (1 und 2), und die Summierung der obigen Momente soll zunächst für die Bodenbelastung = 0 und mit Winddruck von rechts geschehen, so daß man erhält:

$$\begin{aligned}
 M_a &= -4,05 - 0,85 + 5,12 - 0,90 = -\underline{0,68}, & M_c &= 2,40 + 1,07 + 0,68 - 0,90 = +\underline{3,25}, \\
 M_{c'} &= -1,49 + 1,07 + 0,68 - 0,90 = -\underline{0,64}, & M_e &= 0,66 + 1,71 - 0,80 - 0,90 = +\underline{0,67}, \\
 M_c &= 0,66 - 0,11 - 1,67 - 0,90 = -\underline{2,02}, & M_{c'} &= 0,42 - 0,11 - 1,12 + 0,64 = -\underline{0,17}, \\
 M_e &= 0,18 - 0,11 - 0,57 + 2,18 = +\underline{1,68}, & M_g &= -0,06 - 0,11 - 0,02 = -\underline{0,19}, \\
 M_f &= -0,30 - 0,11 + 0,53 - 2,18 = -\underline{2,06}, & M_f &= -0,54 - 0,11 + 1,08 - 0,64 = -\underline{0,21}, \\
 M_a &= -0,78 - 0,11 + 1,63 + 0,90 = +\underline{1,64}, & M_a &= -0,78 + 1,71 + 0,76 + 0,90 = +\underline{2,59}, \\
 M_{a'} &= -2,93 + 1,07 - 0,03 + 0,90 = -\underline{0,99}, & M_{a'} &= 5,28 + 1,07 - 0,03 + 0,90 = +\underline{7,22}, \\
 M_b &= -1,17 - 0,85 - 6,44 + 0,90 = -\underline{7,56}.
 \end{aligned}$$

Zu diesen Momenten kommen noch diejenigen der verschiedenen Bodenbelastungen, und man erhält alsdann folgende Tabelle (vgl. Abb. 85):

M	+ Eigengewicht des Bodens	mit Oeffnung 2		mit Oeffnung 1 u. 3		mit Oeffnung 1 u. 2		mit Oeffnung 2 u. 3		mit Vollbelastung			
M_a	+0,61	(2,97)	(-2,90)	+1,17	+1,10	+2,35	+2,28	-0,43	-0,50	+5,12	+5,05	+4,10	+3,42
$M_{c'}$	-0,77	(3,39)	(1,92)	+2,48	+1,01	-2,94	-0,46	-5,71	-3,23	-0,16	+2,32	-5,17	-1,92
M_c	-0,77	(1,37)	(2,81)	-1,41	-2,88	-2,94	-4,35	-5,71	-7,12	-0,16	-1,57	-5,17	-5,81
M_c	-1,23	(+0,75)	(1,60)	-0,56	-2,91	-4,70	-5,26	-7,47	-8,03	-1,92	-2,48	-8,26	-7,59
M_c	-1,23	(1,87)	(4,22)	-3,25	-5,60	-4,70	-7,95	-7,47	-10,72	-1,92	-5,17	-8,26	-10,28
$M_{c'}$	+0,74	(0,86)	(1,49)	+0,57	-1,78	+6,55	+7,12	+4,70	+5,27	-2,85	-2,28	+4,96	+4,79
M_e	-1,23	(-0,37)	(-2,72)	+0,45	-1,90	-4,70	-4,25	-5,62	-5,17	-3,77	-3,32	-8,26	-6,58
M_g	+0,74	(0,50)	(9,40)	+0,55	+8,90	+9,45	-4,70	+6,55	+7,10	+6,55	+7,10	+4,96	+4,77
M_f	-1,23	(2,57)	(4,92)	-3,29	-5,64	-4,70	-7,99	-3,77	-7,06	-5,62	-8,91	-8,26	-10,32
$M_{f'}$	+0,74	(0,14)	(2,21)	+0,53	-1,82	+6,55	+7,08	-2,85	-2,32	+4,70	+5,23	+4,96	+4,75
M_a	-1,23	(-1,07)	(3,42)	+0,41	-1,94	-4,70	-4,29	-1,92	-1,51	-7,47	-7,06	-8,26	-6,62
M_a	-1,23	(0,67)	(1,68)	+1,36	-0,99	-4,70	-3,34	-1,92	-0,56	-7,47	-6,11	-8,26	-5,67
$M_{a'}$	-0,77	(2,59)	(4,06)	-1,76	-2,23	-2,94	-4,70	-0,16	-1,92	-5,71	-7,47	-5,17	-6,16
$M_{a'}$	-0,77	(7,45)	(5,98)	+6,45	+4,98	-2,94	+3,51	-0,16	+6,29	-5,71	+0,74	-5,17	+2,05
M_b	+0,61	(4,33)	(3,16)	-6,95	-5,78	+2,35	-4,60	+5,12	-1,83	-0,43	-7,38	+4,10	-3,46

Die Summierung der Momente mit der Bodenbelastung = 0 und mit Winddruck von links ergibt:

$$\begin{aligned}
 M_a &= -4,05 - 0,85 - 6,44 + 0,90 = -\underline{10,44}, & M_{c'} &= 2,40 + 1,07 - 0,03 + 0,90 = +\underline{4,34}, \\
 M_{c'} &= -1,49 + 1,07 - 0,03 + 0,90 = +\underline{0,45}, & M_e &= 0,66 + 1,71 + 0,76 + 0,90 = +\underline{4,03}, \\
 M_c &= 0,66 - 0,11 + 1,63 + 0,90 = +\underline{3,08}, & M_{c'} &= 0,42 - 0,11 + 1,08 - 0,64 = +\underline{0,75}, \\
 M_e &= 0,18 - 0,11 + 0,53 - 2,18 = -\underline{1,58}, & M_g &= -0,06 - 0,11 - 0,02 = -\underline{0,19}, \\
 M_f &= -0,30 - 0,11 - 0,57 + 2,18 = +\underline{1,20}, & M_f &= -0,54 - 0,11 - 1,12 + 0,64 = -\underline{1,13},
 \end{aligned}$$

$$M_a = -0,78 - 0,11 - 1,67 - 0,90 = -3,46,$$

$$M_{a'} = -2,93 + 1,07 + 0,68 - 0,90 = -2,08,$$

$$M_b = -1,17 - 0,85 + 5,12 - 0,90 = +2,20 \text{ mt.}$$

$$M_a = -0,78 + 1,71 - 0,80 - 0,90 = -0,77,$$

$$M_{a'} = 5,28 + 1,07 + 0,68 - 0,90 = +6,13,$$

Zu diesen Momenten (welche für den Winddruck und die Gegendrücke der Mittelstützen durch Vertauschung mit der rechten Seite des Rahmens erhalten werden) kommen noch diejenigen der verschiedenen Bodenbelastungen, und man erhält alsdann folgende Tabelle (vgl. Abb. 86):

M	+ Eigengewicht des Bodens	mit Oeffnung 2		mit Oeffnung 1 u. 3		mit Oeffnung 1 u. 2		mit Oeffnung 2 u. 3		mit Vollbelastung		
M_a	+0,61	(7,85) -9,83	+1,17	(6,68) -8,66	+2,35	(5,50) -7,48	-0,43	(8,28) -10,26	+5,12	(2,73) -4,71	+4,10	(4,36) -6,34
$M_{c'}$	-0,77	(3,93) +3,57	-1,47	(2,46) +2,10	-2,94	(0,99) +0,63	-5,71	(1,78) -2,14	-0,16	(3,77) +3,41	-5,17	(0,47) -0,83
M_c	-0,77	(0,88) -0,32	-1,47	(2,30) -1,79	-2,94	(3,77) -3,26	-5,71	(6,54) -6,03	-0,16	(0,99) -0,48	-5,17	(5,23) -4,72
M_c	-1,23	(2,43) +2,80	-2,35	(0,08) +0,45	-4,70	(2,27) -1,90	-7,47	(5,04) -4,67	-1,92	(0,51) +0,88	-8,26	(4,60) -4,23
M_c	-1,23	(0,69) +1,85	-2,35	(1,66) -0,50	-4,70	(4,01) -2,85	-7,47	(6,78) -5,62	-1,92	(1,23) -0,07	-8,26	(6,34) -5,18
$M_{c'}$	+0,74	(1,32) +1,49	-2,35	(1,03) -0,86	+6,55	(7,87) +8,04	+4,70	(6,02) +6,19	-2,85	(1,53) -1,36	+4,96	(5,54) +5,71
M_e	-1,23	(1,99) -2,81	-2,35	(4,34) -5,16	-4,70	(6,69) -7,51	-5,62	(7,61) -8,43	-3,77	(5,76) -6,58	-8,26	(9,02) -9,84
M_g	+0,74	(0,50) +0,55	+8,90	(9,40) +9,45	-4,70	(4,20) -4,15	+6,55	(7,05) +7,10	+6,55	(7,05) +7,10	+4,96	(4,72) +4,77
M_f	-1,23	(0,95) -0,03	-2,35	(8,30) -2,38	-4,70	(5,65) -4,73	-3,77	(4,72) -3,80	-5,62	(6,57) -5,65	-8,26	(7,98) -7,06
$M_{f'}$	+0,74	(0,30) -0,39	-2,35	(2,65) -2,74	+6,55	(6,25) +6,16	-2,85	(3,15) -3,24	+4,70	(4,40) +4,31	+4,96	(3,92) +3,83
M_d	-1,23	(3,63) -4,69	-2,35	(5,98) -7,04	-4,70	(8,33) -9,39	-1,92	(5,55) -6,61	-7,47	(11,10) -12,16	-8,26	(10,66) -11,72
M_d	-1,23	(1,01) -2,00	-2,35	(3,36) -4,35	-4,70	(5,71) -6,70	-1,92	(2,93) -3,92	-7,47	(8,48) -9,47	-8,26	(8,04) -9,03
$M_{d'}$	-0,77	(3,13) -2,85	-1,47	(4,60) -4,32	-2,94	(6,07) -5,79	-0,16	(3,29) -3,01	-5,71	(8,84) -8,56	-5,17	(7,53) -7,25
$M_{d'}$	-0,77	(6,91) +5,36	-1,47	(5,44) +3,89	-2,94	(3,97) +2,42	-0,16	(6,75) +5,20	-5,71	(+1,20) -0,35	-5,17	(2,51) +0,96
M_b	+0,61	(0,55) +2,81	+1,17	(1,72) +3,98	+2,35	(2,90) +5,16	+5,12	(5,67) +7,93	-0,43	(0,12) +2,38	+4,10	(4,04) +6,30

Die Auftragung der positiven und negativen Maximalmomente in den einzelnen Punkten A, C', C usw. ergibt die nebengezeichneten Momentenlinien, und die zugehörigen Zahlen der obigen Zusammenstellungen sind unterstrichen. Die obige Berechnung des eingespannten rechteckigen Rahmens mit diskontinuierlichen Stützendrücken ergibt genauere Werte als die kontinuierliche Berechnung derselben.

Die letztere müßte eigentlich durch Aufklappen der Ständer von A bis B mit fünf Oeffnungen geschehen (wie dies beim rechteckigen Rahmen ohne Mittelstützen, aber auch nur für obere vertikale Belastung, auf S. 55—56 in der Berechnung der Eisenbetonkonstruktionen von 1910 durchgeführt worden ist). Wird nun die Berechnung mit fünf und

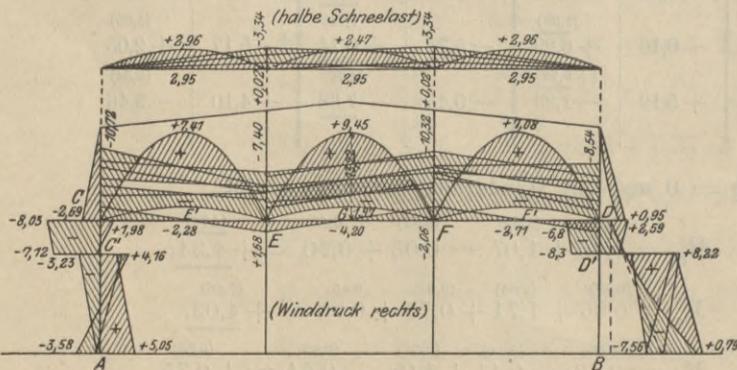


Abb. 85.

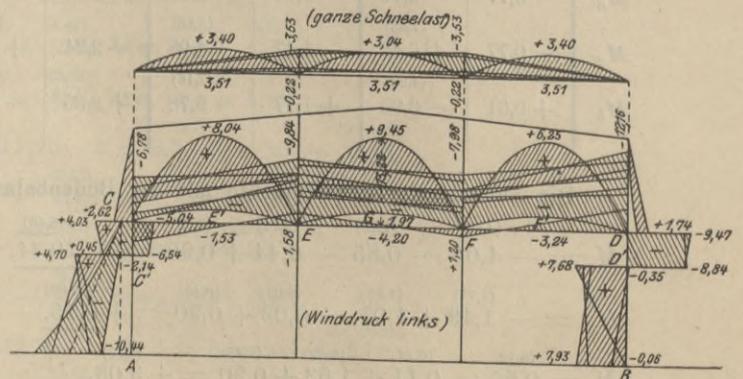


Abb. 86.

mit drei Oeffnungen für Eingespanntsein bei A und B bzw. bei C und D nach den entwickelten Formeln ausgeführt, so ergeben sich bei Vollbelastung der drei mittleren Oeffnungen für die Stützenmomente: im ersteren Fall kleine Werte bei C und D und ein wesentlich größerer Wert bei E und F, und im letzteren Fall wesentlich größere Werte bei C und D

und ein kleinerer Wert bei E und F , so daß der obige gleichgroße Wert $= - 8,26 \text{ mt}$ (s. bei Bodenbelastung S. 51) für die Vollbelastung von $0,94 \text{ t/qm}$ ungefähr den Mittelwerten von beiden Berechnungsarten entspricht.

Die kontinuierliche Berechnung der Auflagerdrücke bei dem Rahmen mit zwei oberen Gelenken ist dann gerechtfertigt, wenn bei einem flachen Dach auch bei J und K Gelenke vorhanden sind (s. Abb. 79), indem alsdann ein Balken auf vier Stützen erhalten wird. Beim Vorhandensein von festen Ecken sowie einer teilweisen Einspannung bei J und K ist es jedoch einfacher, mit den gewöhnlichen Auflagerdrücken zu rechnen, indem durch beides die kontinuierliche Wirkung verhindert wird. Da überdies der Einfluß der diskontinuierlichen Berechnung auf den Rahmen ungünstiger ist, indem größere positive Momentenflächen (ohne Abzug der negativen Momentenflächen) erhalten werden, so kann die vereinfachte Berechnungsweise auch bei dem Vorhandensein von zwei oberen Gelenken verwendet werden. Will man im oberen Teil des Rahmens ungünstig rechnen, so ergeben sich die Momente für die Mitte der Oeffnungen ohne Berücksichtigung der Kontinuität $M = 2,96$ und $2,47$ bzw. $= 3,40$ und $3,04 \text{ mt}$ und an den Stützen erhält man mit Kontinuität $M =$
 $= - 0,98 - 2,36 = - 3,34$ bzw. $= + 0,02 - 2,36 = - 2,34 \text{ mt}$.

Die Auflagerdrücke des oberen Teils sind alsdann $C = D = 0,4 \cdot 0,21 \cdot 4,5 \cdot 5 + 0,2 \pm 0,28 = 2,37$ bzw. $=$
 $= 1,81 \text{ t}$ und $E = F = 1,1 \cdot 0,21 \cdot 4,5 \cdot 5 + 0,2 \pm 0,28 = 5,68$ bzw. $= 5,12 \text{ t}$.

Die Auflagerdrücke des unteren Teils sind $A = 34,94 - 21,15 = 13,79 \text{ t}$, $B = 36,66 - 21,15 = 15,51 \text{ t}$, und $E = F = 21,15 \text{ t}$. Die durch die Mittelstützen entstehende Vermehrung des Zugs und Drucks vom Wind ist $= \mp 1,49 \text{ t}$, so daß man erhält bei Winddruck rechts (und zwar ohne Bodenbelastung):

$$A = 2,37 + 13,79 + 1,49 - 9,0 = 8,65, B = 1,81 + 15,51 - 1,49 - 9,0 = 6,83, E = 5,12 + 21,15 - 1,49 - 18,0 = 7,78,$$

$F = 5,68 + 21,15 + 1,49 - 18 = 10,32$, und bei Winddruck links (gleichfalls ohne Bodenbelastung):

$$A = 1,81 + 13,79 - 1,49 - 9,0 = 5,11, B = 2,37 + 15,51 + 1,49 - 9,0 = 10,37, E = 5,68 + 21,15 + 1,49 - 18 = 10,32,$$

$$F = 5,12 + 21,15 - 1,49 - 18,0 = 6,78 \text{ t}.$$

Hierzu kommt bei Bodenbelastung mit 800 kg/qm für

	Oeffnung 2	Oeffnung 1 u. 3	Oeffnung 1 u. 2	Oeffnung 2 u. 3
A	—	+ 9,0	+ 9,0	—
B	—	+ 9,0	—	+ 9,0
E	+ 9,0	+ 9,0	+ 18,0	+ 9,0
F	+ 9,0	+ 9,0	+ 9,0	+ 18,0

Die nicht eingeklammerten Zahlen beziehen sich auf ganzen Winddruck und halbe Schneelast und die eingeklammerten Zahlen auf halben Winddruck und ganze Schneelast (in Abb. 85 und 86 sind auf den Seiten nur die Momente für ganzen Winddruck rechts und links eingezeichnet, und die ungünstigeren Werte für halben Winddruck von deren Kurven aus aufgetragen worden).

VI. Berechnung eines Tunnelprofils als eingespanntes Gewölbe und ringförmiger Rahmen.

1. Berechnung als eingespanntes Gewölbe nach der Elastizitätslehre.

Der Tunnel erhält den nebengezeichneten Querschnitt mit $6,5 \text{ m}$ Erdüberschüttung im Scheitel, und wird für diese sowie den Erddruck rechts und links berechnet, wobei die erstere vertikal und der letztere horizontal angenommen wird (indem eine völlige Durchnässung des Bodens möglich ist).

Für das spezifische Gewicht $\gamma = 1,8$ der Erde ergeben sich folgende Gewichte für die angenommenen Lamellenbreiten (s. Abb. 88):

$$\begin{aligned} \underline{1} : 6,6 \cdot 1,6 \cdot 1,8 &= 19,0 \text{ t}, & \underline{2} : 7,1 \cdot 1,3 \cdot 1,8 &= 16,8 \text{ t}, \\ \underline{3} : 7,85 \cdot 0,9 \cdot 1,8 &= 12,7 \text{ t}, & \underline{4} : 8,65 \cdot 0,76 \cdot 1,8 &= 11,8 \text{ t}, \\ \underline{5} : 0,64 \cdot 9,35 \cdot 1,8 &= 10,8 \text{ t}. \end{aligned}$$

Die Lamellen des Tunnelprofils haben für das spezifische Gewicht $1,8$ von Klinkern folgende Gewichte:

$$\begin{aligned} \underline{1} : 1,63 \cdot 0,8 \cdot 1,8 &= 2,4 \text{ t}, & \underline{2} : 1,5 \cdot 0,8 \cdot 1,8 &= 2,2 \text{ t}, \\ \underline{3} : 1,3 \cdot 0,8 \cdot 1,8 &= 1,9 \text{ t}, & \underline{4} : 1,3 \cdot 1,04 \cdot 1,8 &= 2,4 \text{ t}, \\ \underline{5} : 1,1 \cdot 1,16 \cdot 1,8 &= 2,3 \text{ t}, & \underline{6} : 1,06 \cdot 1,02 \cdot 1,8 &= 2,0 \text{ t}, \\ \underline{7} : 1,06 \cdot 1,02 \cdot 1,8 &= 2,0 \text{ t}, & \underline{8} : 1,5 \cdot 1,33 \cdot 1,8 &= 3,6 \text{ t}, \\ \underline{9} : 1,8 \cdot 1,78 \cdot 1,8 &= 5,8 \text{ t}, & \underline{10} : 1,52 \cdot 0,54 \cdot 1,8 &= 1,5 \text{ t}, & \underline{11} : 1,4 \cdot 0,54 \cdot 1,8 &= 1,4 \text{ t}. \end{aligned}$$

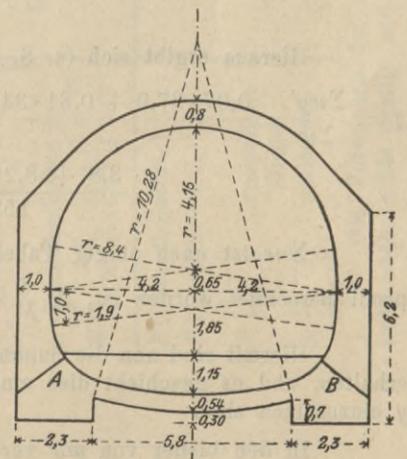


Abb. 87.

Der Erddruck auf die Lamellen ergibt sich aus $E = \frac{1}{2} \gamma h^2 \cdot \text{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)$, wo φ für völlige Durchnässung des Bodens = 15° angenommen wird (zur Vergleichung soll auch die Böschungsneigung $1:1 \frac{1}{2}$ mit $\varphi = 33^\circ 40'$ berücksichtigt werden). Es ist daher $E = \frac{1}{2} \cdot 1,8 \cdot h^2 \cdot \text{tg}^2 37,5^\circ = 0,530 h^2$ (für die Neigung $1:1 \frac{1}{2}$ erhält man $E = 0,258 h^2$).

Als horizontale Erddrücke auf die Oberkanten der vertikal begrenzten Lamellen ergeben sich daher:

- 1 : 0,53 (6,78² - 6,5²) = 2,0^t, 2 : 0,53 (7,44² - 6,78²) = 5,0^t, 3 : 0,53 (8,28² - 7,44²) = 7,0^t,
- 4 : 0,53 (9,95² - 8,28²) = 16,2^t, 5 : 0,53 (11,04² - 9,95²) = 12,1^t, 6 : 0,53 (12,1² - 11,03²) = 13,0^t,
- 7 : 0,53 (13,16² - 12,1²) = 14,2^t, 8 : 0,53 (14,65² - 13,16²) = 22,0^t, 9 : 0,53 (15,94² - 14,65²) = 20,9^t.

Wird nun bei *A* und *B* Einspannung angenommen, so kann das Tunnelprofil wie ein bei *A* und *B* eingespanntes Gewölbe berechnet werden, wobei die oben eingeklammerten Gewichte vorläufig vernachlässigt werden sollen, und nur die vertikale Erdbelastung (5) = 10,8^t in Rechnung gezogen werden kann, indem sie als vertikale exzentrische Belastung der unterhalb liegenden Fugen wirkt.

Es ist nun zunächst der Koordinatenursprung für das eingespannte Gewölbe zu bestimmen, und zwar für die 2x8 Lamellen rechts und links (für die spätere ringförmige Berechnung sollen auch die unteren Lamellen 9'—11' und 9—11 berücksichtigt werden), und man erhält daher folgende Tabelle (s. Berechnung der Eisenbetonkonstruktionen 1910, S. 43):

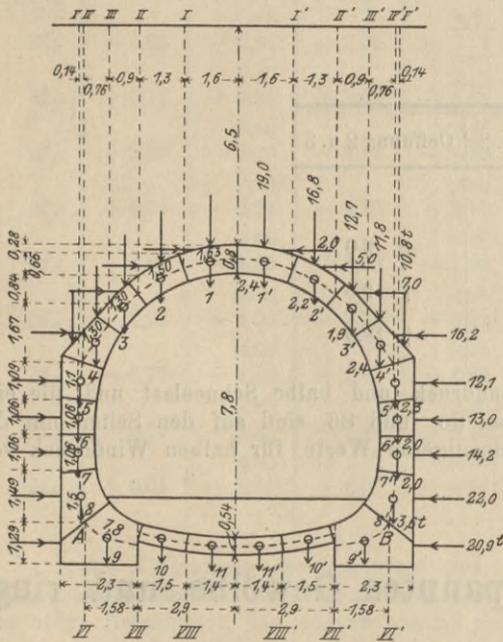


Abb. 88.

Lamelle	1	2	3	4	5	6
<i>x</i>	0,8	2,25	3,35	4,18	4,63	4,69
<i>y'</i> (Abstand vom Scheitel)	0,07	0,61	1,50	2,51	3,61	4,67
<i>s</i>	1,63	1,50	1,3	1,3	1,1	1,06
<i>h</i>	0,8	0,8	0,8	1,04	1,16	1,02
$J = 1 \cdot \frac{h^3}{12}$	0,043	0,043	0,043	0,094	0,130	0,088
$w = \frac{s}{J}$	37,9	34,9	30,2	13,8	8,5	12,0
$\frac{s}{F}$ ($F = 1,0 \cdot h$)	2,04	1,88	1,63	1,25	0,95	1,04

Lamelle	7	8	9	10	11
<i>x</i>	4,69	4,60	3,79	2,15	0,7
<i>y'</i> (Abstand vom Scheitel)	5,73	7,03	8,30	8,24	8,44
<i>s</i>	1,06	1,50	1,8	1,52	1,4
<i>h</i>	1,02	1,33	1,78	0,54	0,54
$J = 1 \cdot \frac{h^3}{12}$	0,088	0,196	0,470	0,013	0,013
$w = \frac{s}{J}$	12,0	7,7	3,8	116,0	107,0
$\frac{s}{F}$ ($F = 1,0 \cdot h$)	1,04	1,13	1,01	2,81	2,59

Hieraus ergibt sich (s. S. 10)

$$z = \frac{\sum wy'}{\sum w} = \frac{0,07 \cdot 37,9 + 0,61 \cdot 34,9 + 1,5 \cdot 30,2 + 2,51 \cdot 13,8 + 3,61 \cdot 8,5 + 4,67 \cdot 12,0 + 5,73 \cdot 12,0 + 7,03 \cdot 7,7 (+ 8,3 \cdot 3,8 + 8,24 \cdot 116 + 8,44 \cdot 107)}{157,0 (383,8)} = \frac{313,50 (+ 1890,46)}{157,0 (383,8)} = 2,00 (5,74)^m.$$

Σw ist nach obiger Tabelle = 2 · 157,0 (383,8), da wegen der Symmetrie nur das halbe Gewölbe bzw. Tunnelprofil berechnet worden ist, $\Sigma \frac{s}{F}$ ist = 2 · 10,97 (17,36).

Hiermit sind nun die Summenausdrücke auf S. 10—11 auszurechnen, um die Einflußordinaten für *H*, *V* und *M* zu erhalten, und es geschieht dies am einfachsten vermittels einer Tabelle, in welcher die Vorzeichen + oder - für *x* und *y* einzusetzen sind.

In den bisher von mir veröffentlichten Beispielen für Gewölbe- und Rahmenberechnungen wurde *x* positiv und *y* mit seinem Vorzeichen eingesetzt, und man erhält auch hiermit richtige Resultate, aber das obige Beispiel hat gezeigt, daß insbesondere bei einer ringförmigen Berechnung genau mit den Vorzeichen zu rechnen ist, wie ich sie auf Seite 10—11 bestimmt habe.

Für die vertikalen Kräfte erhält man daher folgende Tabelle zur Berechnung der Summenausdrücke:

Vertikalen	Scheitel (1')	I' (2')	II' (3')	III' (4')	IV' (5')	V' (6')	V' (7')	V' (8')	$\Sigma 1' - 8'$
x	- 0,8	- 2,25	- 3,35	- 4,18	- 4,63	- 4,69	- 4,69	- 4,6	
$y = 2,00 - y'$	1,93	1,39	0,50	- 0,51	- 1,61	- 2,67	- 3,73	- 5,03	
w	37,9	34,9	30,2	13,8	8,5	12,0	12,0	7,7	2×157 $= 314$
$w_x = w \cdot x$	- 30,3	- 78,5	- 101,2	- 57,7	- 39,4	- 56,3	- 56,3	- 35,4	
$w_y = w \cdot y$	73,1	48,5	15,1	- 7,0	- 13,7	- 32,0	- 44,8	- 38,7	
$w \cdot x^2$	24,3	176,7	398,9	241,1	182,2	264,0	264,0	162,9	$2 \times 1654,1$ $= 3308,2$
$w \cdot y^2$	141,2	67,4	7,6	3,6	22,0	85,5	167,0	194,8	$2 \times 689,1$ $= 1378,2$
$-\frac{1}{a} \sum w_y (a-x)$	-355,02 + 1,6 · (-72,6) + 0,8 · 73,1 = -412,70	-229,12 + 1,3 · (-121,1) + 0,65 · 48,5 = -355,02	-113,33 + 0,9 · (-136,2) + 0,45 · 15,1 = -229,12	-12,48 + 0,76 · (-129,2) + 0,38 · (-7,0) = -113,33	1,18 + 0,11 · (-115,5) + 0,07 · (-13,7) = -12,48	4,32 + 0,03 · (-83,5) + 0,02 · (-32,0) = 1,18	2,32 - 0,04 · (-38,7) - 0,01 · (-44,8) = 4,32	2,32 - 0,04 · (-38,7) = 2,32	-0,06 (-38,7) = +2,32
Einfußordinaten für $H = \sum w y^2 + \sum \frac{s}{F} (= 1400,1)$	+ 0,295	+ 0,254	+ 0,164	+ 0,081	+ 0,009	- 0,001	- 0,003	- 0,002	1378,2 + 2 · 10,97 = 1400,1
$-\frac{1}{a} \sum w_x (a-x)$	-950,52 + 1,6 · (-424,8) + 0,8 · (-30,3) = -1654,44	-449,30 + 1,3 · (-346,3) + 0,65 · (-78,5) = -950,52	-188,17 + 0,9 · (-245,1) + 0,45 · (-101,2) = -449,30	-18,82 + 0,76 · (-187,4) + 0,38 · (-57,7) = -188,17	0,22 + 0,11 · (-148,0) + 0,07 · (-39,4) = -18,82	4,10 + 0,03 · (-91,7) + 0,02 · (-56,3) = 0	2,12 - 0,04 · (-35,4) - 0,01 · (-56,3) = 4,10	2,12 - 0,04 · (-35,4) = 2,12	-0,06 (-35,4) = +2,12
Einfußordinaten für $V = \sum w x^2 (= 3308,2)$	+ 0,500	+ 0,288	+ 0,136	+ 0,055	+ 0,006	0	- 0,001	- 0,001	
$-\frac{1}{a} \sum w (a-x)$	234,16 + 1,6 · 119,1 + 0,8 · 37,9 = 455,04	102,01 + 1,3 · 84,2 + 0,65 · 34,9 = 234,16	39,82 + 0,9 · 54,0 + 0,45 · 30,2 = 102,01	4,02 + 0,76 · 40,2 + 0,38 · 13,8 = 39,82	-0,06 + 0,11 · 31,7 + 0,07 · 8,5 = 0,013	-0,89 + 0,03 · 19,7 + 0,02 · 12,0 = 0	-0,46 - 0,04 · 7,7 - 0,01 · 12,0 = -0,89	-0,06 · 7,7 = -0,46	
Einfußordinaten für $M = \frac{1}{\Sigma w} (= 314)$	1,450	0,746	0,326	0,127	0,013	0	- 0,003	- 0,001	4,480
P (Gesamtbelastung)	21,4	18,8	14,6	13,9	2,3	2,0	2,0	3,6	$2 \times 78,6$
$H 1' - 8' (1 - 8)$	0,28	0,21	0,12	0,05	0,01	0	0	0	
$V \begin{cases} 1' - 8' \\ 1 - 8 \end{cases}$ (interpolierte Einflußordinaten)	0,39	0,21	0,10	0,03	0	0	0	0	
$M \begin{cases} 1' - 8' \\ 1 - 8 \end{cases}$	0,61	0,79	0,90	0,97	1,0	1,0	1,0	1,0	
	1,10	0,54	0,23	0,07	0,01	0	0	0	
	1,90	2,79	3,58	4,25	4,62	4,69	4,68	4,57	

Die Vorzeichen der Abstände $a - x$ für die elastischen Gewichte w_x , w_y und w in Beziehung auf die Fugenmitten (Vertikalen) sind von links nach rechts positiv und von rechts nach links negativ angenommen worden, so daß P positiv einzuführen ist (s. S. 11).

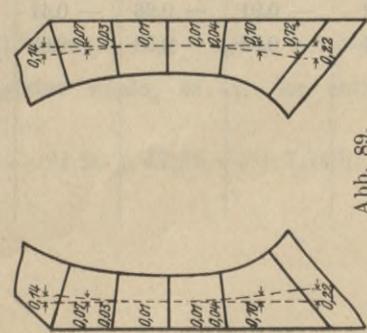


Abb. 89.

Für die horizontalen Kräfte erhält man gleichfalls die Werte von H , V und M aus folgender Tabelle:

Vertikalen	Scheitel (1')	I' (2')	II' (3')	III' (4')	IV' (5')	V' (6')	V' (7')	V' (8')	
	I (1)	II (2)	III (3)	IV (4)	V (5)	V (6)	V (7)	V (8)	
$b = 2,0 + 0,4 - y'$ (in den Vertikalen)	2,40	2,12	1,46	0,62	- 1,05	- 2,14	- 3,20	- 4,26	
	2,12	1,46	0,62	- 1,05	- 2,14	- 3,20	- 4,26	- 5,75	
$w \cdot y$	73,1	48,5	15,1	- 7,0	- 13,7	- 32,0	- 44,8	- 38,7	
$w \cdot y^2$	141,2	67,4	7,6	3,6	22,0	85,5	167,0	194,8	
$\Sigma w y$	+ 0,5	- 72,6	- 121,1	- 136,2	- 129,2	- 115,5	- 83,5	- 38,7	0,5 statt 0 wegen Abrundung der Zahlen
	+ 73,1	+ 121,6	+ 136,7	+ 129,7	+ 116,0	+ 84,0	+ 39,2	+ 0,5	
$\Sigma w y^2$	689,1	547,9	480,5	472,9	469,3	447,3	361,8	194,8	
	830,3	897,7	905,3	908,9	930,9	1016,4	1183,4	1378,2	
$b \Sigma w y$	+ 1,2	- 153,9	- 176,8	- 84,4	+ 135,7	+ 247,2	+ 267,2	+ 164,9	
	+ 155,0	+ 177,5	+ 84,8	- 136,2	- 248,2	- 268,8	- 167,0	- 2,9	
$\Sigma w y^2 - b \Sigma w y$	687,9	701,8	657,3	557,3	333,6	200,1	94,6	29,9	
	675,3	720,2	820,5	1045,1	1179,1	1285,2	1350,4	1381,1	
$H = - \frac{1 (\Sigma w y^2 - b \Sigma w y)}{\Sigma w y^2 + \Sigma \frac{s}{F}} (= 1400,1)$	- 0,492	- 0,501	- 0,470	- 0,399	- 0,238	- 0,143	- 0,068	- 0,021	
	- 0,483	- 0,514	- 0,586	- 0,747	- 0,842	- 0,918	- 0,965	- 0,986	
y	1,93	1,39	0,50	- 0,51	- 1,61	- 2,67	- 3,73	- 5,03	
$w \cdot x$	± 30,3	± 78,5	± 101,2	± 57,7	± 39,4	± 56,3	± 56,3	± 35,4	
$w \cdot x \cdot y$	± 58,5	± 109,1	± 50,6	± 29,4	± 63,4	± 150,3	± 210,0	± 178,1	
$\Sigma w x$	- 455,1	- 424,8	- 346,3	- 245,1	- 187,4	- 148,0	- 91,7	- 35,4	
	- 424,8	- 346,3	- 245,1	- 187,4	- 148,0	- 91,7	- 35,4	0	
$\Sigma w x y$	+ 413,0	+ 471,5	+ 580,6	+ 631,2	+ 601,8	+ 538,4	+ 388,1	+ 178,1	
	+ 471,5	+ 580,6	+ 631,2	+ 601,8	+ 538,4	+ 388,1	+ 178,1	0	
$b \Sigma w x$	- 1092,2	- 900,6	- 505,6	- 151,9	+ 196,8	+ 316,7	+ 293,4	+ 150,8	
	- 900,6	- 505,6	- 151,9	+ 196,8	+ 316,7	+ 293,4	+ 150,8	0	
$\Sigma w x y - b \Sigma w x$	1505,2	1372,1	1086,2	783,1	405,0	221,7	94,7	27,3	
	1372,1	1086,2	783,1	405,0	221,7	94,7	27,3	0	
$V = - \frac{1 (\Sigma w x y - b \Sigma w x)}{\Sigma w x^2} (= 3308,2)$	- 0,455	- 0,415	- 0,329	- 0,237	- 0,122	- 0,067	- 0,029	- 0,008	
	- 0,415	- 0,329	- 0,237	- 0,122	- 0,067	- 0,029	- 0,008	0	
w	37,9	34,9	30,2	13,8	8,5	12,0	12,0	7,7	
Σw	157,0	119,1	84,2	54,0	40,2	31,7	19,7	7,7	
	194,9	229,8	260,0	273,8	282,3	294,3	306,3	314,0	
$\Sigma w y$	+ 0,5	- 72,6	- 121,1	- 136,2	- 129,2	- 115,5	- 83,5	- 38,7	
	+ 73,1	+ 121,6	+ 136,7	+ 129,7	+ 116,0	+ 84,0	+ 39,2	+ 0,5	
$b \Sigma w$	+ 376,8	+ 252,5	+ 122,9	+ 33,5	- 42,2	- 67,8	- 63,0	- 32,8	
	+ 413,2	+ 335,5	+ 161,2	- 287,5	- 604,1	- 941,8	- 1304,8	- 1805,5	
$\Sigma w y - b \Sigma w$	- 376,3	- 325,1	- 244,0	- 169,7	- 87,0	- 47,7	- 20,5	- 5,9	
	- 340,1	- 213,9	- 24,5	+ 417,2	+ 720,1	+ 1025,8	+ 1344,0	+ 1806,0	
$M = \frac{1 (\Sigma w y - b \Sigma w)}{\Sigma w} (= 314)$	- 1,199	- 1,035	- 0,777	- 0,540	- 0,277	- 0,152	- 0,065	- 0,019	
	- 1,083	- 0,681	- 0,078	+ 1,328	+ 2,293	+ 3,267	+ 4,280	+ 5,752	
P	± 2,0	± 5,0	± 7,0	± 16,2	± 12,1	± 13,0	± 14,2	± 22,0	91,5
H	- 0,50	- 0,49	- 0,44	- 0,32	- 0,19	- 0,11	- 0,05	- 0,01	
	- 0,49	- 0,50	- 0,55	- 0,67	- 0,80	- 0,88	- 0,94	- 0,98	
V	- 0,44	- 0,37	- 0,28	- 0,18	- 0,09	- 0,05	- 0,02	0	
	- 0,44	- 0,37	- 0,28	- 0,18	- 0,09	- 0,05	- 0,02	0	
M	- 1,12	- 0,91	- 0,66	- 0,41	- 0,22	- 0,11	- 0,04	- 0,01	
	- 1,14	- 0,88	- 0,38	+ 0,63	+ 1,81	+ 2,78	+ 3,77	+ 5,02	

Durch Ausrechnung der Werte $\Sigma P \cdot b$ (b entspricht der Einflußordinate für P) erhält man für vertikale Belastung: $H = 2 \cdot 12,41 = + 24,82^t$, $V = + 78,6^t$, $M = + 288,32^{mt}$ und für horizontale Belastung mit ganzem Erddruck: $H = - 57,84^t$, $V = 0$, $M = + 245,81^{mt}$, somit zusammen: $H = 24,82 - 57,84 = - 33,02^t$, $V = 78,6^t$, $M = 288,32 + 245,81 = 534,13^{mt}$.

Die Annahme der Richtungen von H , V und M folgt aus den Vorzeichen, und dieselbe stimmt damit überein, daß der Horizontalschub H der vertikalen Belastung entgegengesetzt demjenigen durch die horizontale Belastung ist, ebenso wirkt die Vertikalkraft V nach oben, so daß die Resultante R bei A nach außen gerichtet ist. Die Summierung der positiven Momente M ergibt sich auch daraus, daß ein Auftragen von H und V im Koordinatenursprung ein positives Moment $M = R \cdot r$ für die Gegenresultante R mit dem Kämpferdruck R hervorruft (s. Abb. 90).

Die genaue Lage des letzteren ergibt sich nun (s. S. 11) aus:

$$r = \frac{M}{R} \text{ wo } R = \sqrt{H^2 + V^2} = \sqrt{33,02^2 + 78,6^2} = 85,25^t, \text{ somit}$$

$$r = \frac{534,13}{85,25} = 6,265 \text{ m, ferner}$$

$$x_r = \frac{M}{V} = \frac{534,13}{78,6} = 6,796 \text{ m,}$$

$$y_r = \frac{M}{H} = \frac{534,13}{- 33,02} = - 16,176 \text{ m.}$$

Für den halben Erddruck mit der Böschung $1:1 \frac{1}{2}$ sind obige Werte mit $\frac{0,258}{0,530} = 0,487$ zu multiplizieren, so daß man erhält $H = - 0,487 \cdot 57,84 = - 28,17^t$, $V = 0$, $M = 0,487 \cdot 245,81 = + 119,71^{mt}$, somit zusammen $H = 24,82 - 28,17 = - 3,35^t$, $V = 78,6^t$, $M = 288,32 + 119,71 = 408,03^{mt}$.

Die Lage der Resultante R am Kämpfer ergibt sich aus:

$$R = \sqrt{3,35^2 + 78,6^2} = 78,67^t,$$

$$r = \frac{408,03}{78,67} = 5,187 \text{ m,}$$

$$x_r = \frac{408,03}{78,6} = 5,191 \text{ m,}$$

$$y_r = \frac{408,03}{- 3,35} = - 121,800 \text{ m,}$$

so daß die Richtung von R aus dem Verhältnis $\frac{x_r}{y_r}$ zu bestimmen ist (s. Abb. 90 links).

2. Berechnung des bei B durchschnittenen ringförmigen Rahmens nach der Elastizitätslehre.

Wird das Tunnelprofil bei B durchschnitten gedacht, so kann das frei bewegliche Ende bei B statt bei A angenommen werden, und die Berechnung der Summenausdrücke ist wie in den obigen Tabellen bei B (bzw. 8') zu beginnen, und ringsherum wieder bis B (bzw. 9') fortzusetzen. Die Rechnung geht daher von Spalte V' (8') wie oben aus und setzt sich nach links bis zum Scheitel (1') fort, und von hier aus in der zweiten Rubrik wieder bis zur unteren Mitte (11) und in der ersten Rubrik rückwärts bis VI' (9'), so daß man die auf S. 60 und 61 folgende Tabelle für die vertikale Belastung erhält.

Die Ausrechnung der Werte $\Sigma P \cdot b$ für die vertikalen Lasten ergibt nach derselben $H = - 34,50^t$, $V = 78,6$ (0,72 - 1,72) = $- 78,6^t$, $M = + 117,86^{mt}$ (V siehe unten).

Werden die gleichfalls auf den ringförmigen Rahmen wirkenden Auflagerdrücke = $78,6^t$ in der Mitte der Fundamente von $2,3^m$ Breite angenommen, so erhält man durch Interpolation aus der folgenden Tabelle:

$$H = - 0 - \frac{0,43}{1,58} \cdot 0,001 = 0 \text{ und } H = - 0,594 + \frac{0,43}{1,58} \cdot 0,209 = - 0,537, \quad V = 1,72 \cdot (- 78,6)$$

$$M = - 4,480 + \frac{0,43}{1,58} \cdot 1,576 = - 4,051 \text{ und } M = + 1,832 - \frac{0,43}{1,58} \cdot 0,651 = + 1,655 \text{ und zusammen}$$

$$H = - 0,537 \cdot (- 78,6) = + 42,21^t \text{ und } M = (- 4,051 + 1,655) \cdot (- 78,6) = + 188,33^{mt}$$

(da die vertikale Belastung P positiv eingeführt wurde, so ist der entgegengesetzt wirkende Auflagerdruck negativ einzusetzen s. S. 11).

Man erhält daher zusammen $H = - 34,50 + 42,21 = + 7,71^t$, $M = 117,86 + 188,33 = + 306,19^{mt}$.

Vertikalen	Scheitel (1') I (1)	I' (2') II (2)	II' (3') III (3)	III' (4') IV (4)	IV' (5') V (5)
x	± 0,8	± 2,25	± 3,35	± 4,18	± 4,63
$y = 5,74 - y'$	5,67	5,13	4,24	3,23	2,13
w	37,9	34,9	30,2	13,8	8,5
$w_x = w \cdot x$	± 30,3	± 78,5	± 101,2	± 57,7	± 39,4
$w_y = w \cdot y$	214,9	179,0	128,1	44,6	18,1
$w \cdot x^2$	24,3	176,7	338,9	241,1	182,2
$w \cdot y^2$	1218,4	918,5	542,9	144,0	38,6
$1 \sum_a^l w_y (a-x)$	520,59 + 1,6 · · 372,8 + 0,8 · · 214,9 = = + 1288,99	152,30 + 1,3 · · 193,8 + 0,65 · · 179,0 = = + 520,59	35,52 + 0,9 · · 65,7 + 0,45 · · 128,1 = = + 152,30	2,54 + 0,76 · · 21,1 + 0,38 · · 44,6 = + 35,52	0,95 + 0,11 · · 3,0 + 0,07 · · 18,1 = + 2,54
$H = \frac{-1 \sum \dots}{\sum w y^2 + \sum s} (= 8872,3) \dots$	- 0,145	- 0,059	- 0,017	- 0,004	0
desgleichen	1288,9 + 1,6 · · 587,7 + 0,8 · · 214,9 = = + 2401,23 - 0,270	2401,23 + 1,3 · · 802,6 + 0,65 · · 179,0 = = + 3560,96 - 0,401	3560,96 + 0,9 · · 981,6 + 0,45 · · 128,1 = = + 4502,04 - 0,508	4502,04 + 0,76 · · 1109,7 + 0,38 · · 44,6 = = + 5362,36 - 0,605	5362,36 + 0,11 · · 1154,3 + 0,04 · · 18,1 = = + 5490,06 - 0,619
$1 \sum_a^l w_x (a-x)$	- 950,52 + + 1,6 (- 424,8) + + 0,8 (- 30,3) = = - 1654,44	- 449,30 + + 1,3 (- 346,3) + + 0,65 (- 78,5) = = - 950,52	- 183,17 + + 0,9 (- 245,1) + + 0,45 (- 101,2) = = - 449,30	- 18,82 + 0,76 (- 187,4) + + 0,38 (- 57,7) = = - 183,17	0,22 + 0,11 · · (- 148,0) + + 0,07 (- 39,4) = = - 18,82
$V = \frac{-1 \sum \dots}{\sum w x^2} (= 4594,6) \dots$	+ 0,360	+ 0,207	+ 0,098	+ 0,040	+ 0,004
desgleichen	- 1654,44 + + 1,6 (- 455,1) + + 0,8 · 30,3 = = - 2358,36 + 0,513	- 2358,36 + + 1,3 (- 424,8) + + 0,65 · 78,5 = = - 2859,58 + 0,622	- 2859,58 + + 0,9 (- 346,3) + + 0,45 · 101,2 = = - 3125,79 + 0,680	- 3125,79 + + 0,76 (- 245,1) + + 0,38 · 57,7 = = - 3290,06 + 0,716	- 3290,06 + + 0,11 (- 187,4) + + 0,04 · 39,4 = = - 3309,10 + 0,720
$1 \sum_a^l w (a-x)$	233,16 + 1,6 · · 119,1 + 0,8 · · 37,9 = = + 454,04	101,01 + 1,3 · · 84,2 + 0,65 · · 34,9 = = + 233,16	39,82 + 0,9 · · 54,0 + 0,45 · · 30,2 = = + 101,01	4,02 + 0,76 · · 40,2 + 0,38 · · 13,8 = = + 39,82	- 0,06 + 0,11 · · 31,7 + 0,07 · · 8,5 = = + 4,02
$M = \frac{1 \sum \dots}{\sum w} (= 767,6) \dots$	+ 0,592	+ 0,304	+ 0,132	+ 0,052	+ 0,005
desgleichen	454,04 + + 1,6 · 157 + + 0,8 · 37,9 = = + 735,56 + 0,958	735,56 + + 1,3 · 194,9 + + 0,65 · 34,9 = = + 1011,61 + 1,318	1011,61 + + 0,9 · 229,8 + + 0,45 · 30,2 = = + 1232,02 + 1,605	1232,02 + + 0,76 · 260 + + 0,38 · 13,8 = = + 1434,86 + 1,869	1434,86 + + 0,11 · 273,8 + + 0,04 · 8,5 = = + 1465,32 + 1,911
P (Gesamtbelastung)	21,4	18,8	14,6	13,9	2,3
$H \begin{cases} 1' - 11' \\ 1 - 11 \end{cases}$	- 0,10 - 0,21	- 0,04 - 0,34	- 0,01 - 0,46	0 - 0,56	0 - 0,61
$V \begin{cases} 1' - 11' \\ 1 - 11 \end{cases}$ (interpolierte Einflußordinaten)	+ 0,28 + 0,44	+ 0,15 + 0,57	+ 0,07 + 0,65	+ 0,02 + 0,70	0 + 0,72
$M \begin{cases} 1' - 11' \\ 1 - 11 \end{cases}$	+ 0,45 + 0,78	+ 0,22 + 1,14	+ 0,09 + 1,46	+ 0,03 + 1,74	0 + 1,89

V' (6) V (6)	V' (7) V (7)	V' (8) VI (8)	VI' (9) VII (9)	VII' (10) VIII (10)	VIII' (11) Mitte (11)	$\Sigma 1' - 11'$
± 4,69 1,07 12,0	± 4,69 0,01 12,0	± 4,60 - 1,29 7,7	± 3,79 - 2,56 3,8	± 2,15 - 2,50 116,0	± 0,07 - 2,70 107,0	$2 \times 383,8 =$ $= 767,6$
± 56,3 12,8 264,0 13,7	± 56,3 0,1 264,0 0	± 35,4 - 9,9 162,9 12,8	± 14,4 - 9,7 54,6 24,9	± 249,4 - 290,0 536,2 725,0	± 74,9 - 288,9 52,4 780,0	$2 \times 2297,3 =$ $= 4594,6$ $2 \times 4418,8 =$ $= 8837,6$
$0,99 + 0,03 \cdot$ $\cdot (-9,8) + 0,02 \cdot$ $\cdot 12,8 = + 0,95$ 0	$0,59 - 0,04 \cdot$ $\cdot (-9,9) - 0,01 \cdot$ $\cdot 0,1 = + 0,99$ 0	$- 0,06 (-9,9) =$ $= + 0,59$ 0	$13,84 - 1,58 \cdot$ $\cdot 7,9 - 0,69 \cdot$ $\cdot (-9,7) =$ $= + 8,04$ - 0,001	$243,19 - 1,5 \cdot$ $\cdot 297,9 - 0,75 \cdot$ $\cdot (-290) =$ $= + 13,84$ - 0,002	$862,48 - 1,4 \cdot$ $\cdot 586,8 - 0,7 \cdot$ $\cdot (-288,9) =$ $= + 243,19$ - 0,028	$8837,6 + 2 \cdot$ $\cdot 17,36 =$ $= 8872,3$ bei VI' (9) ist $H = 0$
$5490,06 + 0,03 \cdot$ $\cdot 1172,4 + 0,01 \cdot$ $\cdot 12,8 =$ $= + 5525,34$ - 0,623	$5525,34 -$ $- 0,04 \cdot 1185,2 -$ $- 0,03 \cdot 0,1 =$ $= + 5477,95$ - 0,618	$5477,95 - 0,18 \cdot$ $\cdot 1185,3 - 0,12$ $\cdot (-9,9) =$ $= + 5265,78$ - 0,594	$5265,78 - 1,58 \cdot$ $\cdot 1175,4 - 0,89 \cdot$ $\cdot (-9,7) =$ $= + 3417,28$ - 0,385	$3417,28 - 1,5 \cdot$ $\cdot 1165,7 - 0,75 \cdot$ $\cdot (-290) =$ $= + 1886,23$ - 0,213	$1886,23 -$ $- 1,4 \cdot 875,7 -$ $- 0,7 (-288,9) =$ $= + 862,48$ - 0,097	
$4,10 + 0,03 \cdot$ $\cdot (-91,7) + 0,02 \cdot$ $\cdot (-56,3) =$ $= + 0,22$ 0	$2,14 - 0,04 \cdot$ $\cdot (-35,4) -$ $- 0,01 (-56,3) =$ $+ 4,10$ - 0,001	$- 0,06 \cdot (-35,4) =$ $= + 2,12$ 0	$- 4582,50 -$ $- 1,58 \cdot 14,4 -$ $- 0,69 (-14,4) =$ $= - 4595,32$ + 1,000	$- 4373,85 - 1,5 \cdot$ $\cdot 263,8 - 0,75 \cdot$ $\cdot (-249,4) =$ $= - 4582,50$ + 0,997	$- 3952,1 -$ $- 1,4 \cdot 338,7 -$ $- 0,7 (-74,9) =$ $= - 4373,85$ + 0,952	bei VI' (9) ist $V = 1$
$- 3309,10 +$ $+ 0,03 (-148) +$ $+ 0,01 \cdot 56,3 =$ $= - 3312,98$ + 0,721	$- 3312,98 -$ $- 0,04 (-91,7) -$ $- 0,03 \cdot 56,3 =$ $= - 3311,00$ + 0,720	$- 3311 - 0,18 \cdot$ $\cdot (-35,4) -$ $- 0,12 \cdot 35,4 =$ $= - 3308,88$ + 0,720	$- 3308,88 -$ $- 1,58 \cdot 0 - 0,89 \cdot$ $\cdot 14,4 =$ $= - 3321,70$ + 0,723	$- 3321,70 -$ $- 1,5 \cdot 14,4 -$ $- 0,75 \cdot 249,4 =$ $= - 3530,35$ + 0,768	$- 3530,35 -$ $- 1,4 \cdot 263,8 -$ $- 0,7 \cdot 74,9 =$ $= - 3952,10$ + 0,860	
$- 0,89 + 0,03 \cdot$ $\cdot 19,7 + 0,02 \cdot$ $\cdot 12 =$ $= - 0,06$ 0	$- 0,46 - 0,04 \cdot$ $\cdot 7,7 - 0,01 \cdot$ $\cdot 12 =$ $= - 0,89$ - 0,001	$- 0,06 \cdot 7,7 =$ $= - 0,46$ - 0,001	$- 2280,71 -$ $- 1,58 \cdot 763,9 -$ $- 0,69 \cdot 3,8 =$ $= - 3440,29$ - 4,482	$- 1171,86 -$ $- 1,5 \cdot 647,9 -$ $- 0,75 \cdot 116 =$ $= - 2230,71$ - 2,906	$- 339,70 -$ $- 1,4 \cdot 540,9 -$ $- 0,7 \cdot 107,0 =$ $= - 1171,86$ - 1,526	bei VI' (9) ist $M = - 4,48$
$1465,32 +$ $+ 0,03 \cdot 282,3 +$ $+ 0,01 \cdot 12 =$ $= + 1473,91$ + 1,920	$1473,91 -$ $- 0,04 \cdot 294,3 -$ $- 0,03 \cdot 12 =$ $= + 1461,78$ + 1,904	$1461,78 -$ $- 0,18 \cdot 306,3 -$ $- 0,12 \cdot 7,7 =$ $= + 1405,72$ + 1,832	$1405,72 -$ $- 1,58 \cdot 314,0 -$ $- 0,89 \cdot 3,8 =$ $= + 906,22$ + 1,181	$906,22 -$ $- 1,5 \cdot 317,8 -$ $- 0,75 \cdot 116,0 =$ $= + 342,52$ + 0,447	$342,52 -$ $- 1,4 \cdot 433,8 -$ $- 0,7 \cdot 107,0 =$ $= - 339,70$ - 0,442	
2,0 0 - 0,62 0 + 0,72 0 + 1,92	2,0 0 - 0,62 0 + 0,72 0 + 1,91	3,6 0 - 0,61 0 + 0,72 0 + 1,87	- 0 - 0,49 + 1,00 + 0,72 - 3,69 + 1,51	- - 0,01 - 0,30 + 0,97 + 0,75 - 2,22 + 0,82	- - 0,06 - 0,16 + 0,91 + 0,81 - 0,98 0	78,6 t

Die Werte von H , V und M für die horizontalen Kräfte erhält man aus folgender Tabelle:

Vertikalen	Scheitel (1') I (1)	I' (2') II (2)	II' (3') III (3)	III' (4') IV (4)	IV' (5') V (5)	V' (6') V (6)	V' (7') V (7)	V' (8') VI (8)	
$b = b$ (s. S. 58) + 3,74	6,14 5,86	5,86 5,20	5,20 4,36	4,36 2,69	2,69 1,60	1,60 0,54	0,54 - 0,52	- 0,52 - 2,01	
$w \cdot y$	214,9	179,0	128,1	44,6	18,1	12,8	0,1	- 9,9	
$w \cdot y^2$	1218,4	918,5	542,9	144,0	38,6	13,7	0	12,8	
$\Sigma w y$	+ 587,7 + 802,6	+ 372,8 + 981,6	+ 193,8 + 1109,7	+ 65,7 + 1154,3	+ 21,1 + 1172,4	+ 3,0 + 1185,2	- 9,8 + 1185,3	- 9,9 + 1174,4	
$\Sigma w y^2$	2888,9 4107,3	1670,5 5025,8	752,0 5568,7	209,1 5712,7	65,1 5751,3	26,5 5765,0	12,8 5765,0	12,8 5777,8	
$b \Sigma w y$	+ 3608,5 + 4703,2	+ 2184,6 + 5104,3	+ 1007,8 + 4838,4	+ 286,5 + 3105,1	+ 56,8 + 1875,8	+ 4,8 + 640,0	- 5,3 - 616,4	+ 5,1 - 2360,5	
$\Sigma w y^2 - b \Sigma w y$	- 719,6 - 595,9	- 514,1 - 78,5	- 255,8 + 730,3	- 77,4 + 2607,6	+ 8,3 + 3875,5	+ 21,7 + 5125,0	+ 18,1 + 6381,4	+ 7,7 + 8138,3	
$H = - \frac{1 (\Sigma w y^2 - b \Sigma w y)}{\Sigma w y^2 + \Sigma \frac{s}{F}} (= 8872,3)$	+ 0,081 + 0,067	+ 0,058 + 0,009	+ 0,029 - 0,082	+ 0,009 - 0,294	- 0,001 - 0,437	- 0,002 - 0,578	- 0,002 - 0,719	- 0,001 - 0,917	
y	5,67	5,13	4,24	3,23	2,13	1,07	0,01	- 1,29	
$w \cdot x$	∓ 30,3	∓ 78,5	∓ 101,2	∓ 57,7	∓ 39,4	∓ 56,3	∓ 56,3	∓ 35,4	
$w \cdot x \cdot y$	∓ 171,8	∓ 402,7	∓ 429,1	∓ 186,4	∓ 83,9	∓ 60,2	∓ 0,6	± 45,7	
$\Sigma w x$	- 455,1 - 424,8	- 424,8 - 346,3	- 346,3 - 245,1	- 245,1 - 187,4	- 187,4 - 148,0	- 148,0 - 91,7	- 91,7 - 35,4	- 35,4 0	
$\Sigma w x y$	- 1289,0 - 1117,2	- 1117,2 - 714,5	- 714,5 - 285,4	- 285,4 - 99,0	- 99,0 - 15,1	- 15,1 + 45,1	+ 45,1 + 45,7	+ 45,7 0	
$b \Sigma w x$	- 2794,3 - 2489,3	- 2489,3 - 1800,8	- 1800,8 - 1068,6	- 1068,6 - 504,1	- 504,1 - 236,8	- 236,8 - 49,5	- 49,5 + 18,4	+ 18,4 0	
$\Sigma w x y - b \Sigma w x$	1505,3 1372,1	1372,1 1086,3	1086,3 783,2	783,2 405,1	405,1 221,7	221,7 94,6	94,6 27,3	27,3 0	
$V = - \frac{1 (\Sigma w x y - b \Sigma w x)}{\Sigma w x^2} (= 4954,6)$	- 0,304 - 0,277	- 0,277 - 0,219	- 0,219 - 0,158	- 0,158 - 0,082	- 0,082 - 0,045	- 0,045 - 0,019	- 0,019 - 0,006	- 0,006 0	
w	37,9	34,9	30,2	13,8	8,5	12,0	12,0	7,7	
Σw	157,0 194,9	119,1 229,8	84,2 260,0	54,0 273,8	40,2 282,3	31,7 294,3	19,7 306,3	7,7 314,0	
$\Sigma w y$	+ 587,7 + 802,6	+ 372,8 + 981,6	+ 193,8 + 1109,7	+ 65,7 + 1154,3	+ 21,1 + 1172,4	+ 3,0 + 1185,2	- 9,8 + 1185,3	- 9,9 + 1174,4	
$b \Sigma w$	+ 964,0 + 1142,1	+ 697,9 + 1195,0	+ 437,8 + 1133,6	+ 235,4 + 736,5	+ 108,1 + 451,7	+ 50,7 + 158,9	+ 10,6 - 159,3	- 4,0 - 631,1	
$\Sigma w y - b \Sigma w$	- 376,3 - 339,5	- 325,1 - 213,4	- 244,0 - 23,9	- 169,7 + 417,8	- 87,0 + 720,7	- 47,7 + 1026,3	- 20,4 + 1344,6	- 5,9 + 1805,5	
$M = \frac{1 (\Sigma w y - b \Sigma w)}{\Sigma w} (= 767,6)$	- 0,490 - 0,442	- 0,423 - 0,278	- 0,318 - 0,031	- 0,221 + 0,544	- 0,113 + 0,939	- 0,062 + 1,337	- 0,027 + 1,752	- 0,008 + 2,352	
P	∓ 2,0	∓ 5,0	∓ 7,0	∓ 16,2	∓ 12,1	∓ 13,0	∓ 14,2	∓ 22,0	91,5
H	+ 0,07 + 0,08	+ 0,04 + 0,04	+ 0,02 - 0,04	0 - 0,19	0 - 0,37	0 - 0,51	0 - 0,65	0 - 0,82	
V	- 0,29 - 0,29	- 0,25 - 0,25	- 0,19 - 0,19	- 0,12 - 0,12	- 0,06 - 0,06	- 0,03 - 0,03	- 0,01 - 0,01	0 0	
M	- 0,46 - 0,47	- 0,37 - 0,36	- 0,27 - 0,16	- 0,17 + 0,26	- 0,09 + 0,74	- 0,05 + 1,14	- 0,02 + 1,55	0 + 2,05	

Die Ausrechnung der Werte $\Sigma P \cdot b$ für die horizontalen Kräfte ergibt:

$$H = -41,86 \text{ t}, \quad V = 0, \quad M = +100,67 \text{ mt},$$

somit zusammen:

$$\begin{aligned} H &= 7,71 - 41,86 = -34,15 \text{ t}, \\ V &= -78,6 \text{ t}, \\ M &= 306,19 + 100,67 = +406,86 \text{ mt}. \end{aligned}$$

Für den halben Erddruck sind obige Werte mit 0,487 zu multiplizieren, so daß man erhält:

$$\begin{aligned} H &= -0,487 \cdot 41,86 = -20,39 \text{ t}, \\ V &= 0, \quad M = 0,487 \cdot 100,67 = +49,03 \text{ mt} \end{aligned}$$

und zusammen:

$$\begin{aligned} H &= 7,71 - 20,39 = -12,68 \text{ t}, \\ V &= -78,6 \text{ t}, \\ M &= 306,19 + 49,03 = +355,22 \text{ mt}. \end{aligned}$$

Die Lage der Resultante R am Kämpfer ergibt sich aus

$$\begin{aligned} r &= \frac{M}{R} \text{ von } R = \sqrt{H^2 + V^2} = \sqrt{34,15^2 + 78,6^2} = 85,70 \text{ t}, \\ r &= \frac{406,86}{85,70} = 4,747 \text{ m}, \\ x_r &= \frac{M}{V} = \frac{406,86}{-78,6} = -5,177 \text{ m}, \\ y_r &= \frac{M}{H} = \frac{406,86}{-34,14} = -11,918 \text{ m}, \end{aligned}$$

bzw. für halben Erddruck aus:

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{12,68^2 + 78,6^2} = 79,61 \text{ t}, \\ r &= \frac{355,22}{79,61} = 4,462 \text{ m}, \\ x_r &= \frac{355,22}{-78,6} = -4,520 \text{ m}, \\ y_r &= \frac{355,22}{-12,68} = -28,014 \text{ m}. \end{aligned}$$

3. Vergleichende Berechnung des ringförmigen Rahmens für verschiedene Fundamentstärken.

In Abb. 90 sind vier verschiedene Fälle berücksichtigt, und zwar bedeuten die ausgezogene und gestrichelte Linie links (wie auch das entsprechend ausgezogene Kräftepolygon links) die Stützlinsen für Eingespanntsein bei A und B mit ganzem und halbem Erddruck, und diejenigen rechts die Stützlinsen für ringförmige Berechnung des bei B durchschnittenen Rahmens. Hierbei wurde zunächst die horizontale Koordinatenachse mit den Abständen $z = 2,00$ und $5,74 \text{ m}$ vom Scheitel eingezeichnet, und das berechnete x_r und y_r von dem Koordinatenursprung O aus aufgetragen und durch ihre Endpunkte die Resultante R gezogen, welche den Abstand r von O haben muß (bei zu großem y_r ist das Verhältnis x_r zu y_r aufzutragen, und durch den Endpunkt von x_r eine Parallele zu ihrer Verbindungslinie zu ziehen).

Die im Koordinatenursprung angenommenen Kräfte H und V sind aber bei positivem Vorzeichen von links nach rechts und von unten nach oben aufzutragen (und bei negativem Vorzeichen entgegengesetzt), um die Richtung ihrer Resultante R zu erhalten, welche beim eingespannten Rahmen nach links und oben und beim ringförmigen Rahmen nach links und unten geht, und ist die Stützlinie im letzteren Fall in der Verlängerung von R auf der rechten Seite gezeichnet (dieselbe würde auf der linken Seite symmetrisch verlaufen, da zwischen A und B nur die zwei Auflagerdrücke vorhanden sind).

Der in dieser Weise bestimmte Kämpferdruck R ist nun mit den aus der Zusammensetzung der horizontalen und vertikalen Kräfte im Kräftepolygon entstandenen schiefen Richtungen (dieselben sind für ganzen Erddruck ausgezogen und für halben Erddruck gestrichelt) zusammzusetzen, um durch Parallelen zu den Strahlen des Kräftepolygons die Stützlinsen für ganzen und halben Erddruck zu erhalten (die Pole der Kräftepolygone ergeben sich durch Parallelen zu R).

Da die Stützlilie der ringförmigen Berechnung mit halbem Erddruck große Spannungen im Scheitel ergibt, so sollen noch zwei Fälle untersucht werden, und zwar für die Fundamentstärke in der Mitte von $0,84 \text{ m}$ (bei Verbindung der seitlichen Lamellenunterkanten) und von $1,20 \text{ m}$. Die Stützlinsen für den ersteren Fall sind links gezeichnet, und zwar mit einem Strich und Punkt bei ganzem Erddruck und mit zwei Strichen und einem Punkt bei halbem Erddruck, und diejenigen für den letzteren Fall sind in derselben Weise rechts gezeichnet, und die zugehörigen Kräftepolygone sind ebenso angenommen worden.

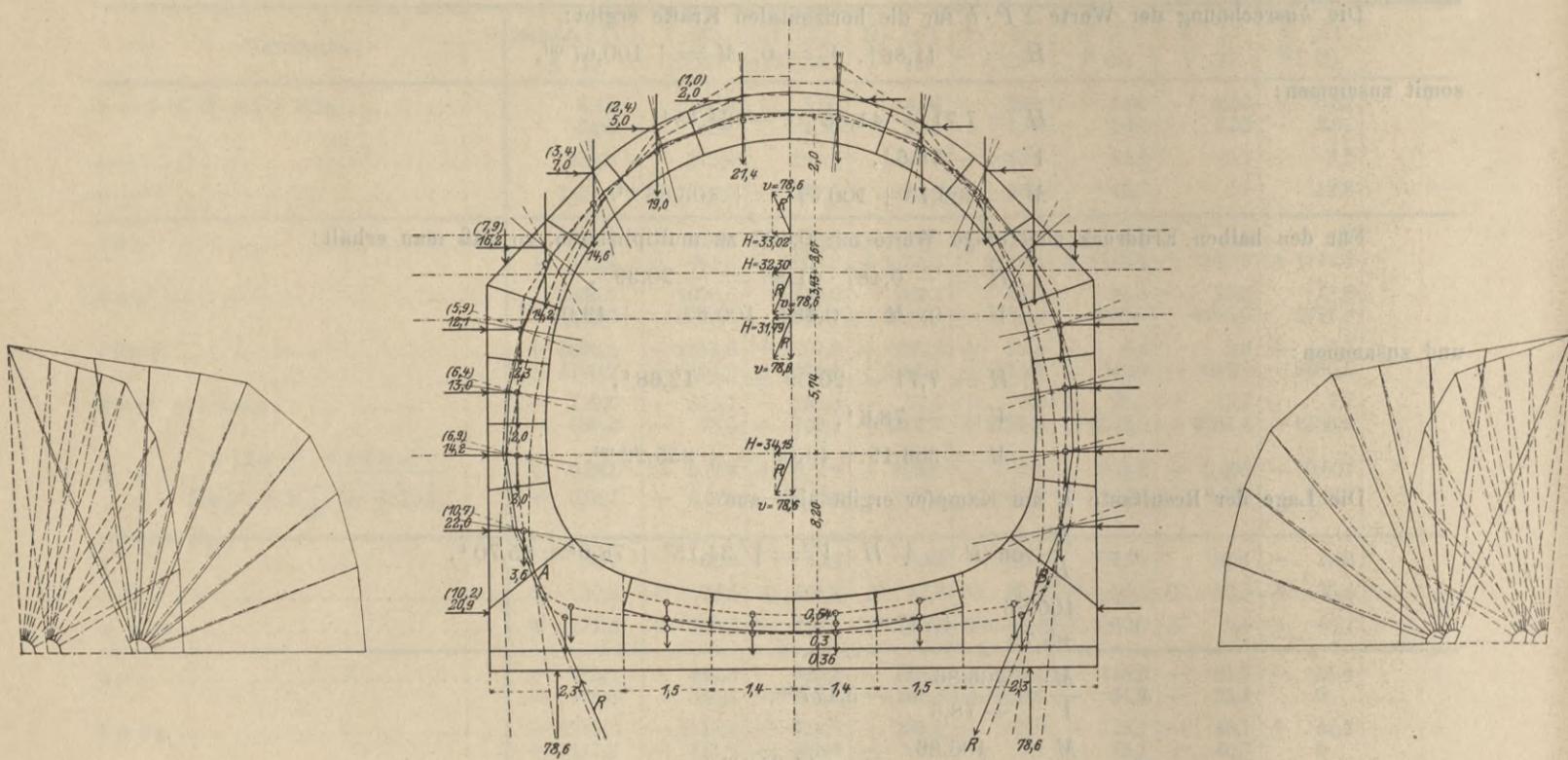


Abb. 90.

Für die unteren Lamellen 9—11 erhält man nun in diesen beiden Fällen:

Lamelle	9	10	11	Σ 9—11	9	10	11	Σ 9—11
x	3,79	2,15	0,7		3,90	2,15	0,7	
y' (Abstand v. Scheitel)	8,3	8,5	8,6		8,5	8,7	8,8	
s	1,8	1,5	1,4		2,0	1,5	1,4	
h	1,78	1,07	0,87		2,2	1,43	1,23	
$J = 1 \cdot \frac{h^3}{12}$	0,470	0,102	0,055		0,887	0,244	0,155	
$w = \frac{s}{J}$	3,8	14,7	25,5	44,0	2,3	6,2	9,0	17,5
$\frac{s}{F} (F = 1,0 h)$	1,01	1,40	1,61	4,02	0,91	1,05	1,14	3,10

Der Koordinatenursprung ergibt sich daher im ersten Fall aus (s. S. 56):

$$z = \frac{\Sigma w \cdot y'}{\Sigma w} = \frac{313,50 + 8,3 \cdot 3,8 + 8,5 \cdot 14,7 + 8,6 \cdot 25,5}{157,0 + 44,0} = 3,43 \text{ m und im zweiten Fall aus}$$

$$z = \frac{313,50 + 8,5 \cdot 2,3 + 8,7 \cdot 6,2 + 8,8 \cdot 9,0}{157,0 + 17,5} = 2,67 \text{ m, und für die ringförmige Berechnung ist}$$

$$\Sigma w = 2 \cdot 201,0 = 402 \text{ bzw. } = 2 \cdot 174,5 = 349 \text{ und } \Sigma \frac{s}{F} = 2(10,97 + 4,02) = 30,0 \text{ bzw. } = 2(10,97 + 3,10) = 28,1.$$

Die Rechnung ist nun in beiden Fällen wie auf S. 60—62 durchzuführen, und zwar mit Weglassung der Summenausdrücke V (da nur bei unsymmetrischer Belastung V nicht = 0 wird). Auch bei der Berechnung von M ergeben sich Vereinfachungen, da die Summenausdrücke $\Sigma w(a-x)$ und $\Sigma wy - b \cdot \Sigma w$ für die Lamellen 1—8 sich gleich bleiben (indem auch y und b um das gleiche Maß verschieden sind, und nur der Nenner von M sich ändert).

Die Ausrechnung der Werte $\Sigma P \cdot b$ ergibt für die vertikale Belastung:

$$H = -22,50^t, V \text{ (s. oben)} = -78,6^t, M = +224,77^{\text{mt}}$$

Wird der Auflagerdruck wie oben angenommen, so erhält man durch Interpolation (s. Tabelle):

$$H = 0 - \frac{0,43}{1,58} \cdot 0,004 = -0,001 \text{ und } H = -0,473 + \frac{0,43}{1,58} \cdot 0,160 = -0,429, \text{ zus. } -0,430 \cdot (-78,6) = +33,80^t,$$

$$M = -4,480 + \frac{0,43}{1,58} \cdot 1,571 = -4,052 \text{ und } M = +3,496 - \frac{0,43}{1,58} \cdot 1,242 = +3,158, \text{ zus. } -0,894 \cdot (-78,6) = +70,27^{\text{mt}},$$

somit erhält man: $H = -22,50 + 33,80 = +11,30^t$ und $M = +224,77 + 70,27 = +295,04^{\text{mt}}$.

Die Einflußordinaten der Horizontalkräfte ergeben sich aus folgender Tabelle:

Vertikalen	Scheitel (1')	I' (2')	II' (3')	III' (4')	IV' (5')	V' (6')	V' (7')	V' (8')
	I (1)	II (2)	III (3)	IV (4)	V (5)	V (6)	V (7)	VI (8)
$b = b \text{ (s. S. 58)} + 1,43 \dots$	3,83 3,55	3,55 2,89	2,89 2,05	2,05 0,38	0,38 -0,71	-0,71 -1,77	-1,77 -2,83	-2,83 -4,32
$w_y = w \cdot y \dots\dots\dots$	127,3	98,4	58,3	12,7	-1,5	-14,9	-27,6	-27,7
$w \cdot y^2 \dots\dots\dots$	427,9	277,5	112,5	11,7	0,3	18,5	63,5	99,8
$\Sigma w y \dots\dots\dots$	+ 225,0 + 352,3	+ 97,7 + 350,7	- 0,7 + 409,0	- 59,0 + 421,7	- 71,7 + 420,2	- 70,2 + 405,3	- 55,3 + 377,7	- 27,7 + 350,0
$\Sigma w y^2 \dots\dots\dots$	1011,7 1439,6	583,8 1717,1	306,3 1829,6	193,8 1841,3	182,1 1841,6	181,8 1860,1	163,3 1923,6	99,8 2023,4
$b \Sigma w y \dots\dots\dots$	+ 861,8 + 1250,7	+ 346,8 + 1013,5	- 2,0 + 838,5	- 121,0 + 160,2	- 27,2 - 298,3	+ 49,8 - 717,4	+ 97,9 - 1068,9	+ 78,4 - 1512,0
$\Sigma w y^2 - b \Sigma w y \dots\dots\dots$	149,9 188,9	237,0 703,6	308,3 991,1	314,8 1681,1	209,3 2139,9	132,0 2577,5	65,4 2992,5	21,4 3535,4
$H = \frac{-1(\Sigma w y^2 - b \Sigma w y)}{\Sigma w y^2 + \Sigma \frac{s}{P'}} =$ (= 4352,6) $\dots\dots\dots$	- 0,035 - 0,044	- 0,054 - 0,162	- 0,071 - 0,228	- 0,072 - 0,386	- 0,048 - 0,492	- 0,030 - 0,592	- 0,015 - 0,687	- 0,005 - 0,812
$P \dots\dots\dots$	± 2,0 - 0,05	± 5,0 - 0,06	± 7,0 - 0,07	± 16,2 - 0,06	± 12,1 - 0,04	± 13,0 - 0,02	± 14,2 - 0,01	± 22,0 0
$H \dots\dots\dots$	- 0,04	- 0,11	- 0,20	- 0,31	- 0,45	- 0,55	- 0,65	- 0,76

Die Ausrechnung der Werte $\Sigma P \cdot b$ ergibt für die horizontalen Kräfte (s. S. 63):

$$H = -43,09^t, V = 0, M = \frac{767,6}{402,0} \cdot 100,67 = +192,22^{\text{mt}}, \text{ somit zusammen:}$$

$$H = +11,30 - 43,09 = -31,79^t, V = -78,6^t, M = +295,04 + 192,22 = +487,26^{\text{mt}}$$

Für den halben Erddruck sind obige Werte mit 0,487 zu multiplizieren, so daß man erhält:

$$H = -0,487 \cdot 43,09 = -20,98^t, V = 0, M = +0,487 \cdot 192,22 = +93,61^{\text{mt}}, \text{ somit zusammen:}$$

$$H = +11,30 - 20,98 = -9,68^t, V = -78,6^t, M = +295,04 + 93,61 = +388,65^{\text{mt}}$$

Die Lage der Resultante R am Kämpfer ergibt sich aus $r = \frac{M}{R}$ wo $R = \sqrt{H^2 + V^2} = \sqrt{31,79^2 + 78,6^2} =$

$$= 84,79^t, r = \frac{487,26}{84,79} = 5,747^{\text{m}}, x_r = \frac{M}{V} = \frac{487,26}{-78,6} = -6,199^{\text{m}}, y_r = \frac{M}{H} = \frac{487,26}{-31,79} = -15,327^{\text{m}}, \text{ bzw.}$$

für den halben Erddruck aus:

$$R = \sqrt{9,68^2 + 78,6^2} = 79,19^t, r = \frac{388,65}{79,19} = 4,908^{\text{m}}, x_r = \frac{388,65}{-78,6} = -4,945^{\text{m}}, y_r = \frac{388,65}{-9,68} = -40,150^{\text{m}}$$

Ebenso erhält man im zweiten Fall folgende Tabelle für die vertikalen Kräfte:

Vertikalen	Scheitel (1') I (1)	I' (2') II 2	II' (3') III (3)	III' (4') IV (4)	IV' (5') V (5)	V' (6') V (6)	V' (7') V (7)	V' (8') VI (8)	VI' (9') VII (9)	VII' (10') VIII (10)	VIII' (11') Mitte (11)	Σ 1' - 11'
x	$\mp 0,8$	$\mp 2,25$	$\mp 3,35$	$\mp 4,18$	$\mp 4,63$	$\mp 4,69$	$\mp 4,69$	$\mp 4,60$	$\mp 3,90$	$\mp 2,15$	$\mp 0,7$	
$y = 2,67 - y'$	2,60	2,06	1,17	0,16	- 0,94	- 2,00	- 3,06	- 4,36	- 5,83	- 6,03	- 6,13	
w	37,9	34,9	30,2	13,8	8,5	12,0	12,0	7,7	2,3	6,2	9,0	$2 \times 174,5$ $= 349$
$w \cdot y$	98,5	71,9	35,3	2,2	- 8,0	- 24,0	- 36,7	- 33,6	- 13,4	- 37,4	- 55,2	
$w \cdot y^2$	256,2	148,1	41,3	0,4	7,5	48,0	112,4	146,3	78,2	225,4	338,2	$2 \times 1402,0$ $= 2804,0$
$\frac{1}{a} \sum w y (a - x)$	- 198,41	- 160,90	- 86,70	- 9,79	1,14	3,73	2,02	- 0,06	15,71	62,66	171,30	2804,0
Einfußordinaten für	+ 1,6 · 7,1	+ 1,3 · (-64,8)	+ 0,9 · (-100,1)	+ 0,76 · (-102,3)	+ 0,33 · (-94,3)	+ 0,03 · (-70,3)	+ 0,03 · (-33,6)	+ 0,03 · (-33,6)	- 0,12 · (-12,6)	- 0,15 · (-50,0)	- 0,15 · (-105,2)	+ 28,1
$H = - \frac{1}{\Sigma} \sum w y^2 + \frac{\Sigma w^2}{F}$	+ 0,88	+ 0,070	+ 0,057	+ 0,081	+ 0,004	0	- 0,001	- 0,001	- 0,001	- 0,006	- 0,022	+ 2832,1
(= 2832,1)												
desgleichen	- 108,25	139,51	451,58	715,86	983,28	987,44	996,36	986,20	946,17	625,87	357,22	
	+ 1,6 · 105,6	+ 204,1	+ 0,65 · 276,0	+ 0,76 · 311,3	+ 0,313 · 313,5	+ 0,03 · 305,5	+ 0,03 · 305,5	- 0,12 · (-3,36)	- 1,58 · 211,2	- 1,5 · 197,8	- 1,4 · 160,4	
	+ 0,8 · 98,5	+ 71,9	+ 35,3	+ 0,38 · 2,2	+ 0,01 · (-24,0)	+ 0,01 · (-24,0)	+ 0,03 · (-36,7)	+ 0,03 · (-36,7)	- 1,0 · (-13,4)	- 0,75 · (-37,4)	- 0,7 · (-55,2)	
	+ 139,51	+ 451,58	+ 715,86	+ 953,28	+ 987,44	+ 996,36	+ 986,20	+ 946,17	+ 625,87	+ 357,22	+ 171,30	
	- 0,049	- 0,160	- 0,253	- 0,337	- 0,348	- 0,352	- 0,348	- 0,334	- 0,221	- 0,126	- 0,060	
$\frac{1}{a} \sum w (a - x)$	+ 454,04	+ 233,16	+ 101,01	+ 39,82	+ 4,02	- 0,06	- 0,89	- 0,46	- 1015,40	- 500,00	- 29,60	
Einfußordinaten für	+ 1,301	+ 0,668	+ 0,290	+ 0,114	+ 0,012	0	- 0,003	- 0,001	- 1,58 · 346,7	- 1,5 · 340,5	- 1,4 · 331,5	
$M = \frac{1}{\Sigma} \sum w (a - x)$	+ 1,301	+ 0,668	+ 0,290	+ 0,114	+ 0,012	0	- 0,003	- 0,001	- 0,58 · 2,3	- 0,75 · 6,2	- 0,7 · 9,0	
desgleichen	+ 2,108	+ 2,899	+ 3,530	+ 4,111	+ 4,199	+ 4,223	+ 4,189	+ 4,028	+ 2,600	+ 1,227	+ 0,085	
	+ 735,56	+ 1011,61	+ 1232,02	+ 1434,86	+ 1465,32	+ 1473,91	+ 1461,78	+ 1405,72	+ 1405,72	+ 907,30	+ 428,20	
	+ 2,108	+ 2,899	+ 3,530	+ 4,111	+ 4,199	+ 4,223	+ 4,189	+ 4,028	+ 2,600	+ 1,227	+ 0,085	
P (Gesamtbelastung)	21,4	18,8	14,6	13,9	2,3	2,0	2,0	3,6	-	-	-	
H { 1' - 11' (interpolierte)	+ 0,054	+ 0,064	+ 0,044	+ 0,018	0	0	0	0	0	- 0,01	- 0,04	
M { 1' - 11' (Einfußordinaten)	- 0,006	- 0,105	- 0,207	- 0,295	- 0,34	- 0,35	- 0,35	- 0,34	- 0,28	- 0,17	- 0,09	
	+ 0,99	+ 0,48	+ 0,20	- 0,06	+ 0,01	0	0	0	- 3,70	- 2,17	- 0,76	
	+ 1,71	+ 2,50	+ 3,22	+ 3,82	+ 4,16	+ 4,21	+ 4,21	+ 4,11	+ 3,31	+ 1,91	+ 0,57	

Für H wurden drei Dezimalen eingesetzt, um ein genaueres Resultat zu erhalten (noch genauer wäre die Aufzeichnung der Einflußordinaten, wiewohl der Unterschied kein großer ist).

Die Ausrechnung der Werte $\Sigma P \cdot b$ ergibt alsdann für die vertikale Belastung:

$$H = -9,38^t, V = -78,6^t \text{ (s. oben)}, M = +258,90^{\text{mt}}$$

Wird der Auflagerdruck wie oben angenommen, so erhält man durch Interpolation (s. Tabelle): $H = 0 - \frac{0,43}{1,58} \cdot 0,005 = -0,0014$ und $H = -0,334 + \frac{0,43}{1,58} \cdot 0,113 = -0,3033$, zusammen $-0,3047 \cdot (-78,6) = +23,95^t$, $M = -4,480 + \frac{0,43}{1,58} \cdot 1,574 = -4,052$ und $M = +4,028 - \frac{0,43}{1,58} \cdot 1,428 = +3,639$, zusammen $-0,413 \cdot (-78,6) = +32,46^{\text{mt}}$, somit erhält man $H = -9,38 + 23,95 = +14,57^t$ und $M = +258,90 + 32,46 = +291,36^{\text{mt}}$.

Bei gleichförmig wirkendem Gegendruck des Bodens verteilt sich $78,6^t$ auf die Breite von $5,2^m$ mit $\frac{1,4}{5,2} \cdot 78,6 = 21,1^t$, $\frac{1,5}{5,2} \cdot 78,6 = 22,7^t$, $\frac{2,3}{5,2} \cdot 78,6 = 34,8^t$ und man erhält durch Interpolation für die Lamelle 11: $H = -0,093 - 0,041 = -0,134$, 10: $-0,1735 - 0,014 = -0,1875$, 9: $-0,3047$ (s. oben für den Abstand $4,48 - 2,9 = 1,58^m$) und zusammen: $H = +0,134 \cdot 21,1 + 0,1875 \cdot 22,7 + 0,3047 \cdot 34,8 = +17,69^t$.

Ebenso erhält man für 11: $M = +0,571 - 0,759 = -0,188$, 10: $+1,9135 - 2,171 = -0,2575$, 9: $-0,413$ (s. oben) und zusammen: $M = +0,188 \cdot 21,1 + 0,2575 \cdot 22,7 + 0,413 \cdot 34,8 = +24,18^{\text{mt}}$, somit im ganzen: $H = -9,38 + 17,69 = +8,31^t$ und $M = +258,90 + 24,18 = +283,08^{\text{mt}}$.

Das Moment ändert sich daher nur wenig, und es findet nur eine Verschiebung des Angriffspunktes in der Kämpferfuge statt, während im Scheitel keine wesentliche Änderung eintritt. Auch wäre alsdann der Einfluß der Lamellengewichte 9 — 11 und 9' — 11' sowie des Gewichtes der Fahrbahn und der Verkehrslasten zu berücksichtigen (welche den Gegendruck entsprechend vergrößern und durch diesen wieder aufgehoben werden), so daß von einer Berechnung abgesehen werden kann.

Die Einflußordinaten der Horizontalkräfte ergeben sich aus folgender Tabelle:

Vertikalen	Scheitel (1')	I' (2')	II' (3')	III' (4')	IV' (5')	V' (6')	V' (7')	V' (8')
	I (1)	II (2)	III (3)	IV (4)	V (5)	V (6)	V (7)	VI (8)
$b = b$ (s. S. 58) + 0,67.....	3,07	2,79	2,13	1,29	-0,38	-1,47	-2,53	-3,59
$w \cdot y$	2,79	2,13	1,29	-0,38	-1,47	-2,53	-3,59	-5,08
$w \cdot y^2$	98,5	71,9	35,3	2,2	-8,0	-24,0	-36,7	-33,6
	256,2	148,1	41,3	0,4	7,5	48,0	112,4	146,3
$\Sigma w y$	+105,6	+7,1	-64,8	-100,1	-102,3	-94,3	-70,3	-33,6
	+204,1	+276,0	+311,3	+313,5	+305,5	+281,5	+244,8	+211,2
$\Sigma w y^2$	760,2	504,0	355,9	314,6	314,2	306,7	258,7	146,3
	1016,4	1164,5	1205,8	1206,2	1213,7	1261,7	1374,1	1520,4
$b \Sigma w y$	+324,2	+19,8	-138,0	-129,1	+38,9	+138,6	+177,9	+120,6
	+569,4	+587,9	+401,6	-119,1	-449,1	-712,2	-878,8	-1072,9
$\Sigma w y^2 - b \Sigma w y$	436,0	484,2	493,9	443,7	275,3	168,1	80,8	25,7
	447,0	576,6	804,2	1325,3	1662,8	1973,9	2252,9	2593,3
$H = - \frac{1(\Sigma w y^2 - b \Sigma w y)}{\Sigma w y^2 + \Sigma \frac{s}{F}}$	-0,154	-0,171	-0,174	-0,157	-0,097	-0,059	-0,029	-0,009
(= 2832,1)	-0,158	-0,203	-0,284	-0,468	-0,587	-0,697	-0,795	-0,916
P	± 2,0	± 5,0	± 7,0	± 16,2	± 12,1	± 13,0	± 14,2	± 22,0
H	-0,163	-0,173	-0,166	-0,127	-0,078	-0,044	-0,019	-0,005
	-0,156	-0,181	-0,244	-0,376	-0,528	-0,642	-0,746	-0,856

Die Ausrechnung der Werte $\Sigma P \cdot b$ ergibt für die horizontalen Kräfte:

$$H = -46,87^t, V = 0, M = \frac{767,6}{349} \cdot 100,67 = +221,42^{\text{mt}}, \text{ somit zusammen:}$$

$$H = +14,57 - 46,87 = -32,30^t, V = -78,6^t, M = +291,36 + 221,42 = +512,78^{\text{mt}}$$

Für den halben Erddruck sind obige Werte mit 0,487 zu multiplizieren, so daß man erhält:

$$H = -0,487 \cdot 46,87 = -22,83^t, V = 0, M = 0,487 \cdot 221,42 = +107,83^{\text{mt}}, \text{ somit zusammen:}$$

$$H = +14,57 - 22,83 = -8,26^t, V = -78,6^t, M = +291,36 + 107,83 = +399,19^{\text{mt}}$$

Die Lage der Resultante R am Kämpfer ergibt sich aus $r = \frac{M}{R}$, wo $R = \sqrt{H^2 + V^2} = \sqrt{32,30^2 + 78,6^2} = 84,98^t$, $r = \frac{512,78}{84,98} = 6,034^m$, $x_r = \frac{M}{V} = \frac{512,78}{-78,6} = -6,524^m$, $y_r = \frac{M}{H} = \frac{512,78}{-32,30} = -15,876^m$, bzw. für den halben Erddruck aus:

$$R = \sqrt{8,26^2 + 78,6^2} = 79,03^t, r = \frac{399,19}{79,03} = 5,051^m, x_r = \frac{399,19}{-78,6} = -5,079^m, y_r = \frac{399,19}{-8,26} = -48,328^m$$

4. Berechnung der Maximalspannungen des Tunnelquerschnitts und seiner Eiseneinlagen.

Aus der graphischen Ermittlung der Stützlinien ergibt sich (mit Hilfe des Kräftepolygons) für jede Fuge die Resultante R_x , die Normalkraft N_x und die Beanspruchung $\sigma = \frac{N_x}{b \cdot h} \left(1 \pm \frac{6 \cdot c}{h}\right)$, wenn $\pm c$ der Abstand für N_x von der Mitte der Fuge nach $\left\{ \begin{array}{l} \text{außen} \\ \text{innen} \end{array} \right.$ ist. Das positive Moment $M_x = c \cdot N_x$ ergibt alsdann $\left\{ \begin{array}{l} \text{außen Druck} \\ \text{innen Zug} \end{array} \right.$ und das negative Moment $M_x = -c \cdot N_x$ umgekehrt $\left\{ \begin{array}{l} \text{außen Zug} \\ \text{innen Druck} \end{array} \right.$, so daß hieraus die Vorzeichen der Spannungen (Zug positiv und Druck negativ) bestimmt werden können.

Werden die obigen viererlei Berechnungen mit I bis IV bezeichnet und für den ganzen und den halben Erddruck a und b hinzugefügt, so erhält man folgende Spannungen für dieselben in der Kämpferfuge:

$$\begin{aligned} \text{I a: } N_x &= 81,9^t, c = -0,08^m, \sigma_i^a = -\frac{81900}{100 \cdot 188} \left(1 \mp \frac{6 \cdot 8}{188}\right) = \begin{array}{l} -3,3 \\ -5,5 \end{array} \text{ kg} \\ \text{b: } N_x &= 63,3^t, c = +0,61^m, \sigma_i^a = -\frac{63300}{100 \cdot 188} \left(1 \pm \frac{6 \cdot 61}{188}\right) = \begin{array}{l} -9,9 \\ +3,2 \end{array} \text{ kg} \\ \text{II a: } N_x &= 82,8^t, c = -0,19^m, \sigma_i^a = -\frac{82800}{100 \cdot 188} \left(1 \mp \frac{6 \cdot 19}{188}\right) = \begin{array}{l} -1,7 \\ -7,1 \end{array} \text{ kg} \\ \text{b: } N_x &= 69,4^t, c = -0,33^m, \sigma_i^a = -\frac{69400}{100 \cdot 188} \left(1 \mp \frac{6 \cdot 33}{188}\right) = \begin{array}{l} +0,2 \\ -7,6 \end{array} \text{ kg} \\ \text{III a: } N_x &= 81,0^t, c = -0,01^m, \sigma_i^a = -\frac{81000}{100 \cdot 188} \left(1 \mp \frac{6 \cdot 1}{188}\right) = \begin{array}{l} -4,2 \\ -4,4 \end{array} \text{ kg} \\ \text{b: } N_x &= 67,5^t, c = -0,06^m, \sigma_i^a = -\frac{67500}{100 \cdot 188} \left(1 \mp \frac{6 \cdot 6}{188}\right) = \begin{array}{l} -2,9 \\ -4,3 \end{array} \text{ kg} \\ \text{IV a: } N_x &= 81,5^t, c = -0,03^m, \sigma_i^a = -\frac{81500}{100 \cdot 188} \left(1 \mp \frac{6 \cdot 3}{188}\right) = \begin{array}{l} -3,9 \\ -4,8 \end{array} \text{ kg} \\ \text{b: } N_x &= 66,5^t, c = +0,08^m, \sigma_i^a = -\frac{66500}{100 \cdot 188} \left(1 \pm \frac{6 \cdot 8}{188}\right) = \begin{array}{l} -4,4 \\ -2,6 \end{array} \text{ kg} \end{aligned}$$

Für den Scheitel kann die horizontal wirkende Normalkraft aus $N_x = \sum H - H$ bestimmt werden, und ist $\sum H$ für den ganzen Erddruck $= 91,5^t$ und für den halben Erddruck $= 0,487 \cdot 91,5 = 44,56^t$, so daß man erhält:

$$\begin{aligned} \text{I a: } N_x &= 91,50 - 33,02 = 58,48^t, c = +0,04^m, \sigma_u^0 = -\frac{58480}{100 \cdot 80} \left(1 \pm \frac{6 \cdot 4}{80}\right) = \begin{array}{l} -9,5 \\ -5,1 \end{array} \text{ kg} \\ \text{b: } N_x &= 44,56 - 3,35 = 41,21^t, c = +0,35^m, \sigma_u^0 = -\frac{41210}{100 \cdot 80} \left(1 \pm \frac{6 \cdot 35}{80}\right) = \begin{array}{l} -18,7 \\ +8,4 \end{array} \text{ kg} \\ \text{II a: } N_x &= 91,50 - 34,15 = 57,35^t, c = +0,10^m, \sigma_u^0 = -\frac{57360}{100 \cdot 80} \left(1 \pm \frac{6 \cdot 10}{80}\right) = \begin{array}{l} -12,6 \\ -1,8 \end{array} \text{ kg} \\ \text{b: } N_x &= 44,56 - 12,68 = 31,88^t, c = +0,86^m, \sigma_u^0 = -\frac{31880}{100 \cdot 80} \left(1 \pm \frac{6 \cdot 86}{80}\right) = \begin{array}{l} -29,7 \\ +21,7 \end{array} \text{ kg} \\ \text{III a: } N_x &= 91,50 - 31,79 = 59,71^t, c = +0,01^m, \sigma_u^0 = -\frac{59710}{100 \cdot 80} \left(1 \pm \frac{6 \cdot 1}{80}\right) = \begin{array}{l} -13,1 \\ -1,9 \end{array} \text{ kg} \\ \text{b: } N_x &= 44,56 - 9,68 = 34,88^t, c = +0,67^m, \sigma_u^0 = -\frac{34880}{100 \cdot 80} \left(1 \pm \frac{6 \cdot 67}{80}\right) = \begin{array}{l} -26,3 \\ +17,5 \end{array} \text{ kg} \\ \text{IV a: } N_x &= 91,50 - 32,30 = 59,20^t, c = +0,03^m, \sigma_u^0 = -\frac{59200}{100 \cdot 80} \left(1 \pm \frac{6 \cdot 3}{80}\right) = \begin{array}{l} -9,1 \\ -5,7 \end{array} \text{ kg} \\ \text{b: } N_x &= 44,56 - 8,26 = 36,30^t, c = +0,55^m, \sigma_u^0 = -\frac{36300}{100 \cdot 80} \left(1 \pm \frac{6 \cdot 55}{80}\right) = \begin{array}{l} -23,3 \\ +14,2 \end{array} \text{ kg} \end{aligned}$$

Zur Vergleichung soll M_x , N_x , c und σ auch durch Rechnung bestimmt werden, und zwar aus den Formeln $M_x = M + M_0 - H \cdot y - V \cdot x$, $H_x = H - \sum H$, $V_x = V - \sum P$, $N_x = V_x \cdot \cos \varphi + H_x \cdot \sin \varphi$, $c = \frac{M_x}{N_x}$, $\sigma_i^a = \frac{1}{b \cdot h} \left(N_x \pm \frac{6 \cdot M_x}{h}\right)$ s. S. 15, und man erhält aus der Abb. 90 für die Kämpferfuge $\cos \varphi = 0,785$, $\sin \varphi = 0,620$, $x = \pm 4,48^m$, $y = -(7,75 - z)$ wo $z = 2,00; 5,74; 3,43; 2,67$ ist, und

$$\text{I a: } H = -33,02^t, V = 78,6^t, M = 534,13^{\text{mt}}, M_x = 534,13 - 33,02 \cdot 5,75 - 78,6 \cdot 4,48 = -7,86^{\text{mt}},$$

$$N_x = 78,6 \cdot 0,785 + 33,02 \cdot 0,620 = 82,2^t, c = \frac{M_x}{N_x} = -\frac{7,86}{82,2} = -0,096^m,$$

$$\sigma_i^a = -\frac{1}{100 \cdot 188} \left(82200 \mp \frac{6 \cdot 786000}{188}\right) = \begin{array}{l} -3,0 \\ -5,7 \end{array} \text{ kg}$$

$$\begin{aligned}
 \text{I b: } H &= -3,35^t, V = 78,6^t, M = 408,03 \text{ mt}, M_x = 408,03 - 3,35 \cdot 5,75 - 78,6 \cdot 4,48 = +36,64 \text{ mt}, \\
 N_x &= 78,6 \cdot 0,785 + 3,35 \cdot 0,620 = 63,8^t, c = \frac{36,64}{63,8} = +0,574 \text{ m}, \\
 \sigma_i^a &= -\frac{1}{100 \cdot 188} \left(63,800 \pm \frac{6 \cdot 3664000}{188} \right) = \begin{matrix} -9,6 \\ +2,8 \end{matrix} \text{ kg} \\
 \text{II a: } H &= -34,15^t, V = -78,6^t, M = 406,86 \text{ mt}, M_x = 406,86 - 34,15 \cdot 2,01 - 78,6 \cdot 4,48 = -13,91 \text{ mt}, \\
 N_x &= 78,6 \cdot 0,785 + 34,15 \cdot 0,620 = 82,9^t, c = \frac{-13,91}{82,9} = -0,168 \text{ m}, \\
 \sigma_i^a &= -\frac{1}{100 \cdot 188} \left(82900 \mp \frac{6 \cdot 1391000}{188} \right) = \begin{matrix} -2,0 \\ -6,8 \end{matrix} \text{ kg} \\
 \text{II b: } H &= -12,68^t, V = -78,6^t, M = 355,22 \text{ mt}, M_x = 355,22 - 12,68 \cdot 2,01 - 78,6 \cdot 4,48 = -22,40 \text{ mt}, \\
 N_x &= 78,6 \cdot 0,785 + 12,68 \cdot 0,620 = 69,6^t, c = \frac{22,40}{69,6} = -0,322 \text{ m}, \\
 \sigma_i^a &= -\frac{1}{100 \cdot 188} \left(69600 \mp \frac{6 \cdot 2240000}{188} \right) = \begin{matrix} +0,1 \\ -7,5 \end{matrix} \text{ kg} \\
 \text{III a: } H &= -31,79^t, V = -78,6^t, M = 487,26 \text{ mt}, M_x = 487,26 - 31,79 \cdot 4,32 - 78,6 \cdot 4,48 = -2,20 \text{ mt}, \\
 N_x &= 78,6 \cdot 0,785 + 31,79 \cdot 0,620 = 81,4^t, c = \frac{-2,20}{81,4} = -0,027 \text{ m}, \\
 \sigma_i^a &= -\frac{1}{100 \cdot 188} \left(81400 \mp \frac{6 \cdot 220000}{188} \right) = \begin{matrix} -4,0 \\ -4,7 \end{matrix} \text{ kg} \\
 \text{III b: } H &= -9,68^t, V = -78,6^t, M = 388,65 \text{ mt}, M_x = 388,65 - 9,68 \cdot 4,32 - 78,6 \cdot 4,48 = -5,30 \text{ mt}, \\
 N_x &= 78,6 \cdot 0,785 + 9,68 \cdot 0,620 = 67,7^t, c = \frac{-5,30}{67,7} = -0,078 \text{ m}, \\
 \sigma_i^a &= -\frac{1}{100 \cdot 188} \left(67700 \mp \frac{6 \cdot 530000}{188} \right) = \begin{matrix} -2,7 \\ -4,5 \end{matrix} \text{ kg} \\
 \text{IV a: } H &= -32,30^t, V = -78,6^t, M = 512,78 \text{ mt}, M_x = 512,78 - 32,30 \cdot 5,08 - 78,6 \cdot 4,48 = -3,43 \text{ mt}, \\
 N_x &= 78,6 \cdot 0,785 + 32,30 \cdot 0,620 = 81,7^t, c = \frac{-3,43}{81,7} = -0,042 \text{ m}, \\
 \sigma_i^a &= -\frac{1}{100 \cdot 188} \left(81700 \mp \frac{6 \cdot 343000}{188} \right) = \begin{matrix} -3,8 \\ -4,9 \end{matrix} \text{ kg} \\
 \text{IV b: } H &= -8,26^t, V = -78,6^t, M = 399,19 \text{ mt}, M_x = 399,19 - 8,26 \cdot 5,08 - 78,6 \cdot 4,48 = +5,10 \text{ mt}, \\
 N_x &= 78,6 \cdot 0,785 + 8,26 \cdot 0,620 = 66,8^t, c = \frac{5,10}{66,8} = +0,076 \text{ m}, \\
 \sigma_i^a &= -\frac{1}{100 \cdot 188} \left(66800 \pm \frac{6 \cdot 510000}{188} \right) = \begin{matrix} -4,4 \\ -2,7 \end{matrix} \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Zur Berechnung der Spannungen im Scheitel ist das Moment M_0 der linksseitigen Belastung zu bestimmen, und man erhält von den vertikalen Kräften $-3,6 \cdot 4,6 - 2,0 \cdot 4,69 - 2,0 \cdot 4,69 - 2,3 \cdot 4,63 - 13,9 \cdot 4,18 - 14,6 \cdot 3,35 - 18,8 \cdot 2,25 - 21,4 \cdot 0,08 = -212,40 \text{ mt}$, und von den horizontalen Kräften (s. Abb. 88) $-22,0 \cdot 7,005 - 14,2 \cdot 5,73 - 13,0 \cdot 4,67 - 12,1 \cdot 3,595 - 16,2 \cdot 2,215 - 7,0 \cdot 0,96 - 5,0 \cdot 0,21 + 2,0 \cdot 0,26 = -382,82 \text{ mt}$ und zusammen $M_0 = -595,22 \text{ mt}$ bei ganzem Erddruck, bzw. $M_0 = -212,40 - 0,48 \cdot 382,82 = -398,83 \text{ mt}$ bei halbem Erddruck.

Hieraus ergibt sich für $x = 0, y = z$, wo $z = 2,00; 5,74; 3,43; 2,67 \text{ m}$ ist, am Scheitel für

$$\begin{aligned}
 \text{I a: } H &= -33,02^t, M = 534,13 \text{ mt}, M_x = 534,13 - 595,22 + 33,02 \cdot 2,00 = +4,95 \text{ mt}, N_x \text{ (s. oben)} = \\
 &= 58,48^t, c = \frac{+4,95}{58,48} = +0,085 \text{ m}, \sigma_u^0 = -\frac{1}{100 \cdot 80} \left(58480 \pm \frac{6 \cdot 495000}{80} \right) = \begin{matrix} -12,0 \\ -2,7 \end{matrix} \text{ kg} \\
 \text{I b: } H &= -3,35^t, M = 408,03 \text{ mt}, M_x = 408,03 - 398,83 + 3,35 \cdot 2,00 = +15,90 \text{ mt}, N_x = 41,21^t, \\
 c &= \frac{+15,90}{41,21} = +0,386 \text{ m}, \sigma_u^0 = -\frac{1}{100 \cdot 80} \left(41210 \pm \frac{6 \cdot 1590000}{80} \right) = \begin{matrix} -20,0 \\ +9,8 \end{matrix} \text{ kg} \\
 \text{II a: } H &= -34,15^t, M = 406,86 \text{ mt}, M_x = 406,86 - 595,22 + 34,14 \cdot 5,74 = +7,66 \text{ mt}, N_x = 57,35^t, \\
 c &= \frac{+7,66}{57,35} = +0,134 \text{ m}, \sigma_u^0 = -\frac{1}{100 \cdot 80} \left(57350 \pm \frac{6 \cdot 766000}{80} \right) = \begin{matrix} -14,4 \\ 0 \end{matrix} \text{ kg} \\
 \text{II b: } H &= -12,68^t, M = 355,22 \text{ mt}, M_x = 355,22 - 398,83 + 12,68 \cdot 5,74 = +29,12 \text{ mt}, N_x = 31,88^t, \\
 c &= \frac{+29,12}{31,88} = +0,914 \text{ m}, \sigma_u^0 = -\frac{1}{100 \cdot 80} \left(31880 \pm \frac{6 \cdot 2912000}{80} \right) = \begin{matrix} -31,3 \\ +23,3 \end{matrix} \text{ kg} \\
 \text{III a: } H &= -31,79^t, M = 487,26 \text{ mt}, M_x = 487,26 - 595,22 + 31,79 \cdot 3,43 = +1,08 \text{ mt}, N_x = 59,71^t, \\
 c &= \frac{1,08}{59,71} = +0,018 \text{ m}, \sigma_u^0 = -\frac{1}{100 \cdot 80} \left(59710 \pm \frac{6 \cdot 108000}{80} \right) = \begin{matrix} -8,5 \\ -6,5 \end{matrix} \text{ kg} \\
 \text{III b: } H &= -9,68^t, M = 388,65 \text{ mt}, M_x = 388,65 - 398,83 + 9,68 \cdot 3,43 = +23,02 \text{ mt}, N_x = 34,88^t, \\
 c &= \frac{23,02}{34,88} = +0,660 \text{ m}, \sigma_u^0 = -\frac{1}{100 \cdot 80} \left(34880 \pm \frac{6 \cdot 2302000}{80} \right) = \begin{matrix} -26,0 \\ +17,2 \end{matrix} \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\text{IVa: } H = -32,30 \text{ t}, M = +512,78 \text{ mt}, M_x = 512,78 - 595,22 + 32,30 \cdot 2,67 = +3,80 \text{ mt}, N_x = 59,20 \text{ t},$$

$$c = \frac{3,80}{59,20} = +0,064 \text{ m}, \sigma_u^0 = -\frac{1}{100 \cdot 80} \left(59200 \pm \frac{6 \cdot 380000}{80} \right) = -\frac{11,0}{3,8} \text{ kg}$$

$$\text{IVb: } H = -8,26 \text{ t}, M = 399,19 \text{ mt}, M_x = 399,19 - 398,83 + 8,26 \cdot 2,67 = 22,41 \text{ mt}, N_x = 36,30 \text{ t},$$

$$c = \frac{+22,41}{36,30} = +0,617 \text{ m}, \sigma_u^0 = -\frac{1}{100 \cdot 80} \left(36300 \pm \frac{6 \cdot 2241000}{80} \right) = -\frac{25,5}{+16,5} \text{ kg}$$

(hierbei sind alle Werte mit ihren Vorzeichen in obige Gleichungen einzusetzen).

Man erhält daher folgende Tabelle für die Maximalspannungen am

Art der Berechnung	Kämpfer				Scheitel				
	N_x t	c cm	σ_a kg/qcm	σ_i kg/qcm	N_x t	c cm	σ_0 kg/qcm	σ_u kg/qcm	
I. Eingespannter Rahmen $\varphi =$ bei A und B für	15°	82,2	- 9,6	- 3,0	- 5,7	58,5	+ 8,5	- 12,0	- 2,7
	33°40'	63,8	+ 57,4	- 9,6	+ 2,8	41,2	+ 38,6	- 20,0	+ 9,8
II. Ringförmiger Rahmen $\varphi =$ bei B durchschnitten für	15°	82,9	- 16,8	- 2,0	- 6,8	57,4	+ 13,4	- 14,4	0
	33°40'	69,6	- 32,2	+ 0,1	- 7,5	31,9	+ 91,4	- 31,3	+ 23,3
III. Desgleichen mit $\varphi =$ 0,84 m Fundamentstärke für	15°	81,4	- 2,7	- 4,0	- 4,7	59,7	+ 1,8	- 8,5	- 6,5
	33°40'	67,7	- 7,8	- 2,7	- 4,5	34,9	+ 66,0	- 26,0	+ 17,2
IV. Desgleichen mit $\varphi =$ 1,2 m Fundamentstärke für	15°	81,7	- 4,2	- 3,8	- 4,9	59,2	+ 6,4	- 11,0	- 3,8
	33°40'	66,8	+ 7,6	- 4,4	- 2,7	36,3	+ 61,7	- 25,5	+ 16,5

Es kommen also in Fall IV noch Spannungen von 25,5 kg Druck und 16,5 kg Zug vor, was mit Rücksicht auf eine Anfüllung der äußeren Hohlräume mit Steinen und Zement zugelassen werden kann.

Bei Anwendung von Beton statt Klinkern erhält man für das spezifische Gewicht 2,2 statt 1,8 angenähert die gleichen Maximalspannungen, da der Unterschied in den Lamellengewichten nicht viel ausmacht, und es kann sich hierbei noch um Eiseneinlagen oder das Einlegen von eisernen Rahmen handeln.

Die ersteren wurden schon in Amerika ausgeführt, und werden jetzt auch bei uns angewendet, indem ihre Ausführung bei genügend großem freien Raum vor der Ausbetonierung möglich ist. Die Berechnung erfolgt bei größeren Zugspannungen nach den Dimensionierungsformeln B 2 c (s. Ber. d. Eisenbetonkonstr. 1910 S. 48) für symmetrische Eiseneinlagen $f_e = f'_e$ aus: $x^2 - 2x(h + h') = -\frac{3}{2}(h^2 + h'^2) + \frac{3P}{b \cdot \sigma_b} \left\{ \left(\frac{h}{x} - 1 \right) g_2 + \left(1 - \frac{h'}{x} \right) (g_1 - h') \right\}$ mit $P = N_x$, $g_1 =$ Abstand für N_x vom Rand, $g_2 = h - g_1$, und $n \left(1 - \frac{h'}{x} \right) (h - h') f'_e = \frac{P}{\sigma_b} \cdot g_2 - \frac{b \cdot x}{6} (3h - x)$ sowie $\sigma_e = n \cdot \sigma_b \left(\frac{h}{x} - 1 \right)$ s. S. 24.

Bei kleinen Zugspannungen des Betons (bis ca. 10 kg) kann eine Reduktion des erhaltenen Querschnitts eintreten, wenn die Schubspannung $T_x = V_x \cdot \cos \varphi - H_x \cdot \sin \varphi$ bei der Dimensionierung berücksichtigt wird, indem die zulässige Gesamtspannung $\left(\frac{\sigma_a}{800} + \frac{\sigma_e}{1000} \right) = 1$ mit der berechneten Schubspannung für das Eisen $= \frac{T_x}{2f_e}$ und mit der Normalspannung σ_e aus obigen Formeln, mit $\frac{f_e}{f_m}$ zu multiplizieren ist, um den reduzierten Querschnitt $f_m = \left(\frac{\sigma_a}{800} + \frac{\sigma_e}{1000} \right) f_e$ zu erhalten (s. B. d. E. S. 79). Eine angenäherte Berechnung ergibt sich bei kleinen Zugspannungen auch aus dem Zugdreieck des Betons (für die berechnete Zugspannung) durch Division mit $\sigma_e = 1000 \text{ kg}$ um f_e zu erhalten.

Es kann aber auch ein runder eiserner Rahmen mit nebengezeichnetem Querschnitt im Abstand von 1,5 m eingelegt werden, für welchen eine Berechnung mit oder ohne Berücksichtigung des gleichzeitig wirkenden Betons möglich ist, und zwar durch die Formeln III (7) und (8) oder in folgender Weise: Der Querschnitt ist = 161,2 qcm und mit Nietabzug = 134,3 qcm, der Schwerpunkt des Winkels mit Nietabzug liegt bei 11,6 cm Abstand, das Trägheitsmoment des Winkels mit Nietabzug ist = 667,8 und das Gesamtträgheitsmoment mit Nietabzug $J = 4 (667,8 + 27,6^2 \cdot 33,58) = 104990$ und das Widerstandsmoment $W = \frac{104990}{31} = 3387$. Die Maximalspannungen ergeben sich aus $\sigma = \frac{N_x}{F} \pm \frac{M_x}{W}$, somit für Eingespanntsein (s. Ia und b auf S. 69 u. 70).

$$\text{am Kämpfer: } \sigma_i^a = -\left(\frac{82200}{134,3} \mp \frac{786000}{3387} \right) \cdot 1,5 = \begin{matrix} -570 \text{ kg} \\ -1266 \text{ kg} \end{matrix} \text{ bei ganzem Erddruck,}$$

$$\sigma_i^a = -\left(\frac{63800}{134,3} \pm \frac{3664000}{3387} \right) \cdot 1,5 = \begin{matrix} -2335 \text{ kg} \\ +910 \text{ kg} \end{matrix} \text{ bei halbem Erddruck, und}$$

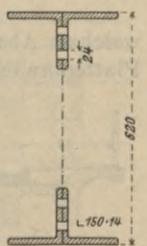


Abb. 91.

am Scheitel: $\sigma_u^0 = - \left(\frac{58\,500}{134,3} \pm \frac{495\,000}{3387} \right) \cdot 1,5 = - \frac{873\text{ kg}}{435\text{ kg}}$ bei ganzem Erddruck, und
 $\sigma_u^0 = - \left(\frac{41\,200}{134,3} \pm \frac{1\,590\,000}{3387} \right) \cdot 1,5 = - \frac{1164\text{ kg}}{+243\text{ kg}}$ bei halbem Erddruck.

Die Spannungen über 1000 kg sind daher von dem Beton aufzunehmen, so daß dieser bei $\sigma_a = - 2335\text{ kg}$ noch $\frac{1335}{2335}$ seiner oben berechneten Spannungen $- 20\text{ kg}$ oder $- 12\text{ kg}$ erhält. Die Temperaturspannungen können bei der Tunnel-

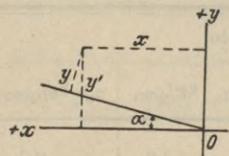


Abb. 92.

berechnung sowie bei Rahmen bis zu 25 m Länge unberücksichtigt bleiben, und ergeben sich dieselben (s. Ber. d. Eisenbetonkonstr. S. 46) aus $H_t = \frac{E \cdot \alpha \cdot \tau \cdot l}{\sum w y^2 + \sum \frac{s}{F}}$, $M_x = H_t \cdot y$, $N_x = H_t \cdot \cos \varphi$, $T_x = H_t \cdot \sin \varphi$, so daß

hieraus die Spannungen in derselben Weise wie oben zu berechnen sind. Bei unsymmetrischen Tunnel- oder Rahmenprofilen gilt dasselbe Verfahren wie beim eingespannten Gewölbe nach Mörsch (s. Betonkalender), und zwar für eine vertikal angenommene y achse und eine Drehung der x achse, für welche die Bedingungen $\int w \cdot x = 0$, $\int w \cdot y = 0$, $\int w \cdot x \cdot y = 0$ zu erfüllen

sind. Der Winkel α der x achse mit der Horizontalen ergibt sich alsdann aus $\text{tg } \alpha = \frac{\sum x \cdot w \cdot y}{\sum w \cdot x^2}$ und hieraus erhält man $y = y_1 \cdot \cos \alpha - x \cdot \sin \alpha$ und die Trägheitsmomente und Summenausdrücke sind mit x und y zu berechnen (s. B. d. E. S. 65 — 66).

Bei Anwendung eines Doppeltunnels ergibt sich dieselbe angenäherte Berechnung wie beim eingespannten Rahmen

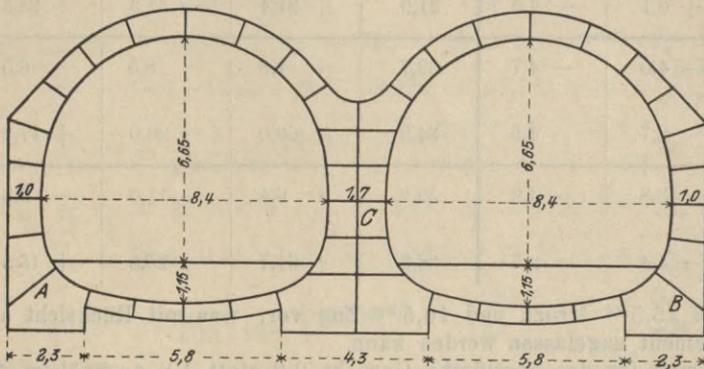


Abb. 93.

mit einer Mittelstütze, indem die Horizontalkräfte rechts und links gleich groß sind, und daher keinen Horizontal-schub in der Mittelsäule veranlassen, so daß diese nur eine vertikale Belastung zu tragen hat. Bei Berechnung des Koordinatenursprungs kann auch die letztere mit berücksichtigt werden, indem das doppelte Profil ähnlich wie zwei einfache Profile wirkt, und bei Zerlegung des ersteren in zwei Teile angenähert die gleichen Werte wie bei den letzteren entstehen. Die ringförmige Berechnung kann hierbei von A und von B aus stattfinden, bis die Einflußordinaten für sämtliche Kräfte ermittelt sind, und im Schnitt C kann der Auflagerdruck der oberen Belastung angenommen werden. Bei einer möglichen Verschiebung des Tunnels durch bewegliche Gebirgsschichten ist auch mit einseitig wirkender Belastung zu rechnen, indem derselbe dann

den Schub einer solchen Schicht aufzunehmen hat (auch beim Doppeltunnel kann derselbe in Betracht kommen, wenn er nicht durch Abstützen des vorgetriebenen Tunnels aufgehoben wird).

VII. Berechnung einer kontinuierlichen Brücke nach der Elastizitätslehre.

1. Allgemeine Angaben über die Konstruktion der Brücke.

Die nebengezeichnete Brücke hat drei Oeffnungen mit einer normalen Gesamtlichtweite = 31,7 m, woraus sich für einen Neigungswinkel der Straßen- und Bahnachse von 63° eine schiefe Lichtweite = 35,58 m ergibt. Dieselbe zerfällt in drei Teile von 12,91; 11,22 und 11,45 m, so daß bei 0,8 m schiefer Auflagerbreite die drei Stützweiten 13,3; 11,2 und 11,9 m erhalten werden.



Abb. 94.

Die Breite der Straßenbrücke ist für die Fahrbahn = 6,5 m und für die Gehwege = 2 · 1,8 m, somit zusammen = 10,1 m, und mit Rücksicht auf die beschränkte Konstruktionshöhe sind hierfür acht Hauptträger mit je 1,2 m Abstand und 20 cm Plattenstärke gewählt worden.

Die Ausnützung der Platte kann nur bei größerem Balkenabstand (ca. 1,6 m) stattfinden, aber die Belastung der Hauptträger wird alsdann größer, und es kann sich daher nur um eine Untersuchung handeln, bis zu welchem Abstand der Balken noch ausgeführt werden kann, und zwar unter Berücksichtigung der mitwirkenden größeren Plattenbreite, welche auf die Betonbeanspruchung günstig wirkt, aber den Eisenquerschnitt unverändert läßt.

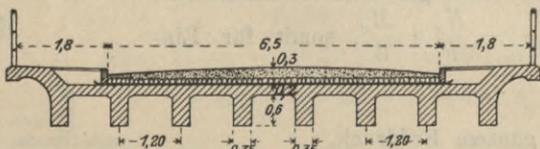


Abb. 95.

nehmen, und das seitliche Gefäll der Betonplatte kann bei 1,5 ‰ Längsgefäll der Brücke wegfallen (dasselbe ist bei

Infolge der geringen Konstruktionshöhe ist für die Balken (bei 1,2 m Abstand derselben) eine konstante Höhe von 80 cm angenommen worden, und zwar mit einem Gefäll von 1,5 ‰ nach beiden Seiten und mit einer Abrundung in der Mitte auf 4 m Länge mit $R = 150\text{ m}$, durch welche die Höhe von $\frac{200}{100} \cdot 1,5 = 3\text{ cm}$ halbiert

wird. Die Chaussierung ist in der Mitte der Fahrbahn einschl. 1 cm Glatstrich und daraufliegenden Asphaltfilzplatten = 30 cm anzunehmen, und das seitliche Gefäll der Betonplatte kann bei 1,5 ‰ Längsgefäll der Brücke wegfallen (dasselbe ist bei

1 0/10 Gefäll der Brücke mit 2 0/10 Neigung gegen die Mitte auszuführen und die oberen Eiseneinlagen erhalten dann die gleiche Neigung). Als Belastung der Brücke ist eine Dampfwalze von 16 t Gewicht sowie 500 kg/qm für Menschen-
gedränge angenommen worden.

2. Kontinuierliche Berechnung der Platte durch Koeffizienten.

Die Platte ist mit 1,2 m Stützweite zu berechnen und bei der Annahme von 20 cm Plattenstärke erhält man vom Eigengewicht $g = 0,3 \cdot 2,25 + 0,2 \cdot 2,4 = 1,16 \text{ t/qm}$.

Bei einer über mehrere Träger durchlaufenden Platte ergibt die kontinuierliche Berechnung

	bei drei Oeffnungen	bei vier Oeffnungen	Annahme der Berechnung	
in der Mitte:	$M_{qm1} = \frac{g \cdot l^2}{12,5} + \frac{p l^2}{10}$	$M_{qm1} = \frac{q l^2}{13} \left(\frac{g l^2}{12,8} \right) + \frac{p l^2}{10,1}$	$M_{qm1} = \frac{q l^2}{12}$	(Die eingeklammerten Zahlen gelten für ∞ viele Oeffnungen.)
	$M_{qm2} = \frac{g l^2}{40} + \frac{p l^2}{13,3}$	$M_{qm2} = \frac{g l^2}{25} \left(\frac{g l^2}{24} \right) + \frac{p l^2}{12,5}$	$M_{qm2} = \frac{q l^2}{12}$	
am Auflager:	$M_{qa1} = \frac{g l^2}{10} + \frac{p l^2}{8,6}$	$M_{qa2} = \frac{g l^2}{9,4} \left(\frac{g l^2}{9,5} \right) + \frac{p l^2}{8,3}$	$M_{qa2} = \frac{q l^2}{9}$	
		$M_{qa3} = \frac{g l^2}{14} \left(\frac{g l^2}{13} \right) + \frac{p l^2}{9,4}$	$M_{qa3} = \frac{q l^2}{9}$	

Da sich bei Straßenbrücken mit Dampfwalze $g : p$ ungefähr $= 1 : 7$ verhalten, so kann man in allen Oeffnungen in der Mitte mit $M_{qm} = \frac{q l^2}{12}$ und am Auflager mit $M_{qa} = \frac{q l^2}{9}$ rechnen, und es wird dadurch auch die teilweise Einspannung berücksichtigt, welche durch die Querverbindungen in der Mitte und an den Enden der Oeffnungen vorhanden ist (aus diesem Grunde können auch die Auflagerdrücke diskontinuierlich berechnet werden).

Man erhält daher vom Eigengewicht $M_{gm} = \frac{1,16 \cdot 1,2^2}{12} = 0,140 \text{ mt}$, $M_{ga} = \frac{1,16 \cdot 1,2^2}{9} = 0,186 \text{ mt}$. Für die Walze von 5 t erhält man bei Verteilung mit der Neigung 1:1 und bis zur Mitte der Platte (da die benachbarten Teile der Platte auch mittragen) eine Belastungsbreite $= 124 \text{ cm}$ (wofür gleichförmige Belastung anzunehmen ist) und eine Belastungslänge $= 90 \text{ cm}$, so daß pro Meter Länge $M_{pm} = \frac{5 \cdot 1,2}{12 \cdot 0,9} = 0,556 \text{ mt}$ und $M_{pa} = \frac{5 \cdot 1,2}{9 \cdot 0,9} = 0,741 \text{ mt}$ wird. Die Maximalbiegemomente sind daher in der Mitte $M_{gm} = 0,140 + 0,556 = 0,696 \text{ mt}$ und am Auflager $M_{ga} = 0,186 + 0,741 = 0,927 \text{ mt}$. Die Formeln zur Dimensionierung der Platte sind in der Berechnung der Eisen-

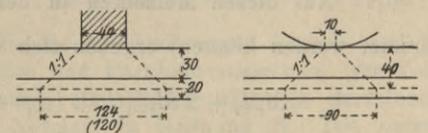


Abb. 96.

betonkonstruktionen 1906 und 1910 entwickelt worden und lauten nach A 1 b: $x = \sqrt{\frac{6 M}{7 b \cdot \sigma_b}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 69600}{7 \cdot 100 \cdot 40}} = 3,86 (4,46) \text{ cm}$,
 $h = \frac{8}{3} x = 10,3 (11,9) \text{ cm}$, $f_e = \frac{b \cdot x}{50} = 7,72 (8,92) \text{ qcm}$, und für $h = 18 (23) \text{ cm}$ ist $f_e = \frac{10,3}{18} \cdot 7,72 = 4,41 \text{ qcm}$ bzw.
 $= \frac{11,9}{23} \cdot 8,92 = 4,61 \text{ qcm}$, so daß 10 \odot 10 $= 7,85 \text{ qcm}$ reichlich genügen (für $b = 100 \text{ cm}$ und $\sigma_b = 40 \text{ kg}$ kann auch nach den Formeln $x = 0,0146 \sqrt{M}$, $h = 0,039 \sqrt{M}$ und $f_e = 0,293 \sqrt{M}$ gerechnet werden, und der Eisenquerschnitt für $h = 18$ und 23 cm ergibt sich auch genau aus $f_e = \frac{69600}{7 \cdot 18 \cdot 1000} = 4,41 \text{ qcm}$ und $f_e = \frac{92700}{7 \cdot 23 \cdot 1000} = 4,60 \text{ qcm}$,
 so daß die angenäherte Berechnung für h genügt). Bei schiefer Armierung ist der Abstand 10 cm in der Richtung der Hauptachse anzunehmen.

3. Berechnung der durchlaufenden Plattenbalken aus ihren Momentenflächen.

Die Berechnung der positiven und negativen Maximalbiegemomente ergibt sich am einfachsten aus den Belastungsgleichwerten für die Belastung der einzelnen Oeffnungen.

Man erhält daher vom Eigengewicht der Platte und Chaussierung $1,16 \cdot 1,2 = 1,392 \text{ t}$ und von dem Balken $0,6 \cdot 0,35 \cdot 2,4 = 0,504 \text{ t}$, somit zusammen rund $1,9 \text{ t/m}$, und die zugehörigen Momente sind $M_{g1} = \frac{1,9 \cdot 13,3^2}{8} = 42,01 \text{ mt}$,

$$M_{g2} = \frac{1,9 \cdot 11,2^2}{8} = 29,79 \text{ mt} \text{ und } M_{g3} = \frac{1,9 \cdot 11,9^2}{8} = 33,63 \text{ mt}.$$

Bei Annahme des Fahrens der Dampfwalze in der Straßenrichtung (wobei das Gewicht der Walzen auf ihre Breite und nach dem Hebelgesetz auf die Balken übertragen wird), erhält man zwei Einzellasten $\frac{2 \cdot 5 \cdot 0,42}{1,2} = \text{rund } 3,5 \text{ t}$ und $\frac{2 \cdot 3 \cdot 0,825}{1,2} = \text{rund } 4,2 \text{ t}$ mit dem Abstand $3,5 \text{ m}$ sowie eine gleichförmige Belastung

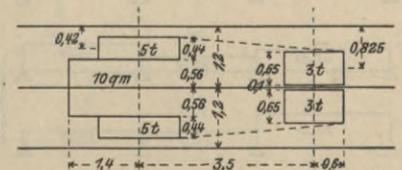


Abb. 97.

von $1,2 \cdot 500 = 600 \text{ kg/m}$ vor und hinter der Dampfwalze (die $\frac{2 \cdot 0,2^2}{1,2 \cdot 2} \cdot 500 = 17 \text{ kg/m}$ neben der Dampfwalze können hierbei vernachlässigt werden). Angenähert kann auch bei einer Fläche der Dampfwalze von 10 qm mit $\frac{1,6 \cdot 0,5}{1,6}$

· 3,5 = 2,4 t und $\frac{1,1}{1,6} \cdot 4,2 = 2,9$ t als Einzellasten und einer gleichförmigen Vollbelastung von 600 kg/m gerechnet werden, und soll dies bei der genauen Berechnung durch Einflußlinien geschehen.

Bei Halbierung des Abstands der Resultante 7,7 t von der größeren Einzellast durch die Mitte der Brücke erhält man eine angenäherte Berechnung des Maximalbiegemoments, und ihr Abstand ist $= \frac{3,5 \cdot 3,5}{7,7} = 1,60$ m, so daß sich die nebengezeichnete Belastung für 13,3 (11,2; 11,9) m Stützweite ergibt.

Aus dem Auflagerdruck: $A = \frac{1,9 \cdot 13,3}{2} + \left\{ 0,6 \left(\frac{2,55^2}{2} + 5,25 \left[13,3 - \frac{5,25}{2} \right] \right) + 7,7 \cdot 5,85 \right\} : 13,3 = 18,70$ t

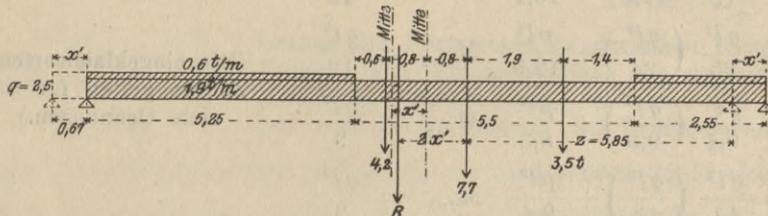


Abb. 98.

kann auch das genaue Maximalbiegemoment (s. Ber. d. Eisenbetonkonstr. 1910, S. 95) aus der Gesamtbelastung $R = 1,9 \cdot 13,3 + 0,6 \cdot 7,8 + 7,7 = 37,65$ t und der Verschiebung der Belastung $2x' = \frac{l(A + q \cdot x')}{R} - z =$

$= \frac{13,3(18,70 + 2,5 \cdot x')}{37,65} - 5,85$ oder $x' = 0,67$ m

und $M_{q1} = \frac{(z + x')^2 \cdot R (= 37,65)}{l (= 13,3)} - \frac{1,9 \cdot 6,52^2}{2}$

$= 0,6 \cdot 5,92 \left(6,52 - \frac{5,92}{2} \right) = 67,31$ mt. Ebenso erhält man für 11,2 m: $M_{q2} = 49,08$ mt und für 11,9 m: $M_{q3} = 54,97$ mt.

Für die Belastung der anderen Oeffnungen mit $(1,9 + 0,6)$ t/m ergibt sich $M_{q1} = \frac{2,5 \cdot 13,3^2}{8} = 55,28$ mt, $M_{q2} = \frac{2,5 \cdot 11,2^2}{8} = 39,20$ mt, $M_{q3} = \frac{2,5 \cdot 11,9^2}{8} = 44,25$ mt.

Aus diesen Momenten in den einzelnen Oeffnungen (welche auch durch ihre Belastungsgleichwerte $q = \frac{8M_q}{l^2}$ ersetzt werden können) ergeben sich nun die negativen Stützenmomente mit Hilfe der Clapeyronschen Gleichung:

$$M_r l_r + 2 M_{r+1} (l_r + l_{r+1}) + M_{r+2} \cdot l_{r+1} = - \frac{q_r l_r^3}{4} - \frac{q_{r+1} l_{r+1}^3}{4} = - 2 \mathfrak{M}_{q_r} \cdot l_r - 2 \mathfrak{M}_{q_{r+1}} \cdot l_{r+1},$$

welche für je zwei aufeinanderfolgende Oeffnungen gilt, oder

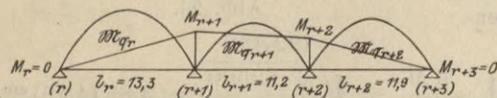


Abb. 99.

$$\begin{aligned} 2 M_2 \cdot 24,5 + M_3 \cdot 11,2 &= - 2 \mathfrak{M}_1 \cdot 13,3 - 2 \mathfrak{M}_2 \cdot 11,2 = - 2 m \\ M_2 \cdot 11,2 + 2 M_3 \cdot 23,1 &= - 2 \mathfrak{M}_2 \cdot 11,2 - 2 \mathfrak{M}_3 \cdot 11,9 = - 2 n \end{aligned}$$

und bei Division mit 2: $M_2 = \frac{- 23,1 m + 5,6 n}{23,1 \cdot 24,5 - 5,6^2}$, $M_3 = \frac{- 24,5 n + 5,6 m}{534,6}$

Bei Annahme eines nachgiebigen Seils erhält man die nebengezeichneten acht Belastungsfälle, und zwar sind für die negativen Max. } Stützenmomente je zwei benachbarte Oeffnungen zu belasten oder nicht zu belasten und mit ihnen Min. }

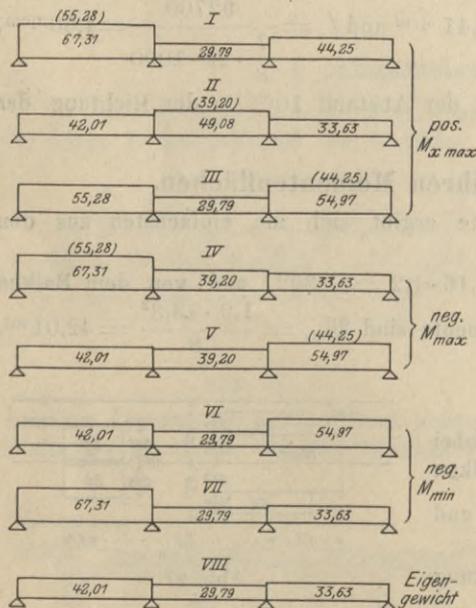


Abb. 100.

die vierte, sechste usw. und für die positiven Max. } Momente in der Mitte Min. } je eine Oeffnung zu belasten oder nicht zu belasten, und mit ihr die dritte, fünfte usw.

Durch Einsetzung der neben eingeschriebenen Werte für \mathfrak{M}_1 , \mathfrak{M}_2 und \mathfrak{M}_3 in m und n sowie der letzteren in M_2 und M_3 ergibt sich für Fall:

I: $m = 13,3 \cdot 67,31 + 11,2 \cdot 29,79 = 1228,9$, ebenso $n = 860,2$,

$M_2 = \frac{- 23,1 \cdot 1228,9 + 5,6 \cdot 860,2}{534,6} = - 44,09$ mt und $M_3 = - 26,55$ mt,

II: $m = 1108,4$, $n = 949,9$, $M_2 = - 37,94$, $M_3 = - 31,92$,

III: $m = 1068,9$, $n = 987,8$, $M_2 = - 35,84$, $M_3 = - 34,07$,

IV: $m = 1334,3$, $n = 839,2$, $M_2 = - 48,86$, $M_3 = - 24,49$,

V: $m = 997,8$, $n = 1093,2$, $M_2 = - 31,66$, $M_3 = - 39,65$,

VI: $m = 892,4$, $n = 987,8$, $M_2 = - 28,21$, $M_3 = - 35,92$,

VII: $m = 1228,9$, $n = 733,9$, $M_2 = - 45,41$, $M_3 = - 20,76$,

VIII: $m = 892,4$, $n = 733,9$, $M_2 = - 30,87$, $M_3 = - 24,28$ mt.

(Die eingeklammerten Zahlen beziehen sich auf die Berechnung mit Einflußlinien für $q = 2,5$ t/m und die Einzellasten 2,4 t und 2,9 t.)

Nach den Formeln der Professoren Dr. Weyrauch (s. Berechnung der kontinuierlichen Träger) und Dr. Mohr (s. Techn. Mechanik des Ing.-Vereins Stuttgart) können die Maximalbiegungsmomente in den einzelnen Oeffnungen für die Belastungsfälle I—III aus ihrem Abstand vom linken Auflager $x_0 = \frac{-M_r + M_{r+1}}{q_r l_r} + \frac{l_r}{2} = \left(\frac{-M_r + M_{r+1}}{4 \mathfrak{M}_{q_r}} + 1 \right) \cdot \frac{l_r}{2} = \frac{a \cdot l_r}{2}$ und dem zugehörigen Moment $M_{x_0 \max} = M_r + \frac{q_r \cdot x_0^2}{2} = M_r + a^2 \mathfrak{M}_{q_r}$ berechnet werden (hierbei sind M_r und M_{r+1} mit ihrem Vorzeichen einzusetzen und q_r sowie \mathfrak{M}_{q_r} entspricht der Belastung für die Oeffnung r).

Man erhält daher für Fall I in Oeffnung 1: $x_0 = \left(\frac{M_2}{4 \mathfrak{M}_{q_1}} + 1 \right) \frac{l_1}{2} = \left(\frac{-44,09}{4 \cdot 67,31} + 1 \right) \cdot \frac{13,3}{2} = 5,56 \text{ m}$,
 $M_{x_0 \max} = a^2 \mathfrak{M}_{q_1} = 0,8362^2 \cdot 67,31 = +47,07 \text{ mt}$, und für Fall II in Oeffnung 2: $x_0 = \left(\frac{-M_2 + M_3}{4 \mathfrak{M}_{q_2}} + 1 \right) \cdot \frac{l_2}{2} = \left(\frac{37,94 - 31,92}{4 \cdot 49,08} + 1 \right) \cdot \frac{11,2}{2} = 5,77 \text{ m}$, $M_{x_0 \max} = M_2 + a^2 \mathfrak{M}_{q_2} = -37,94 + 1,0307^2 \cdot 49,08 = +14,20 \text{ mt}$,

und für Fall III in Oeffnung 3: $x_0 = \left(\frac{-M_3}{4 \mathfrak{M}_{q_3}} + 1 \right) \frac{l_3}{2} = \left(\frac{34,07}{4 \cdot 54,97} + 1 \right) \frac{11,9}{2} = 6,87 \text{ m}$, $M_{x_0 \max} = M_3 + a^2 \mathfrak{M}_{q_3} = -34,07 + 1,1549^2 \cdot 54,97 = +39,25 \text{ mt}$.

Ebenso erhält man die Minimalbiegungsmomente für Fall II in Oeffnung 1 aus:

$x_0 = \left(\frac{-37,94}{4 \cdot 42,01} + 1 \right) \cdot \frac{13,3}{2} = 5,15 \text{ m}$, $M_{x_0 \min} = 0,7742^2 \cdot 42,01 = +25,18 \text{ mt}$, und für Fall I in Oeffnung 2 links:

$x_0 = \left(\frac{44,09 - 26,55}{4 \cdot 29,79} + 1 \right) \cdot \frac{11,2}{2} = 6,42 \text{ m}$, $M_{x_0 \min} = -44,09 + 1,1472^2 \cdot 29,79 = -4,88 \text{ mt}$, und für Fall III in

Oeffnung 2 rechts: $x_0 = \left(\frac{35,84 - 34,07}{4 \cdot 29,79} + 1 \right) \cdot \frac{11,2}{2} = 5,68 \text{ m}$, $M_{x_0 \min} = -35,84 + 1,0149^2 \cdot 29,79 = -5,16 \text{ mt}$,

und für Fall II in Oeffnung 3: $x_0 = \left(\frac{31,92}{4 \cdot 33,63} + 1 \right) \cdot \frac{11,9}{2} = 7,36 \text{ m}$, $M_{x_0 \min} = -31,92 + 1,2373^2 \cdot 33,63 = +19,56 \text{ mt}$.

Mit diesen Werten der Stützen-, Maximal- und Minimalbiegungsmomente für die drei Oeffnungen können nun die Momentenlinien aufgezeichnet werden, und hierbei gehören die ausgezogenen Geraden und Parabeln zusammen (für Vollbelastung der betreffenden Oeffnung), ebenso die gestrichelten Geraden und Parabeln (für Eigengewicht in derselben), und die strichpunktierten Geraden und Parabeln (für Eigengewicht mit 0,6 t/m Nutzlast in Oeffnung 2). Die untere Darstellung der Momentenflächen ist eine Projektion der oberen positiven und negativen Momentenflächen, wobei die Maximal- und Minimalbiegungsmomente (mit ihren Abständen vom linken Auflager) auch nach obiger Berechnung derselben eingetragen werden können, und sich hierdurch eine Kontrolle der Zeichnung ergibt.

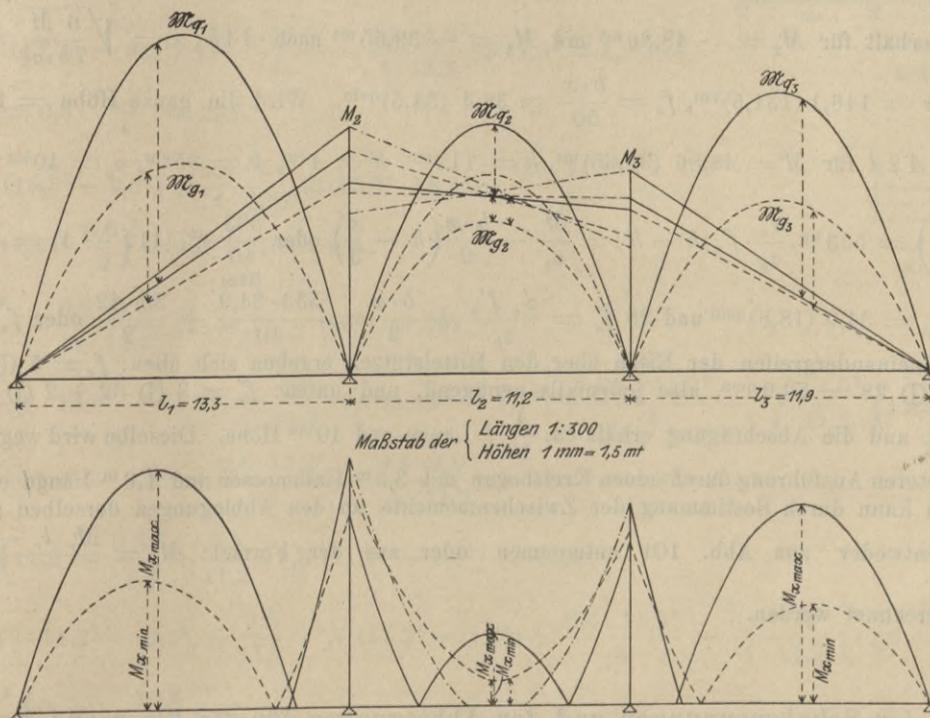


Abb. 101.

Aus den Maximalbiegungsmomenten in den drei Oeffnungen ergeben sich die Querschnitte in ihrer Mitte nach A 3 b (s. Ber. d. Eisenbetonkonstr. 1906 und 1910): $16 x = \frac{6 M}{b d \sigma_b} + d \left(11 - \frac{2 d}{x} \right) = \frac{6 \cdot 4707000}{120 \cdot 20 \cdot 40} + 20 \cdot 10,$

$x = 30,9 \text{ cm}$, $h = \frac{8}{3} x = 82 \text{ cm}$, $25 f_e = b d \left(1 - \frac{d}{2x}\right) = 120 \cdot 20 \left(1 - \frac{20}{2 \cdot 30,9}\right)$, $f_e = 65,0 \text{ qcm}$. Bei genauer Berechnung (mit Berücksichtigung des Drucks im Steg) wird h etwas kleiner und f_e etwas größer, so daß als Gesamthöhe 80 cm angenommen werden kann, wenn oben Eiseneinlagen vorhanden sind.

Hierfür erhält man nach $A 4 c$ mit $M = 47,07 \text{ mt}$, $h = 72 \text{ cm}$, $h' = 4 \text{ cm}$, $b = 120 \text{ cm}$, $d = 20 \text{ cm}$, $c = 35 \text{ cm}$, $\sigma_b = 40 \text{ kg}$: $x = \frac{3}{8} h = 27 \text{ cm}$, $\sigma'_e = n \sigma_b \left(1 - \frac{h'}{x}\right) = 511 \text{ kg}$, $\frac{\sigma'_e}{\sigma_b} \cdot f'_e (h - h') = \frac{M}{\sigma_b} - \frac{b x d}{3} - \frac{c}{6} (3h - 2d - x) \cdot \left\{x + d \left(\frac{b}{c} - 1\right) \cdot \left(2 - \frac{d}{x}\right)\right\}$ und bei Einsetzung der Zahlenwerte $868,7 \cdot f'_e = 117675 - 21600 - \frac{35 \cdot 149}{6} (27 + 61,164)$ oder $f'_e = 22,5 \text{ qcm}$, und $25 f_e = \frac{\sigma'_e}{\sigma_b} \cdot f'_e + d(b - c) \left(1 - \frac{d}{2x}\right) + \frac{c x}{2} = 287,0 + 1070,0 + 472,5$ oder $f_e = 73,2 \text{ qcm}$. Es können daher unten $10 \text{ } \textcircled{D} 32$ und oben $4 \text{ } \textcircled{D} 28$ gewählt werden mit $f_e = 80,4 \text{ qcm}$ und $f'_e = 24,6 \text{ qcm}$, und hierfür erhält man nach $A 4 a$: $x^2 + 2x \left\{\frac{n}{c} (f_e + f'_e) + d \left(\frac{b}{c} - 1\right)\right\} = \frac{2n(h f_e + h' f'_e)}{c} + d^2 \left(\frac{b}{c} - 1\right)$ oder $x^2 + 2x \cdot 93,6 = 6017,6$ oder $x = -93,6 + \sqrt{93,6^2 + 6017,6} = 28,0 \text{ cm}$. Ferner ist (mit Rechenstab):

$$\sigma_b = \frac{1412,1000}{6,72 + 28,1 + 1,77} = 38,5 \text{ kg},$$

$$\sigma_e = n \sigma_b \left(\frac{h}{x} - 1\right) = 15 \cdot 38,5 \left(\frac{72}{28} - 1\right) = 908 \text{ kg}.$$

Für die dritte Oeffnung erhält man in derselben Weise mit $M = 39,25 \text{ mt}$ nach $A 3 b$: $x = 24,5 \text{ cm}$, $h = 65,4 \text{ cm}$, $f_e = 57,5 \text{ qcm}$, so daß unten $10 \text{ } \textcircled{D} 28 = 61,6 \text{ qcm}$ und oben $4 \text{ } \textcircled{D} 28 = 24,6 \text{ qcm}$ genügen, und man nach $A 4 a$ erhält: $x = 24,8 \text{ cm}$, $\sigma_b = 34,3 \text{ kg}$, $\sigma_e = 979 \text{ kg}$.

In der mittleren Oeffnung ist $M = 14,20 \text{ mt}$, so daß unten $8 \text{ } \textcircled{D} 28$ und oben $3 \text{ } \textcircled{D} 28$ genügen, und dadurch auch die negativen Momente aufgenommen werden können, indem man für das negative Moment bei $\frac{1}{4} l$ (wo gewöhnlich die Abbiegungen aufhören) $M_x = -18 \text{ mt}$ mit $f'_e = 7 \text{ } \textcircled{D} 28 = 43,1 \text{ qcm}$, $h = 76 \text{ cm}$, $h' = 8 \text{ cm}$, $b = 35 \text{ cm}$, $\sigma_b = 40 \text{ kg}$

nach $A 2 b$ erhält: $7 x^2 + \frac{16 n f'_e}{b} \cdot x = \frac{6 M}{b \cdot \sigma_b} + 2 n \frac{h' f'_e}{b} \left(11 - \frac{3 h'}{x}\right)$ oder $7 x^2 + \frac{16 \cdot 15 \cdot 43,1}{35} \cdot x = \frac{6 \cdot 1800000}{35 \cdot 40} +$
 $+ 2 \cdot 15 \cdot \frac{8 \cdot 43,1}{35} \cdot 10$ oder $x^2 + 42,2 x = 1144,3$, $x = -21,1 + \sqrt{21,1^2 + 1144,3} = 18,8 \text{ cm}$, $h = \frac{8}{3} x = 50,1 \text{ cm}$,

$$f_e = \frac{(x - h') f'_e + \frac{b x^2}{2n}}{h - x} = \frac{(18,8 - 8) \cdot 43,1 + \frac{35 \cdot 18,8^2}{2 \cdot 15}}{50,1 - 18,8} = 28,0 \text{ qcm}$$
 und für $h = 76 \text{ cm}$: $f_e = \frac{50,1}{76} \cdot 28 = 18,5 \text{ qcm}$.

Für die negativen Maximalmomente an den Mittelstützen kommt gleichfalls nur der rechteckige Querschnitt in

Betracht, und man erhält für $M_2 = -48,86 \text{ mt}$ und $M_3 = -39,65 \text{ mt}$ nach $A 1 b$: $x = \sqrt{\frac{6 M}{7 b \cdot \sigma_b}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 4886000}{7 \cdot 35 \cdot 40}} =$
 $= \frac{(49,3)}{3} \text{ cm}$, $h = \frac{8}{3} x = 146,1 (131,5) \text{ cm}$, $f_e = \frac{b \cdot x}{50} = 38,4 (34,5) \text{ qcm}$. Wird die ganze Höhe = 120 cm angenommen,

so erhält man nach $A 2 d$ für $M = 48,86 (39,65) \text{ mt}$, $h = 112 \text{ cm}$, $h' = 4 \text{ cm}$, $b = 35 \text{ cm}$, $\sigma_b = 40 \text{ kg}$: $x = \frac{3}{8} h = 42 \text{ cm}$,

$$\sigma'_e = n \sigma_b \left(1 - \frac{h'}{x}\right) = 533 \text{ kg}, \frac{\sigma'_e}{\sigma_b} \cdot f'_e (h - h') = \frac{M}{\sigma_b} - \frac{b \cdot x}{2} \left(h - \frac{x}{3}\right) \text{ oder } \frac{533}{40} f'_e (112 - 4) = \frac{4886000}{40} - \frac{35 \cdot 42}{2} \cdot (112 - 4)$$

$$\text{oder } f'_e = 34,9 (18,8) \text{ qcm}$$
 und $25 f_e = \frac{\sigma'_e f'_e}{\sigma_b} + \frac{b \cdot x}{2} = \frac{533 \cdot 34,9}{40} + \frac{35 \cdot 42}{2}$ oder $f_e = 48,0 (39,4) \text{ qcm}$.

Durch das Ineinandergreifen der Eisen über den Mittelstützen ergeben sich oben: $f_e = 5 \text{ } \textcircled{D} 32 + 7 \text{ } \textcircled{D} 28 = 83,3 \text{ qcm}$ bzw. $12 \text{ } \textcircled{D} 28 = 73,9 \text{ qcm}$, also jedenfalls genügend, und unten: $f_e = 3 \text{ } \textcircled{D} 32 + 2 \text{ } \textcircled{D} 28 = 36,5 \text{ qcm}$ bzw. $5 \text{ } \textcircled{D} 28 = 30,8 \text{ qcm}$, und die Abschrägung erhält ca. $\frac{1}{10} l$ Länge und 40 cm Höhe. Dieselbe wird wegen des besseren Aussehens und der leichteren Ausführung durch einen Kreisbogen mit $3,3 \text{ m}$ Halbmesser und $1,6 \text{ m}$ Länge ersetzt. Die richtige Verteilung der Eisen kann durch Bestimmung der Zwischenmomente an den Abbiegungen derselben geprüft werden, und dieselben können entweder aus Abb. 101 entnommen oder aus der Formel: $M_x = \frac{M_r (l_r - x) + M_{r+1} \cdot x}{l_r} +$

$$+ \frac{q_r \cdot x}{2} (l_r - x)$$
 berechnet werden.

4. Berechnung der Schubspannungen und der Abbiegungen für die Eisen aus den Querkraften.

Die Maximalquerkraften an den Mittelstützen ergeben sich bei der Vollbelastung von zwei Oeffnungen 1 und 2 bzw. 2 und 3, und an den Endstützen von zwei Oeffnungen 1 und 3. Hierbei ist der Belastungsgleichwert des Maximalbiegemoments für die Belastung von zwei benachbarten Oeffnungen zu bestimmen, um einen Annäherungswert für die Stützenmomente zu erhalten, oder es ist mit Einzellasten zu rechnen. Bei der angenäherten Berechnung mit Halbierung des Abstands der Resultante $7,7 \text{ t}$ von der größeren Einzellast $4,2 \text{ t}$ durch die Mitte der Brücke erhält man die nebengezeichnete

Belastung der zwei Oeffnungen von $13,3 + 11,2 = 24,5^m$ bzw. $11,2 + 11,9 = 23,1^m$ Stützweite. Es ist daher $M_{pmax} = \{ 0,6 \left(\frac{8,15^2}{2} + 10,85 \cdot 19,075 \right) + 7,7 \cdot 11,45 \} \frac{11,45}{24,5} - 0,6 \cdot 10,85 \cdot 6,025 = 69,3$ bzw. $62,8 \text{ mt}$ und $p = \frac{8 M_{max}}{l^2} = \frac{8 \cdot 69,3}{24,5} = 0,92$ bzw. $0,94 \text{ t/m}$.

Hieraus ergibt sich für $p_1 = p_2 = 0,92 \text{ t}$, $M_{p1} = \frac{0,92 \cdot 13,3^2}{8} = 20,34 \text{ mt}$, $M_{p2} = \frac{0,92 \cdot 11,2^2}{8} = 14,43 \text{ mt}$, ferner $m = 13,3 \cdot 20,34 + 11,2 \cdot 14,43 = 432,1$ und $n = 11,2 \cdot 14,43 = 161,6$, somit $M_2 = \frac{-23,1 \cdot 432,1 + 5,6 \cdot 161,6}{534,6} = -16,98 \text{ mt}$, $M_3 = \frac{-24,5 \cdot 161,6 + 5,6 \cdot 432,1}{534,6} = -2,88 \text{ mt}$. Ebenso erhält man für $p_2 = p_3 = 0,94 \text{ t}$, $M_{p2} = 14,74 \text{ mt}$, $M_{p3} = 16,64 \text{ mt}$, $m = 165,1$, $n = 363,1$, $M_2 = -3,33 \text{ mt}$, $M_3 = -14,91 \text{ mt}$ (bei Belastung von Oeffnung 1 und 3 mit p_1 und p_3 wird $M_2 = -9,67 \text{ mt}$ und $M_3 = -6,17 \text{ mt}$).

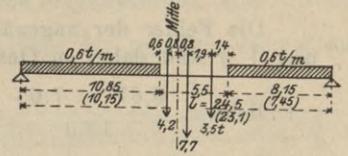


Abb. 102.

Aus diesen Werten für M erhält man nun die Querkräfte an den Stützen aus

$$V_r = \frac{M_{r+1} - M_r}{l_r} + \frac{q_r l_r}{2} \quad (\text{bzw. } A_q = A_p + \frac{q_r l_r}{2}), \quad V_r'' = \frac{M_{r+1} - M_r}{l_r} - \frac{q_r l_r}{2} \quad (\text{bzw. } A_q = A_p + \frac{q_r l_r}{2}).$$

Die nebengezeichneten sechs Belastungsfälle können jedoch auch genau berechnet werden, und hierfür gilt die Clapeyronsche Gleichung:

$$M_r l_r + 2 M_{r+1} (l_r + l_{r+1}) + M_{r+2} l_{r+1} = -2 M_r l_r - 2 M_{r+1} l_{r+1} - \frac{1}{l_r} \sum P \cdot a (l_r^2 - a^2) - \frac{1}{l_{r+1}} \sum P \cdot b (l_{r+1}^2 - b^2),$$

(a und b sind die Abstände der Einzellasten P vom linken und rechten Auflager).

Für linksseitige gleichförmige Belastung ist

$$m' = \frac{1}{l_r} \sum P \cdot a (l_r^2 - a^2) = \frac{1}{l_r} \int_0^x p' \cdot dx \cdot x (l_r^2 - x^2) = \frac{p' x^2}{4 l_r} (2 l_r^2 - x^2).$$

und (bei Einsetzung von $b = l_{r+1} - a$):

$$n' = \frac{1}{l_{r+1}} \sum P \cdot a (l_{r+1} - a) (2 l_{r+1} - a) = \frac{1}{l_{r+1}} \int_0^x p' \cdot dx \cdot x \cdot (l_{r+1} - x) \cdot (2 l_{r+1} - x) = \frac{p' \cdot x^2}{4 \cdot l_{r+1}} \left(l_{r+1} - \frac{x}{2} \right)^2, \text{ und für rechtsseitige gleichförmige Belastung ist } m'' = \frac{p' l_r^3}{4} - m' \text{ und } n'' = \frac{p' l_{r+1}^3}{4} - n', \text{ so daß man für } m \text{ und } n \text{ (s. S. 74) folgende Werte erhält:}$$

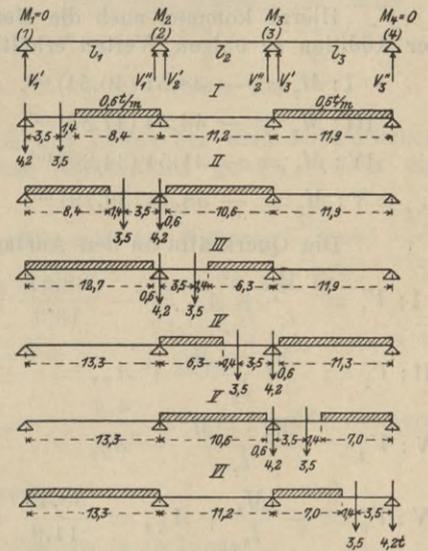


Abb. 103.

$$\text{I: } 2m = \frac{3,5}{13,3} \cdot 3,5 (13,3^2 - 3,5^2) + \frac{0,6 \cdot 13,3^3}{4} - \frac{0,6 \cdot 4,9^2}{4 \cdot 13,3} (2 \cdot 13,3^2 - 4,9^2) = 415, \quad 2n = 0,6 \cdot \frac{11,9^3}{4} = 253,$$

$$\text{II: } 2m = \frac{3,5}{13,3} \cdot 9,8 (13,3^2 - 9,8^2) + \frac{0,6 \cdot 8,4^2}{4 \cdot 13,3} (2 \cdot 13,3^2 - 8,4^2) + \frac{0,6 \cdot 11,2^3}{4} - \frac{0,6 \cdot 0,6^2}{4 \cdot 11,2} \left(11,2 - \frac{0,6}{2} \right)^2 = 435 + 210 = 645,$$

$$2n = \frac{0,6 \cdot 11,2^3}{4} - \frac{0,6 \cdot 0,6^2}{4 \cdot 11,2} (2 \cdot 11,2^2 - 0,6^2) = 209,$$

$$\text{III: } 2m = \frac{0,6 \cdot 12,7^2}{4 \cdot 13,3} (2 \cdot 13,3^2 - 12,7^2) + \frac{3,5}{11,2} \cdot 7,7 (11,2^2 - 7,7^2) + \frac{0,6 \cdot 11,2^3}{4} - \frac{0,6 \cdot 4,9^2}{4 \cdot 11,2} \left(11,2 - \frac{4,9}{2} \right)^2 = 696,$$

$$2n = \frac{3,5}{11,2} \cdot 3,5 (11,2^2 - 3,5^2) + \frac{0,6 \cdot 11,2^3}{4} - \frac{0,6 \cdot 4,9^2}{4 \cdot 11,2} (2 \cdot 11,2^2 - 4,9^2) = 261,$$

$$\text{IV: } 2m = \frac{0,6 \cdot 6,3^2}{4 \cdot 11,2} \left(11,2 - \frac{6,3}{2} \right)^2 + \frac{3,5}{11,2} \cdot 3,5 (11,2^2 - 3,5^2) = 158,$$

$$2n = \frac{0,6 \cdot 6,3^2}{4 \cdot 11,2} (2 \cdot 11,2^2 - 6,3^2) + \frac{3,5}{11,2} \cdot 7,7 (11,2^2 - 7,7^2) + \frac{0,6 \cdot 11,9^3}{4} - \frac{0,6 \cdot 0,6^2}{4 \cdot 11,9} \left(11,9 - \frac{0,6}{2} \right)^2 = 524,$$

$$\text{V: } 2m = \frac{0,6 \cdot 10,6^2}{4 \cdot 11,2} \left(11,2 - \frac{10,6}{2} \right)^2 = 53,$$

$$2n = \frac{0,6 \cdot 10,6^2}{4 \cdot 11,2} (2 \cdot 11,2^2 - 10,6^2) + \frac{3,5}{11,9} \cdot 8,4 (11,9^2 - 8,4^2) + 0,6 \cdot \frac{11,9^3}{4} - \frac{0,6 \cdot 4,9}{4 \cdot 11,9} \left(11,9 - \frac{4,9}{2} \right)^2 = 208 + 423 = 631,$$

$$\text{VI: } 2m = \frac{0,6 \cdot 13,3^3}{4} = 353, \quad 2n = \frac{0,6 \cdot 7,0^2}{4 \cdot 11,9} \left(11,9 - \frac{7,0}{2} \right)^2 + \frac{3,5}{11,9} \cdot 3,5 (11,9^2 - 3,5^2) = 177.$$

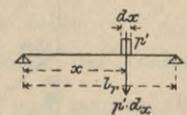


Abb. 104.

$$A_1 \left(\frac{1}{2}\right) = 0 + 2,998 = 3,0^t, \quad A_2 \left(\frac{1}{2}\right) = 0 + 2,769 = 2,77^t, \quad A_3 \left(\frac{1}{2}\right) = 0 + 2,848 = 2,85^t,$$

$$A_1 \left(\frac{1}{4}\right) = -\frac{12,635}{2} + 1,050 = -5,27^t, \quad A_2 \left(\frac{1}{4}\right) = -\frac{10,64}{2} + 1,050 = -4,27^t,$$

$$A_3 \left(\frac{1}{4}\right) = -\frac{11,305}{2} + 1,050 = -4,60^t.$$

Werden diese Ordinaten von der horizontalen Linie aus aufgetragen, so erhält man die obigen Kurven (s. Abb. 105).

Bei Vollbelastung der Oeffnungen ergibt sich $v = \frac{dM}{dx} = 0$ für $M_{x \max}$, so daß man die Mitte der positiven Momenten-

fläche bis zu den schiefen Geraden der diskontinuierlichen Querkräfte projizieren muß, um die horizontale Begrenzung der kontinuierlichen Querkräfte zu erhalten. Für teilweise Belastung erhält man dagegen in der ersten und letzten Oeffnung geneigte Linien aus $v' = \frac{dM}{dx} = \frac{M'}{l}$ für die Verkehrsbelastung der ersten Oeffnung

(Fall I), und $v'' = \frac{dM}{dx} = \frac{M''}{l}$ für die Verkehrsbelastung der ersten Oeffnung

(Fall II), und ebenso in der letzten Oeffnung (Fall V und VI). Bei den mittleren Oeffnungen sind die Momente für Vollbelastung und Nichtbelastung der Oeffnung

angenähert um denselben Wert verschieden, so daß $v' = \frac{dM}{dx} = \frac{M_3 - M_2}{l_2}$ als

konstant angenommen werden kann, und ebenso v'' (mit andern Stützenmomenten), und daher hier eine horizontale Begrenzung (wie oben) eintritt.

Die oben berechneten Maximalquerkräfte V an den Stützen werden nun von den Enden der diskontinuierlichen Querkräfte aus aufgetragen, und durch ihre Endpunkte in der mittleren Oeffnung Horizontalen gelegt, welche die Zwischenquerkräfte für kontinuierliche Belastung begrenzen.

In der ersten und dritten Oeffnung sind diese Linien etwas geneigt, und zwar mit der Differenz $\frac{M_2}{l_1}$ und $\frac{M_3}{l_3}$ für Belastung und Nichtbelastung der ersten und dritten Oeffnung, und man erhält nach S. 77 und 78 aus Fall

$$\text{I: } M_2 = \frac{-23,1 \cdot 415^{(2 \text{ m})}}{2 \cdot 534,6} = -8,97 \text{ mt}, \quad \text{II: } M_2 = \frac{-23,1 \cdot 435^{(2 \text{ m})}}{2 \cdot 534,6} = -9,40 \text{ mt}, \quad \text{V: } M_3 = \frac{-24,5 \cdot 423^{(2 \text{ m})}}{2 \cdot 534,6} = -9,69 \text{ mt},$$

$$\text{VI: } M_3 = \frac{-24,5 \cdot 177^{(2 \text{ m})}}{2 \cdot 534,6} = -4,06 \text{ mt}, \quad \text{und für Oeffnung 1: } v' = \frac{8,97}{13,3} = 0,67^t, \quad v'' = \frac{9,40}{13,3} = 0,71^t, \quad \text{und für Oeffnung}$$

$$3: v' = \frac{9,69}{11,9} = 0,81^t, \quad v'' = \frac{4,06}{11,9} = 0,34^t, \quad \text{woraus sich die schiefen Linien ergeben.}$$

Die Querkräfte sind nun an den Auflagern und bei 1^m Abstand von den Pfeilern in Oeffnung

$$\underline{1}: V'_0 = 18,1^t, \quad V'_{(1,4)} = 14,3^t \text{ links und } V''_{(0,3)} = 23,4^t, \quad V''_{(1,3)} = 20,6^t \text{ rechts,}$$

$$\underline{2}: V'_{(0,3)} = 18,9^t, \quad V'_{(1,3)} = 16,1^t \text{ links und } V''_{(0,3)} = 17,9^t, \quad V''_{(1,3)} = 15,0^t \text{ rechts,}$$

$$\underline{3}: V'_{(0,3)} = 21,4^t, \quad V'_{(1,3)} = 18,4^t \text{ links und } V''_0 = 17,0^t, \quad V''_{(1,4)} = 12,8^t \text{ rechts.}$$

Die zugehörigen Schubspannungen ergeben sich an den Endauflagern und in der Mitte der Oeffnungen aus

$$\tau_0 = \frac{V}{c \left(h - \frac{d}{2}\right)} \quad \text{und bei Kontinuität an den Mittelstützen } \tau_0 = \frac{V}{c \left(h - \frac{h}{8}\right)} = \frac{V}{c \cdot \frac{7h}{8}} \quad \text{und man erhält für } h \text{ an}$$

den Enden $\frac{2 \cdot 76 + 116 \cdot 3}{5} = 100 \text{ cm}$ und an den Mittelstützen 112 cm sowie bei 1,4 bzw. 1,3^m Abstand von den Auflager-

$$\underline{1}: \tau_0 = \frac{18100}{35 (100 - 10)} = 5,7 \text{ kg}, \quad \tau_0 = \frac{14300}{35 (72 - 10)} = 6,6 \text{ kg links und}$$

$$\tau_0 = \frac{23400}{35 \cdot \frac{7}{8} \cdot 112} = 6,8 \text{ kg}, \quad \tau_0 = \frac{20600}{35 (72 - 10)} = 9,5 \text{ kg rechts,}$$

$$\underline{2}: \tau_0 = \frac{18900}{35 \cdot \frac{7}{8} \cdot 112} = 5,5 \text{ kg}, \quad \tau_0 = \frac{16100}{35 \cdot 62} = 7,4 \text{ kg links und}$$

$$\tau_0 = \frac{17900}{35 \cdot 98} = 5,2 \text{ kg}, \quad \tau_0 = \frac{15000}{35 \cdot 62} = 6,9 \text{ kg rechts,}$$

$$\underline{3}: \tau_0 = \frac{21400}{35 \cdot 98} = 6,2 \text{ kg}, \quad \tau_0 = \frac{18400}{35 \cdot 62} = 8,5 \text{ kg links und}$$

$$\tau_0 = \frac{17000}{35 (100 - 10)} = 5,4 \text{ kg}, \quad \tau_0 = \frac{12800}{35 \cdot 62} = 5,9 \text{ kg rechts}$$

(bei frei aufliegenden kontinuierlichen Trägern wären die Querkräfte der Auflagermitten zu nehmen).

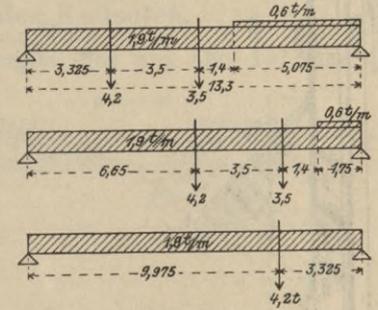


Abb. 106.

Die Abbiegungen ergeben sich nun aus der zulässigen schiefen Schubspannung, welche im $\max = 4,5 \text{ kg}$ angenommen werden kann. Mit Rücksicht auf eine größere Verteilung der Eisen soll an den Enden 3 kg zugelassen werden, während über den mittleren Stützen 4 kg vorzuziehen sind, weil sonst zu viele Abbiegungen nötig werden.

Die Abstände x , für welche die zulässige Schubspannung $3 (4) \text{ kg}$ eintritt, ergeben sich nun aus den Querkräften bei $1,4 (1,3) \text{ m}$ Abstand und aus der Abb. 105, so daß man erhält für

$$\underline{1}: V_x = \frac{14,300 \cdot 3}{6,6} = 6,50 \text{ t}, x = 4,20 \text{ m links und } V_x = \frac{20,600 \cdot 4}{9,5} = 8,67 \text{ t}, x = 5,44 \text{ m rechts}$$

$$\underline{2}: V_x = \frac{16100 \cdot 4}{7,4} = 8,70 \text{ t}, x = 4,04 \text{ m } \quad \text{ " } \quad \text{ " } \quad V_x = \frac{15000 \cdot 4}{6,9} = 8,70 \text{ t}, x = 3,60 \text{ m } \quad \text{ "}$$

$$\underline{3}: V_x = \frac{18400 \cdot 4}{8,5} = 8,66 \text{ t}, x = 4,74 \text{ m } \quad \text{ " } \quad \text{ " } \quad V_x = \frac{12800 \cdot 3}{5,9} = 6,51 \text{ t}, x = 3,76 \text{ m } \quad \text{ "}$$

Aus der Formel $Z' = \frac{(\tau_0 - 3) \cdot x \cdot c}{2\sqrt{2}}$ erhält man für die schraffierten Flächen in

$$\underline{1}: Z' = \left(\frac{(312) \cdot 2,7 + (356) \cdot 3,6}{2} \cdot \frac{140}{\sqrt{2}} + \frac{3,6 \cdot 280}{2\sqrt{2}} \right) \cdot 35 = 23380 \text{ kg links und}$$

$$Z' = \left(\frac{(293) \cdot 2,8 + (806) \cdot 5,5}{2} \cdot \frac{100}{\sqrt{2}} + \frac{5,5 \cdot 414}{2\sqrt{2}} \right) \cdot 35 = 38460 \text{ kg rechts,}$$

$$\underline{2}: Z' = \left(\frac{(173) \cdot 1,5 + (329) \cdot 3,4}{2} \cdot \frac{100}{\sqrt{2}} + \frac{3,4 \cdot 274}{2\sqrt{2}} \right) \cdot 35 = 18570 \text{ kg links und}$$

$$Z' = \left(\frac{(145) \cdot 1,2 + (236) \cdot 2,9}{2} \cdot \frac{100}{\sqrt{2}} + \frac{2,9 \cdot 230}{2\sqrt{2}} \right) \cdot 35 = 13340 \text{ kg rechts,}$$

$$\underline{3}: Z' = \left(\frac{(237) \cdot 2,2 + (547) \cdot 4,5}{2} \cdot \frac{100}{\sqrt{2}} + \frac{4,5 \cdot 344}{2\sqrt{2}} \right) \cdot 35 = 27440 \text{ kg links und}$$

$$Z' = \left(\frac{(262) \cdot 2,4 + (242) \cdot 2,9}{2} \cdot \frac{140}{\sqrt{2}} + \frac{2,9 \cdot 236}{2\sqrt{2}} \right) \cdot 35 = 17640 \text{ kg rechts.}$$

Hierfür erhält man als Inanspruchnahmen der (in Abb. 107) abgelenkten Eisen in Oeffnung

$$\underline{1}: \sigma = \frac{23380}{5 \pi \cdot 3,2^2} = 582 \text{ kg}, \sigma = \frac{38460}{5 \pi \cdot 3,2^2 + \pi \cdot 2,8^2} = 830 \text{ kg,}$$

$$\underline{2}: \sigma = \frac{18570}{4 \cdot \pi \cdot 2,8^2} = 754 \text{ kg}, \sigma = \frac{13340}{4 \cdot \pi \cdot 2,8^2} = 541 \text{ kg,}$$

$$\underline{3}: \sigma = \frac{27440}{6 \pi \cdot 2,8^2} = 742 \text{ kg}, \sigma = \frac{17640}{5 \cdot \pi \cdot 2,8^2} = 573 \text{ kg (für } \frac{\pi \cdot 3,2^2}{4} =$$

$$= 8,04 \text{ qcm und } \frac{\pi \cdot 2,8^2}{4} = 6,16 \text{ qcm).}$$

Die genaue Lage der Abbiegungen ergibt sich aus dem Inhalt der schraffierten Flächen, somit in Oeffnung 1 links für 1,2 und 2 Abbiegungen $\odot 32$ aus $\frac{668}{5} = 133,6$ (s. oben):

$$\frac{x_1^2}{198^2} = \frac{133,6}{356}, x_1 = 121 \text{ cm}, x_2 = \frac{3 \cdot 133,6 - 356}{3,5} = 12,8 \text{ cm, und rechts für 1 } \odot 32 + 1 \odot 28,$$

$$2 \odot 32, 2 \odot 32 = 46,36 \text{ qcm aus } \frac{14,20}{46,36} \cdot 1099 = 337 \text{ und } \frac{16,08}{46,36} \cdot 1099 = 381: \frac{x_1^2}{293^2} = \frac{337}{806},$$

$$x_1 = 189 \text{ cm}, \frac{x_2^2}{293^2} = \frac{337 + 381}{806}, x_2 = 277 \text{ cm.}$$

Ebenso erhält man in Oeffnung 2 links für 1,1 und 2 Abbiegungen $\odot 28$ aus $\frac{502}{4} =$

$$125,5 \text{ (s. oben): } \frac{x_1^2}{194^2} = \frac{125,5}{329}, x_1 = 120 \text{ cm}, \frac{x_2^2}{194^2} = \frac{251}{329}, x_2 = 170 \text{ cm, und rechts für}$$

$$1,1 \text{ und 2 Abbiegungen } \odot 28 \text{ aus } \frac{381}{4} = 95,3: \frac{x_1^2}{163^2} = \frac{95,3}{236}, x_1 = 108 \text{ cm}, \frac{x_2^2}{263^2} =$$

$$\frac{190,5}{236}, x_2 = 147 \text{ cm.}$$

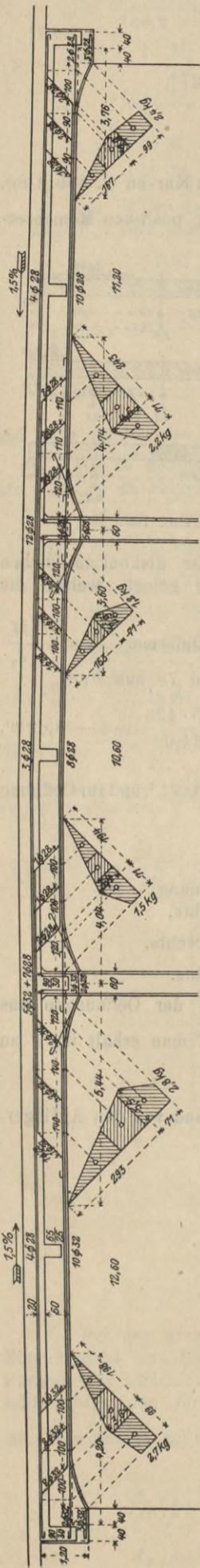


Abb. 107.

Endlich erhält man in Oeffnung 3 links für 2,2 und 2 Abbiegungen $\odot 28$ aus $\frac{784}{6} = 130,7$ (s. oben): $\frac{x_1^2}{243^2} = \frac{261,4}{547}$, $x_1 = 168$ cm, $\frac{x_2^2}{243^2} = \frac{522,8}{547}$, $x_2 = 238$ cm, und rechts für 1,2 und 2 Abbiegungen $\odot 28$ aus $\frac{504}{5} = 100,8$: $\frac{x_1^2}{167^2} = \frac{100,8}{242}$, $x_1 = 108$ cm, $x_2 = \frac{3 \cdot 100,8 - 242}{2,8} = 21,6$ cm.

Aus den Schwerpunkten der schraffierten Teile ergeben sich die Schwerpunktslinien unter 45° Neigung bis zur Unterkante des Balkens, und die Vertikalen bis zur Nulllinie, durch deren Schnitt die Abbiegungen unter 45° gelegt werden (durch kleine Verschiebungen erhält man hierbei runde Zahlen für ihre Abstände, s. Abb. 107).

5. Berechnung der Fahrbahnplatte, der Querrippen und der Konsolen.

Die Anordnung der Eiseneinlagen der Plattenbalken in den drei Oeffnungen ergibt sich aus Abb. 107, und die Abstände der unteren sowie der oberen Eisen sind so zu wählen, daß dieselben über den Mittelstützen ineinandergreifen können, und noch mindestens 2 cm Zwischenraum übrig bleibt. Dies geht aus Abb. 108 hervor, in welcher oben zwei Lagen übereinander vorhanden sind (ev. können auch drei gewählt werden), und überall der erforderliche Zwischenraum zwischen den Eisen vorhanden ist (bei der Mittelstütze rechts gilt dieselbe Anordnung mit $\odot 28$ statt 32, und 110 statt 140 cm Abstand).

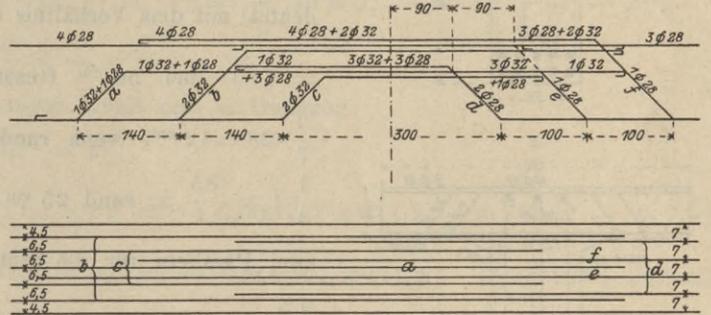


Abb. 108.

Stütze	Abstand m	M_x mt	h cm	f_e qcm	h' cm	f'_e qcm	$x = \sqrt{\frac{6M}{7b \cdot \sigma_b}}$ cm	$h_1 = \frac{8}{3}x$ cm	$f_{e1} = \frac{b \cdot x}{50}$ qcm	$\frac{h_1}{h} \cdot f_{e1}$ qcm
2	0,9 l.	- 30	88	$3 \odot 32 + 7 \odot 28 = 67,2$	6	$3 \odot 32 + 2 \odot 28 = 36,4$	42,9	114,4	30,0	38,8
	„ r.	- 36	„	$5 \odot 32 + 5 \odot 28 = 71,0$	„	„ = 36,4	46,9	125,1	32,8	46,6
	1,8 r.	- 25,5	74	$3 \odot 32 + 4 \odot 28 = 48,8$	„	$6 \odot 28 = 37,0$	39,5	105,3	27,7	39,3
3	0,9 l.	- 27	88	$10 \odot 28 = 61,6$	6	$5 \odot 28 = 30,8$	40,6	108,3	28,4	34,9
	„ r.	- 22,5	„	„ = 61,6	„	„ = 30,8	37,1	98,9	26,0	29,2
	1,8 l.	- 19	74	$7 \odot 28 = 43,1$	„	$6 \odot 28 = 37,0$	34,1	90,9	23,9	29,3

Bei 1,8 m rechts von Stütze 2 erhält man $f_e = 39,3$ statt 48,8 qcm, und bei Berücksichtigung von $f'_e = 37,0$ qcm sowie von $h = 74$ cm, $h' = 6$ cm und $b = 35$ cm für $M = -25,5$ mt aus $A2a: x^2 + \frac{2n(f_e + f'_e)}{b} \cdot x = \frac{2n}{b} \cdot$

$$\cdot (h \cdot f_e + h' \cdot f'_e) \text{ oder } x^2 + \frac{2 \cdot 15 \cdot 85,8}{35} x = \frac{2 \cdot 15}{35} (74 \cdot 48,8 + 6 \cdot 37,0) \text{ oder } x^2 + 73,54 x = 3285,6, x = -36,77 + \sqrt{36,77^2 + 3285,6} = 31,3 \text{ cm. Ferner ist}$$

$$\sigma_b = \frac{2M}{bx \left(h - \frac{x}{3} \right) + 2n f'_e (h - h') \left(1 - \frac{h'}{x} \right)} = \frac{2 \cdot 2550000}{35 \cdot 31,3 (74 - 10,4) + 2 \cdot 15 \cdot 37 (74 - 6) \left(1 - \frac{6}{31,3} \right)} = \frac{510,0000}{6,97 + 6,03} = 39,0 \text{ kg und } \sigma_e = n \cdot \sigma_b \left(\frac{h}{x} - 1 \right) = 15 \cdot 39,0 \left(\frac{74}{31,3} - 1 \right) = 798 \text{ kg, somit genügend.}$$

Die Abstände der untern Eiseneinlagen in Abb. 109 gehen aus den in Abb. 108 eingeschriebenen Maßen hervor, und hierbei müssen auch die Bügel noch Platz finden (Abstand vom Rand im min 2 cm), und ihr Abstand ergibt sich aus $e = \frac{\sigma_e \cdot f_e}{\tau_0 \cdot b}$, wo $\tau_0 = 3$ bzw. 4 kg und $\sigma_e = 1000$ kg einzusetzen ist (s. Ber. d. Eisenbetonkonstr. 1910 S. 31).

Bei der Bügelanordnung in I und III wechseln zwei schmale Bügel a mit einem breiten Bügel b ab (die erstern werden zusammengelegt) und in II ebenso zwei Bügel c mit einem Bügel d , so daß auf die Entfernung $2e : 2 \cdot 3$ Bügelschnitte fallen (s. Abb. 111). Wählt man für die schmalen Bügel $\odot 8$ und für die breiten Bügel $\odot 10$, so wird für $\tau_0 = 3$ (4) kg $e = \frac{1000(2 \cdot 0,503 + 0,785)}{(4) \cdot 3 \cdot 35} = 17,0$ (12,8) cm, und da die Spannung der abgebogenen Eisen bedeutend unter den

zulässigen 1000 kg bleibt (max 830 kg), so kann an den Enden der Brücke hierfür 20 cm und zwischen denselben 15 cm gesetzt werden.

Der letztere Abstand kann in der Mitte der Oeffnungen gleichfalls auf 20 cm erhöht werden, da hier $V = 6,3(4,5)^t$ und $\tau_0 = 2,9(2,1) \text{ kg}$ ist (s. Abb. 105).

Als Adhäsionsspannung erhält man unten: $\tau_1 = \frac{b \tau_0}{n \pi d} = \frac{35 \cdot 6,6}{5 \cdot 3,14 \cdot 3,2} = 4,6 \text{ kg}$ bzw. $\tau_1 = \frac{35 \cdot 5,9}{5 \cdot 3,14 \cdot 2,8} = 4,7 \text{ kg}$ an den Enden der Brücke, und (weil sie an der gezogenen Seite der Balken zu berechnen ist) für die Abstände 1,3 m

von den Mittelstützen oben: $\tau_1 = \frac{35 \cdot 9,5}{3,14(3 \cdot 3,2 + 7 \cdot 2,8)} = 3,6 \text{ kg}$ bzw. $\tau_1 = \frac{35 \cdot 8,4}{10 \cdot 3,14 \cdot 2,8} = 3,4 \text{ kg}$ (in der mittleren Oeffnung wird sie etwas kleiner).

Für die Berechnung der Abbiegungen in der Platte erhält man die in Abb. 110 gezeichneten Parabeln (auf der rechten Seite ist ihre Konstruktion angedeutet) mit dem Verhältnis der Momente am Auflager und in der Mitte $= \frac{ql^2}{9} : \frac{ql^2}{12} = 4 : 3$ (bei 56 cm Gesamthöhe ergeben sich die Höhen $\frac{4}{7} \cdot 28 = 16 \text{ cm}$ und $\frac{3}{7} \cdot 28 = 12 \text{ cm}$, wenn runde Maße gewählt werden).

Wird die erste Abbiegung bei $\frac{1}{4} l = \frac{85}{4} = \text{rund } 21 \text{ cm}$ angenommen, so erhält man aus den zwei Parabeln für die Stützweite und die lichte Weite $\frac{7}{12} \cdot 10$ bis $\frac{9,5}{12} \cdot 10$ oder 5,8 bis 7,9 $\text{O } 10$, so daß bei der geringen Beanspruchung der Eisen 7 $\text{O } 10$ genügen. Für die zweite Abbiegung sind bei 15 cm Abstand $\frac{0}{12} \cdot 10$ bis $\frac{6}{12} \cdot 10 = 0$ bis 5 $\text{O } 10$ erforderlich, so daß 3 $\text{O } 10$ ausreichend sind.

Für die obere Abbiegungen erhält man bei 4 cm Abstand $\frac{0,5}{16} \cdot 10$ bis $\frac{11,5}{16} \cdot 10$ oder 0 bis 7,2 $\text{O } 10$ während 6 vorhanden sind, und bei 14 cm Abstand sind keine obere Eisen mehr nötig, aber sie werden wegen der Stoßwirkungen trotzdem durchgeführt, und zwar wie unten mit 3 $\text{O } 10$, welche auf die ganze Breite der Brücke durchgehen.

Die Berechnung der Querrippen 65/25 kann bei ungünstiger Annahme mit der Einzellast von 5^t geschehen, und hierbei ist wegen Kontinuität und teilweiser Einspannung mit $M_{pm} = \frac{8}{12} \cdot \frac{5 \cdot 1,2}{4} = 1,0 \text{ mt}$ in der

Mitte und $M_{pa} = \frac{8}{9} \cdot \frac{5 \cdot 1,2}{4} = 1,333 \text{ mt}$ am Auflager zu rechnen, wenn die Verteilung nicht berücksichtigt wird. Ferner erhält man vom Eigengewicht $M_{gm} = (0,25 \cdot 0,65 \cdot 2,4 + 0,25 \cdot 0,3 \cdot 2,25) \cdot \frac{1,2^2}{12} = 0,067 \text{ mt}$ und $M_{ga} = \frac{0,56 \cdot 1,2^2}{9} = 0,090 \text{ mt}$, somit zusammen $M_{qm} = 1,067 \text{ mt}$ und $M_{qa} = 1,423 \text{ mt}$.

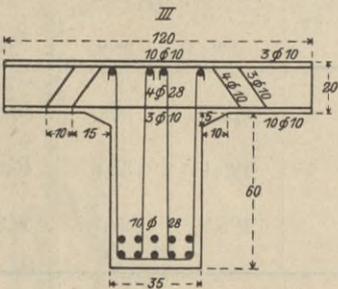
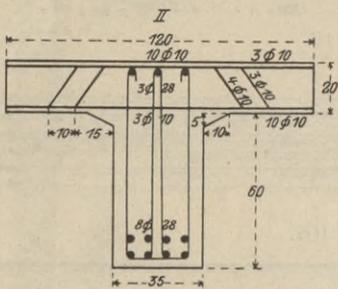
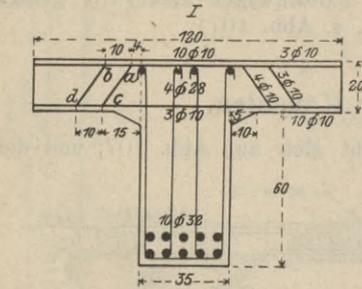


Abb. 109.

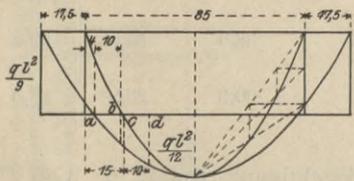


Abb. 110.

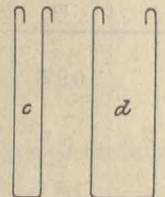
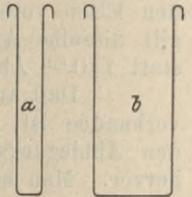


Abb. 111.

Hierfür ist $x = \sqrt{\frac{6 M}{7 b \sigma_b}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 106700}{7 \cdot 25 \cdot 40}} = 9,6(11,0) \text{ cm}$, $h = \frac{8}{3} x = 25,6(29,4) \text{ cm}$, $f_e = \frac{b \cdot x}{50} = \frac{25 \cdot 9,6}{50} = 4,8(5,5) \text{ qcm}$; mit $h = 65 - 4 = 61 \text{ cm}$ erhält man $\frac{25,6}{61} \cdot 4,8 = 2,0$ und $\frac{29,4}{61} \cdot 5,5 = 2,7 \text{ qcm}$, so daß 4 $\text{O } 10 = 3,1 \text{ qcm}$ genügen.

Die Endquerrippen 90/30 werden etwas stärker angenommen, und mit 6 $\text{O } 10 = 4,7 \text{ qcm}$ armiert, weil sie besonders bei schiefen Brücken die Quersteifigkeit der Konstruktion erhalten, und daher über den Auflagern notwendig sind.

Das Moment zur Berechnung der Konsole ist bei 0,35 m Abstand vom Geländer: $M = \frac{0,55^2}{2} \cdot 0,26 \cdot 2,4 + 0,5 \cdot \frac{0,35^2}{2} + 0,15(1,1 + 0,12) + 0,39(0,15 + 0,02) = 0,374 \text{ mt}$, und zwar für die Mitte des Schnitts und eine oben am Geländer wirkende horizontale und vertikale Kraft von je 150 kg/m, somit erhält man $x = \sqrt{\frac{6 \cdot 37400}{7 \cdot 100 \cdot 40}} = 2,84 \text{ cm}$, $h = \frac{8}{3} x = 7,6 \text{ cm}$, $f_e = \frac{b \cdot x}{50} = 5,7 \text{ qcm}$ und für $h = 18 \text{ cm}$ ungefähr die Hälfte, so daß 8 $\text{O } 10$ genügen.

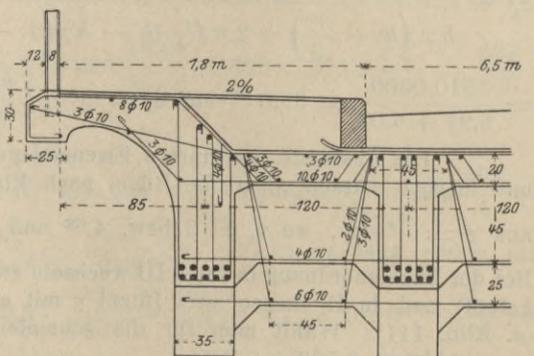


Abb. 112.

Bei 0,7^m Abstand vom Geländer ist $M = \frac{0,9^2}{2} \cdot 0,30 \cdot 2,4 + 0,5 \cdot \frac{0,7^2}{2} + 0,15 (1,1 + 0,22) + 0,74 \cdot (0,15 + 0,02) = 0,739 \text{ mt}$, somit $x = \sqrt{\frac{6 \cdot 73900}{7 \cdot 100 \cdot 40}} = 4,0 \text{ cm}$, $h = \frac{8}{3} x = 10,7 \text{ cm}$, $f_e = \frac{b \cdot x}{50} = 8,0 \text{ qcm}$, und für $h = 35$ wird $f_e = \frac{10,7}{35} \cdot 8,0 = 2,5 \text{ qcm}$, so daß 8 \odot 10 ausreichend sind.

6. Kontinuierliche Berechnung der Brücke mit Einflußlinien für mehrere Öffnungen.

Aus den oben angeführten Formeln erhält man mit $P = 1^t$ für den Abstand x vom linken Auflager die Einflußlinien zur Bestimmung der Stützenmomente, und zwar aus $M_2 = \frac{-23,1 m + 5,6 n}{534,6}$ und $M_3 = \frac{-24,5 n + 5,6 m}{534,6}$

(s. S. 74) und aus der rechten Seite der Clapeyronschen Gleichung (s. S. 77) ergibt sich für die Belastung von Öffnung

$$\begin{aligned} \underline{1} : 2 m &= \frac{1}{l_1} \sum P \cdot a (l_1^2 - a^2) = \frac{x}{l_1} (l_1^2 - x^2), \quad 2 n = 0, \\ \underline{2} : 2 m &= \frac{1}{l_2} \sum P \cdot (l_2 - a) (2 l_2 - a) = \frac{x}{l_2} (l_2 - x) (2 l_2 - x), \quad 2 n = \frac{1}{l_2} \sum P a (l_2^2 - a^2) = \frac{x}{l_2} (l_2^2 - x^2), \\ \underline{3} : 2 m &= 0, \quad 2 n = \frac{1}{l_3} \sum P (l_3 - a) (2 l_3 - a) = \frac{x}{l_3} (l_3 - x) (2 l_3 - x). \end{aligned}$$

Bei Einsetzung von $2 m$ und $2 n$ in obige Gleichungen erhält man in Öffnung

$$\begin{aligned} \underline{1} : 2 M_2 &= \frac{-23,1 \cdot x (13,3^2 - x^2)}{534,6 \cdot 13,3} = -0,00325 x (13,3^2 - x^2), \\ \underline{2} : 2 M_2 &= \frac{x (11,2 - x)}{534,6 \cdot 11,2} \{-23,1 (2 \cdot 11,2 - x) + 5,6 (11,2 + x)\} = -0,000167 x (11,2 - x) (454,7 - 28,7 x), \\ 2 M_3 &= \frac{x (11,2 - x)}{534,6 \cdot 11,2} \{-24,5 (11,2 + x) + 5,6 (2 \cdot 11,2 - x)\} = -0,000167 x (11,2 - x) (149,0 + 30,1 x), \\ \underline{3} : 2 M_3 &= \frac{-24,5 x}{534,6 \cdot 11,9} (11,9 - x) (2 \cdot 11,9 - x) = -0,000385 x (11,9 - x) (2 \cdot 11,9 - x). \end{aligned}$$

Hieraus lassen sich die Einflußordinaten von M_2 und M_3 für jeden Punkt x bestimmen, und aus denselben erhält man auch diejenigen von $M_x = \frac{M_r (l_{r-x}) + M_{r+1} \cdot x}{l_r} + \mathfrak{M}_x$ (wo \mathfrak{M}_x das diskontinuierliche Moment im Abstand x

ist), und zwar für Öffnung $\underline{1} : M_x = \frac{M_2 \cdot x}{l_1} = \frac{M_2 \cdot x}{13,3}$, $\underline{2} : M_x = M_2 + \frac{x(M_3 - M_2)}{l_2} (= 11,2)$, $\underline{3} : M_x = M_3 - \frac{M_3 \cdot x}{l_3} (= 11,9)$ (wozu noch \mathfrak{M}_x kommt).

Die Einflußordinaten der Querkräfte ergeben sich endlich aus:

$$\begin{aligned} V_r' &= \frac{M_{r+1} - M_r}{l_r} + A_{qr} \text{ und } V_r'' = \frac{M_{r+1} - M_r}{l_r} - A_{qr} \text{ (s. S. 77), so daß man erhält in Öffnung:} \\ \underline{1} : V_1' &= \frac{M_2}{l_1} + A_{q1}, \quad V_1'' = \frac{M_2}{l_1} - A_{q1}, \quad \underline{2} : V_2' = \frac{M_3 - M_2}{l_2} + A_{q2}, \quad V_2'' = \frac{M_3 - M_2}{l_2} - A_{q2}, \quad \underline{3} : V_3' = \\ &= -\frac{M_3}{l_3} + A_{q3}, \quad V_3'' = -\frac{M_3}{l_3} - A_{q3} \text{ und hieraus } V_x = V_r' - g_r \cdot x \text{ bei rechtsseitiger Belastung und} \\ V_x &= V_r'' + g_r (l_r - x) \text{ bei linksseitiger Belastung. Der Auflagerdruck an den Stützen ist } Q_r = V_r' - V_{r-1}'', \text{ wobei} \\ &\text{überall die Vorzeichen von } M \text{ und } V \text{ einzusetzen sind.} \end{aligned}$$

Es sind also dieselben Formeln wie in der obigen Berechnung anzuwenden und dieselben werden hier nur für die Last 1 bei x bestimmt.

Zur Vereinfachung der Berechnung soll das auf S. 74 Gesagte berücksichtigt werden, indem bei 600 kg/m gleichförmiger Belastung der einzelnen Öffnungen die Einzellasten 2,9^t und 2,4^t (statt 4,2^t und 3,5^t) einzuführen sind, und alsdann angenähert die gleichen Resultate erhalten werden.

Die obigen Werte der Einflußordinaten sind nun in einer Tabelle auszurechnen, und bei Einteilung der Stützweiten in je fünf Teile erhält man für Öffnung $\underline{1} : 2,66 \text{ m}$, $\underline{2} : 2,24 \text{ m}$, $\underline{3} : 2,38 \text{ m}$, und hierfür können runde Werte symmetrisch zur Mitte in $\underline{1} : 2,7; 5,3; 8,0; 10,6$, $\underline{2} : 2,2; 4,5; 6,7; 9,0$, $\underline{3} : 2,4; 4,8; 7,1; 9,5 \text{ m}$ angenommen werden, so daß man folgende Tabelle zur Berechnung der Einflußordinaten (mit Rechenstab) erhält:

Öffnung 1					Öffnung 2					Öffnung 3				
x	2,7	5,3	8,0	10,6	x	2,2	4,5	6,7	9,0	x	2,4	4,8	7,1	9,5
M_2	0,743	1,285	1,465	1,112	M_2	0,646	0,814	0,660	0,325	M_3	0,940	1,246	1,094	0,627
$\frac{M_2}{13,3}$	0,056	0,097	0,112	0,084	M_3	0,356	0,716	0,883	0,695	$\frac{M_3}{11,9}$	0,079	0,105	0,092	0,053
$\frac{x \cdot M_2}{13,3}$	0,151	0,513	0,885	0,883	$\frac{M_3 - M_2}{11,2}$	-0,026	-0,009	+0,020	+0,033	$\frac{x \cdot M_3}{11,9}$	0,190	0,502	0,653	0,501
$\mathfrak{M}_x = \frac{x(13,3-x)}{13,3}$..	2,15	3,19	3,19	2,15	$\frac{x(M_3 - M_2)}{11,2}$	-0,057	-0,040	+0,134	0,297	$M_3 - \frac{x \cdot M_3}{11,9}$	0,750	0,744	0,441	0,126
					$M_2 + \frac{x(M_3 - M_2)}{11,2}$	0,589	0,774	0,794	0,622	$\mathfrak{M}_x = \frac{x(11,9-x)}{11,9}$	1,92	2,87	2,87	1,92
					$\mathfrak{M}_x = \frac{x(11,2-x)}{11,2}$	1,77	2,69	2,69	1,77	$(M \text{ ist nur numerisch eingesetzt und ist bei der Anwendung mit seinem Vorzeichen einzusetzen).}$				

Die obigen Zahlen entsprechen den Einfluß der Belastung 1^t im Abstand x^m auf die Stützenmomente M_2 und M_3 , die Querkräfte V_x (durch die veränderlichen Stützenmomente), und die Biegemomente M_x (durch dieselben). Mit den letzteren sind noch die Einflußlinien der diskontinuierlichen Werte für V_x in einer schiefen Linie durch die Enden der Öffnung mit der Endordinate 1^t , und M_x in einem Dreieck über der Stützweite mit der Höhe $\mathfrak{M}_x = \frac{1^t \cdot x (l - x)}{l}$ im Abstand x zu verbinden. Werden nun sämtliche Zahlen der Tabelle in dem Maßstab von $1^t = 20^m$ und $1^t = 20^m$ (die Abb. hat $\frac{2}{3}$ Größe) aufgetragen, so erhält man die folgende Darstellung der Einflußlinien für M_2 , M_3 , V_x und M_x , und die Ordinaten der äußeren Parabel entsprechen den Höhen \mathfrak{M}_x bei x , und bei einer bestimmten Belastung sind die zugehörigen Dreieckslinien einzuzeichnen, um das entsprechende M_x (s. oben) zu erhalten.

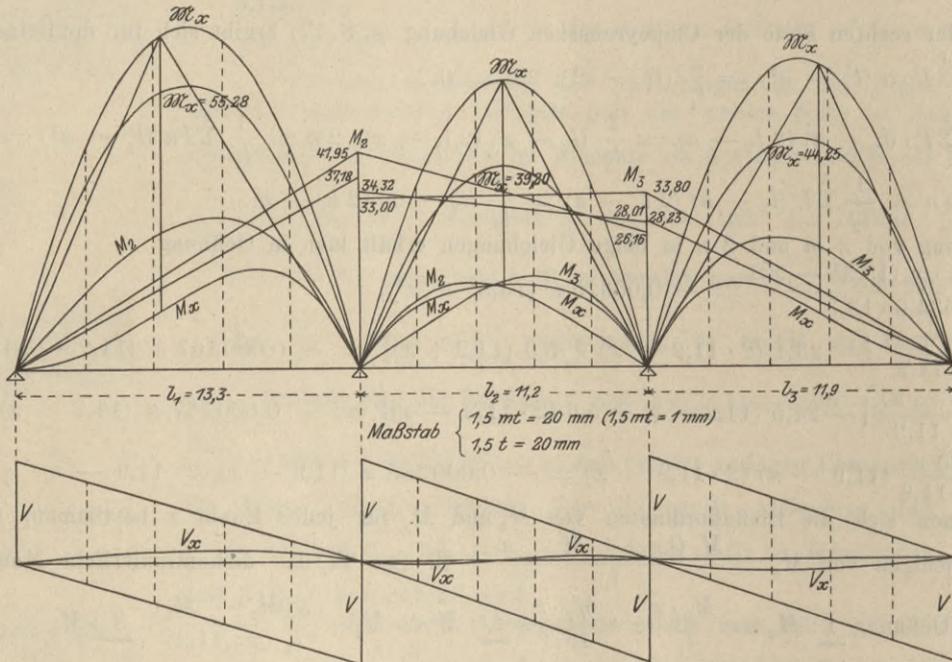


Abb. 113.

Für die Vollbelastung der Öffnungen durch das Eigengewicht bzw. die Nutzlast von $0,6^t/m$ sind die Einflußlinien nicht nötig, und hierfür gelten die mittleren Parabeln und die zugehörigen negativen Momentenlinien. Die Maximalstützenmomente sind aber aus Fall IV und V (s. S. 74) zu bestimmen, wobei statt $67,31 - : 55,28$ und statt $54,97 - : 44,25^m$ in den Formeln für m , n , M_2 , und M_3 einzusetzen ist, und hierfür die oberen negativen Momentenlinien in Abb. 113 erhalten werden. Durch Aufzeichnung der zwei Einzellasten von $2,9$ und $2,4^t$ im Abstand $3,5^m$ auf Pauspapier, und Verschiebung desselben bis die Maximalwerte der Stützenmomente M_2 und M_3 (in deren Einflußlinien) eintreten, erhält man $M_2 = 41,95 + 1,45 \cdot 2,9 + 1,25 \cdot 2,4 = - 49,15^m$ (statt $48,86$),

$$M_3 = 33,80 + 1,15 \cdot 2,9 + 1,11 \cdot 2,4 = - 39,80^m \text{ (statt } 39,65\text{)}.$$

Aus der Verbindung der negativen Momentenlinien mit den mittleren Parabeln ergeben sich die negativen und positiven Biegemomente zwischen den Stützen, und ist für die Parabeln $1^m = 1^m$ angenommen, so daß ihre mittleren Höhen $= 55,3; 39,2; 44,3^m$ werden, und aus dem Verhältnis zu denjenigen der oberen 3 Parabeln $\left(= \frac{6,65 (13,3 - 6,65)}{13,3} \cdot 20 \right) = 66,5; 56; 59,5^m$ zugleich die Zwischenpunkte aus \mathfrak{M}_x (s. Tabelle) hervorgehen.

Aus Fall I bis III (s. S. 74) ergeben sich alsdann auch die positiven Maximalbiegemomente für $M_2 = 37,18$, $M_2 = 34,32$ und $M_3 = 28,01$, $M_3 = 28,23^m$, und hierzu kommt wieder das M_x für die zwei Einzellasten, und zwar ist die größere an die Stelle der größten Einflußordinate zwischen (zwei parallelen Tangenten) der obersten und untersten Einflußlinie zu setzen, weil dies gewöhnlich das $M_x \text{ max}$ ergibt, auch wenn der Einfluß der gleichförmigen Belastung mit $1,9 + 0,6 = 2,5^t/m$ berücksichtigt wird (zur Probe kann man noch eine Stellung rechts und links annehmen, um die genaue Lage des Maximums für die Gesamtbelastung zu erhalten, wiewohl dies im allgemeinen nicht nötig ist).

Man erhält daher durch Einzeichnen der Dreieckslinien für das Moment der Last 1^t an dieser Stelle, und durch Abmessen der Ordinaten zwischen denselben und der untersten Einflußlinie, und deren Multiplikation mit der Größe der Einzellasten in Öffnung

$$\begin{aligned} \underline{1}: M_x \text{ max} &= 38,3 + 2,70 \cdot 2,9 + 1,15 \cdot 2,4 = 48,9 \text{ statt } 47,1^m, \\ \underline{2}: M_x \text{ max} &= 8,5 + 1,98 \cdot 2,9 + 0,50 \cdot 2,4 = 15,5 \quad \text{„} \quad 14,2^m, \\ \underline{3}: M_x \text{ max} &= 31,3 + 2,45 \cdot 2,9 + 0,93 \cdot 2,4 = 40,7 \quad \text{„} \quad 39,3^m. \end{aligned}$$

Der Unterschied ist daher nicht groß, und die Maximalspannungen werden in Öffnung 1: $\sigma_b = \frac{48,9}{47,1} \cdot 38,5 = 38,5$ $\sigma_e = \frac{48,9}{47,1} \cdot 908 = 943 \text{ kg}$ und in Öffnung 3: $\sigma_b = \frac{40,7}{39,3} \cdot 34,3 = 35,5 \text{ kg}$, $\sigma_e = \frac{40,7}{39,3} \cdot 979 = 1014 \text{ kg}$.

Bei Berechnung der Querkräfte sind die schon berechneten Stützenmomente für Fall I, III, IV und V (s. S. 74) mit den eingeklammerten Zahlen zu verwenden, und in die Formeln auf S. 78 einzusetzen, und zwar für die gleichförmige Belastung mit $1,9 + 0,6 = 2,5 \frac{t}{m}$ der betreffenden Oeffnung, und hierzu noch die Einflußordinaten der Einzellasten in Abb. 113 zu addieren, so daß man erhält in Oeffnung:

$$1: V_1 = -\frac{37,18}{13,3} + \frac{2,5 \cdot 13,3}{2} + 2,9 \cdot 1,0 + 2,4 \cdot 0,66 = 18,31^t \text{ (statt } 18,11 - 21,01 + 21,30 = 18,40^t \text{),}$$

$$V_1'' = -\frac{41,95}{13,3} - \frac{2,5 \cdot 13,3}{2} - 2,9 \cdot 1,0 - 2,4 \cdot 0,83 = -24,67^t \text{ (statt } 24,30 + 0,29 = 24,59^t \text{),}$$

$$2: V_2 = -\frac{26,16 + 41,95}{11,2} + \frac{2,5 \cdot 11,2}{2} + 2,9 \cdot 1,0 + 2,4 \cdot 0,72 = 20,04^t \text{ (statt } 19,91 - 18,31 + 18,55 = 20,15^t \text{),}$$

$$V_2'' = -\frac{33,80 + 33,00}{11,2} - \frac{2,5 \cdot 11,2}{2} - 2,9 \cdot 1,0 - 2,4 \cdot 0,74 = -18,75^t \text{ (statt } 18,66 + 0,24 = 18,90^t \text{),}$$

$$3: V_3 = +\frac{33,80}{11,9} + \frac{2,5 \cdot 11,9}{2} + 2,9 \cdot 1,0 + 2,4 \cdot 0,80 = +22,54^t \text{ (statt } 22,44 - 19,21 + 19,47 = 22,70^t \text{),}$$

$$V_3'' = +\frac{28,23}{11,9} - \frac{2,5 \cdot 11,9}{2} - 2,9 \cdot 1,0 - 2,4 \cdot 0,63 = -16,92^t \text{ (statt } 16,99 + 0,26 = 17,25^t \text{).}$$

Der Unterschied zwischen beiden Berechnungen rührt hauptsächlich von dem verschiedenen diskontinuierlichen Auflagerdruck in den einzelnen Oeffnungen her, und ist ihr Unterschied in den Klammern zu den oben erhaltenen Werten (s. S. 78) addiert worden.

Auch für die in Abb. 103 enthaltene teilweise gleichförmige Belastung können die Stützenmomente und Querkräfte aus den in Abb. 113 enthaltenen Einflußlinien bestimmt werden, wenn die Flächeninhalte mit der Belastung pro l. m. multipliziert werden, und können die letzteren sowie ihre Maximalwerte

(bei Einzellasten) auch durch Integration und Ableitung ($\int_{x_1}^{x_2} M \cdot dx$ und $\frac{dM}{dx} = 0$) aus den Gleichungen auf S. 83 berechnet werden.

Sind mehr als drei Oeffnungen vorhanden, so ist es einfacher, die Stützenmomente aus den Fixpunkten zu bestimmen, und ergeben sich diese aus der Konstruktion in Abb. 114 (s. Hütte), aber auch aus den hieraus abgeleiteten Formeln:

$$a'_r = \frac{l_r^2}{3l_r + \frac{l_{r-1}(2l_{r-1} - 3a'_{r-1})}{l_{r-1} - a'_{r-1}}}$$

$$a''_r = \frac{l_r^2}{3l_r + \frac{l_{r+1}(2l_{r+1} - 3a''_{r+1})}{l_{r+1} - a''_{r+1}}}$$

Bei n Oeffnungen ist $a'_1 = 0$ und $a''_n = 0$, und hieraus erhält man

$$a'_2 = \frac{l_2^2}{2l_1 + 3l_2} \text{ und } a''_{n-1} = \frac{l_{n-1}^2}{3l_{n-1} + 2l_n}, \text{ und aus } a'_2 \text{ und } a''_{n-1} \text{ die weiteren Werte links und rechts.}$$

Bei beliebig vielen Oeffnungen ist ferner nach Abb. 115: $M_{r-1} = -\frac{M_r \cdot a'_{r-1}}{l_r - a'_{r-1}}$ und $M_{r+1} = -\frac{M_{r+1} \cdot a''_{r+1}}{l_{r+1} - a''_{r+1}}$ und durch Einsetzung dieser Werte in die Clapeyronsche Gleichung erhält man:

$$M_r \left(2l_{r-1} + 2l_r - \frac{a'_{r-1} \cdot l_{r-1}}{l_{r-1} - a'_{r-1}} \right) + M_{r+1} \cdot l_r = -m$$

$$M_r l_r + M_{r+1} \left(2l_r + 2l_{r+1} - \frac{a''_{r+1} \cdot l_{r+1}}{l_{r+1} - a''_{r+1}} \right) = -n$$

(das $2m$ und $2n$ auf S. 47 wurde wegen Vereinfachung der Berechnung angenommen).

Die Werte von m und n in den Gleichungen für die Einflußlinien bleiben daher unverändert, und man erhält nur andere Koeffizienten für M_r und M_{r+1} .

Die obige Methode kann auch für Einzellasten allein sowie für eine Reihe von solchen z. B. bei Eisenbahnzügen sehr gut verwendet werden, wenn bei letzteren die größte Belastung R der Oeffnung sowie das Rad, welches ein Maximum für M ergibt, aus der linksseitigen Belastung $R' \leq \frac{R}{2}$ bestimmt wird, und auch die zwei benachbarten Stellungen der größten Einflußordinate untersucht werden (die Momentenlinien für das Eigengewicht ergeben sich hierbei einfacher durch Rechnung aus den gewöhnlichen Formeln s. Abb. 113).

Für das Moment M_x in einem bestimmten Querschnitt sind die zugehörigen Dreieckslinien einzuzeichnen, und das ein Maximum ergebende Rad ist aus $R' \leq \frac{R \cdot l'}{l}$ (wo l' = Abstand desselben vom linken Auflager ist bzw. R' und l' auch vom rechten Auflager her gerechnet werden können) zu bestimmen, und ev. noch mit zwei weiteren Belastungsannahmen bzw. Stellungen zu vergleichen.

Kommt außer den Einzellasten noch gleichförmige Belastung in Betracht, so ist es einfacher, das diskontinuierliche Biegemoment sowie das negative Stützenmoment für sich zu berechnen, und letzteres von ersterem (in dem betreffenden Querschnitt mit $\frac{l_1}{l} \cdot M$ abzuziehen). Der Einfluß von Belastungen der anderen Oeffnungen äußert sich in den aus ihnen

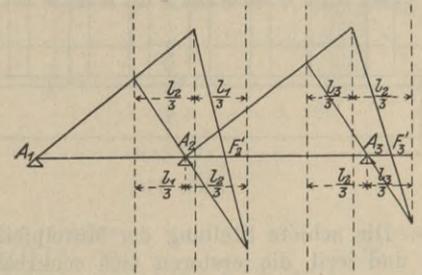


Abb. 114.

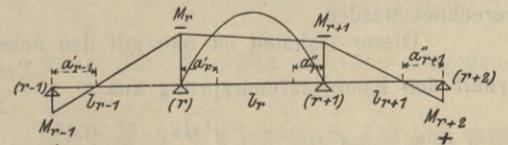


Abb. 115.

abgeleiteten Stützenmomenten, und zwar vermittelt der für dieselben gezeichneten Einflußlinien von M . Derselbe ist auch bei den (wie beim diskontinuierlichen Träger anzunehmenden) ungünstigsten Laststellungen zur Bestimmung der Querkräfte und Auflagerdrücke zu berücksichtigen, und finden bei Eisenbahnzügen gewöhnlich keine Zugstretnungen (nur in der Nähe von Stationen) statt, während bei Straßenbrücken die ungünstigsten Belastungen der einzelnen Öffnungen anzunehmen sind. (Die teilweise Belastung der Öffnungen hat für die letzteren nur einen unbedeutenden Einfluß auf die Momente zwischen den Auflagern und den Fixpunkten).

7. Berechnung der kontinuierlichen Brücke mit Mittelpfeilern als eingespannter Rahmen.

Infolge der Armierung in den Säulen der Mittelpfeiler und ihrer festen Verbindung mit den Plattenbalken der mittleren Öffnung kann angenommen werden, daß sie einen unten eingespannten Rahmen mit festen Ecken bilden, während die äußeren Öffnungen an den Enden frei aufliegen.

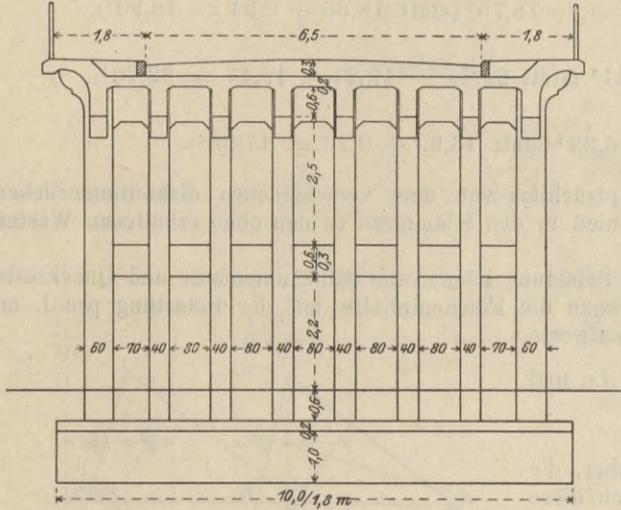


Abb. 116.

Auf diesen rechteckigen Rahmen wirken nur die Momente des kontinuierlichen Trägers bei C und D (s. Ber. d. Eisenbetonkonstr. 1910 S. 58) und zwar gemäß den auf S. 74 angegebenen fünf Fällen I—V, und außerdem die diskontinuierliche Momentenfläche über der mittleren Öffnung, und der seitliche Winddruck auf die Mittelpfeiler von 150 kg/qm .

Das Verhältnis der Trägheitsmomente ergibt sich aus dem Schwerpunktsabstand des nebengezeichneten Plattenbalkens von der oberen Kante: $(35 \cdot \frac{80^2}{2} + \frac{85 \cdot 20^2}{2}) : (35 \cdot 80 + 85 \cdot 20) = \frac{129000}{4500} = 28,7 \text{ cm}$ und $J = \frac{35 \cdot 80^3}{3} + \frac{85 \cdot 20^3}{3} - 28,7^2 \cdot 4500 = 2493400$, und dem Trägheitsmoment der Säule $= \frac{40 \cdot 60^3}{12} = 720000$, so daß man erhält $\frac{2493400}{720000} = \frac{3,5}{1}$, und mit Rücksicht auf die Mitwirkung der benachbarten Säulen bei der ungünstigsten Belastung des Trägers $= \frac{3}{1}$.

Die schiefe Stellung der Mittelpfeiler ergibt den unten gezeichneten schiefen Schnitt in der Richtung der Brückenachse, und weil die ersteren sich senkrecht zu ihrer Richtung durchbiegen müssen, so wirkt nur die Komponente der Kräfte und Momente auf den senkrecht durchschnittenen Rahmen von der Breite $60 \cdot \sin 63 = 60 \cdot 0,891 = \text{rund } 54 \text{ cm}$, und es kann bei Annahme der ganzen Kräfte und Momente mit 60 cm Breite gerechnet werden.

Dieser Rahmen ist nun mit den nebengezeichneten Momentenflächen zu berechnen, und man erhält den Koordinatenursprung aus $z = \frac{\sum w \cdot y'}{\sum w} = \left(\frac{6,4}{1} \cdot 3,2 \cdot 2 \right) : \left(\frac{6,4}{1} \cdot 2 + \frac{11,2}{3} \right) = \frac{40,96}{16,53} = 2,48 \text{ m}$, und $T_x = \int \frac{y^2 ds}{J} = \frac{6,4^3}{3 \cdot 1} \cdot 2 - 2,48^2 \cdot 16,53 = 73,1$, $T_y = \int \frac{x^2 ds}{J} = \left(\frac{5,6^3}{3 \cdot 3} + \frac{6,4}{1} \cdot 5,6^2 \right) \cdot 2 = 440,4$.

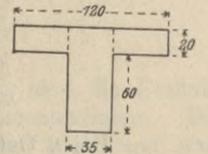


Abb. 117.

Für das oben bestimmte Koordinatensystem sind nun die positiven und negativen Momentenflächen der neben gezeichneten Parabeln und Trapeze mit ihren Schwerpunktsabständen x_s und y_s zu bestimmen (wobei die letzteren sich in Dreiecke zerlegen lassen) und man erhält alsdann:

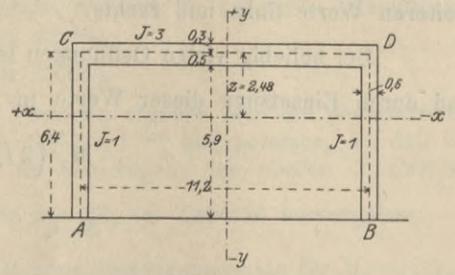


Abb. 118.

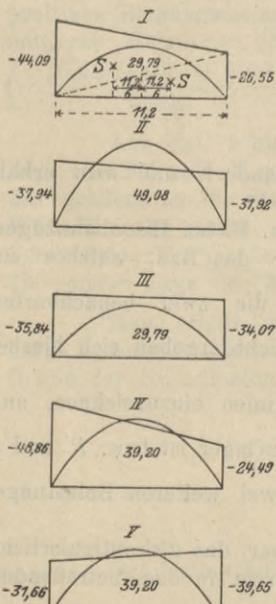


Abb. 119.

$$X = \frac{\sum F'_0 \cdot y_s}{T_x}, Y = \frac{\sum F'_0 x_s}{T_y}, Z = - \frac{\sum F'_0}{G}$$

(s. S. 12), oder für

$$\text{I: } X = \left\{ - \left(\frac{44,09 + 26,55}{2 \cdot 3} \right) 11,2 \cdot 2,48 + \left(\frac{2 \cdot 29,79}{3 \cdot 3} \right) 11,2 \cdot 2,48 \right\} : 73,1 = - 1,960 \text{ t}$$

$$Y = \left\{ \left(\frac{-44,09 + 26,55}{2 \cdot 3} \right) \cdot 11,2 \cdot \frac{11,2}{6} \right\} : 440,4 = - 0,139 \text{ t}$$

$$Z = - \left\{ - \frac{70,64}{2 \cdot 3} \cdot 11,2 + \frac{2 \cdot 29,79}{3 \cdot 3} \cdot 11,2 \right\} : 16,53 = + 3,50 \text{ mt}$$

$$\text{II: } X = \left\{ \left(- \frac{69,86}{2} + \frac{2}{3} \cdot 49,08 \right) \cdot \frac{11,2 \cdot 2,48}{3} \right\} : 73,1 = - 0,280 \text{ t}$$

$$Y = \left\{ \left(- 37,94 + 31,92 \right) \cdot \frac{11,2^2}{36} \right\} : 440,4 = - 0,048 \text{ t}$$

$$Z = - \left\{ \left(- \frac{69,86}{2} + \frac{2}{3} \cdot 49,08 \right) \cdot \frac{11,2}{3} \right\} : 16,53 = + 0,50 \text{ mt}$$

Aus $c = \frac{M_c}{Q_2} = \frac{9,14}{34,5} = 0,265$ m erhält man nun die Werte $P = 34,5$ t, $g_1 = 30 - 26,5 = 3,5$ cm, $h = 55$ cm, $g_2 = h - g_1 = 51,5$ cm, $h' = 5$ cm, $b = 40$ cm, $\sigma_b = 35$ kg zur Berechnung der Eiseneinlagen für die Säulen, und es ist nach A 2 c für $f_e = f'_e$ und $p = 1$:

$$x^2 - 2x(h + h') = -\frac{3}{2}(h^2 + h'^2) + \frac{3P}{b \cdot \sigma_b} \left\{ \left(\frac{h}{x} - 1\right) g_2 + \left(1 - \frac{h'}{x}\right) (g_1 - h') \right\} \text{ oder}$$

$$x^2 - 2x(55 + 5) = -\frac{3}{2}(55^2 + 5^2) + \frac{3 \cdot 34500}{40 \cdot 35} \left\{ \left(\frac{55}{x} - 1\right) 51,5 + \left(1 - \frac{5}{x}\right) (3,5 - 5) \right\} \text{ oder}$$

$$x^2 - 120x = -4575 + 73,93 \left(\frac{2840}{x} - 53\right) \text{ oder } x^2 - 120x + 8493 - \frac{209961}{x} = 0.$$

Für $x = \begin{cases} 30 \\ 40 \end{cases}$ ist $f_{(x)} = \begin{cases} -1206 \\ +44 \end{cases}$ und für $x = 39$ ist $f_{(x)} = -50$, somit genaues $x = 40 - \frac{44 \cdot 1}{94} = 39,5$ mit $f_{(x)} = -2$.

Hieraus ergibt sich $\sigma'_e = n \cdot \sigma_b \left(1 - \frac{h'}{x}\right) = 15 \cdot 35 \left(1 - \frac{5}{39,5}\right) = 459$ kg und $\frac{\sigma'_e}{\sigma_b} f'_e (h - h') = \frac{P \cdot g_2}{\sigma_b} - \frac{b \cdot x}{6} \cdot (3h - x)$ oder $\frac{459}{35} f'_e (55 - 5) = \frac{34500 \cdot 51,5}{35} - \frac{40 \cdot 39,5}{6} (3 \cdot 55 - 39,5)$ oder $f'_e = 27,0$ qcm d. h. es sind erforderlich $3 \text{ } \textcircled{\text{D}} \text{ } 34 = 27,2$ qcm.

Durch obige Werte erhält man nun nach B 2 a (mit $f_e = f'_e = 27,2$ qcm):

$$x^2 - 3g_1 \cdot x = \frac{6nf_e}{b} \left\{ \left(\frac{h}{x} - 1\right) g_2 + \left(1 - \frac{h'}{x}\right) (g_1 - h') \right\} \text{ oder } x^2 - 3 \cdot 3,5x = \frac{6 \cdot 15 \cdot 27,2}{40} \left(\frac{2840}{x} - 53\right) \text{ oder}$$

$$x^2 - 10,5x + 3244 - \frac{173808}{x} = 0. \text{ Für } x = \begin{cases} 40 \\ 39 \end{cases} \text{ ist } f_{(x)} = \begin{cases} +79 \\ -101 \end{cases} \text{ und genaues } x = 40 - \frac{79 \cdot 1}{180} = 39,6 \text{ mit } f_{(x)} = +7.$$

Ferner ist

$$\sigma_b = \frac{2P \cdot g_2}{b \cdot x \left(h - \frac{x}{3}\right) + 2nf_e (h - h') \left(1 - \frac{h'}{x}\right)} = \frac{2 \cdot 34500 \cdot 51,5}{40 \cdot 39,6 (55 - 13,2) + 2 \cdot 15 \cdot 27,2 (55 - 5) \left(1 - \frac{5}{39,6}\right)} =$$

$$= \frac{355,3500}{6,63 + 3,57} = 34,8 \text{ kg, } \sigma_e = n \sigma_b \left(\frac{h}{x} - 1\right) = 15 \cdot 34,8 \left(\frac{55}{39,6} - 1\right) = 203 \text{ kg,}$$

$$\sigma'_e = n \sigma_b \left(1 - \frac{h'}{x}\right) = 15 \cdot 34,8 \left(1 - \frac{5}{39,6}\right) = 456 \text{ kg.}$$

Eine angenäherte Berechnung des Moments bei C ergibt sich aus der Annahme des Halbeingespanntseins für Fall I, und man erhält als Differenz der Einspannmomente (mit $M = \frac{q l^2}{24}$):

$$M = \frac{67,31}{3} - \frac{11,2^2 \cdot 1,9}{24} = 22,44 - 9,93 = 12,51 \text{ mt statt } 9,14 \text{ mt.}$$

Das Moment in der Mitte des oberen Balkens wird für Fall I:

$$M_x = 3,50 + 1,96 \cdot 2,48 + 29,79 - \frac{44,09 + 26,55}{2} = +2,83 \text{ mt und für Fall III:}$$

$$M_x = 3,41 + 1,926 \cdot 2,48 + 29,79 - \frac{34,07 + 35,84}{2} = +3,02 \text{ mt und für Fall II:}$$

$$M_x = 0,50 + 0,280 \cdot 2,48 + 49,08 - \frac{37,94 + 31,92}{2} = +15,34 \text{ mt statt } +14,20 \text{ mt (s. S. 75),}$$

so daß nur eine geringe Vermehrung des positiven Moments eintritt.

(Die Beanspruchung des Bodens beträgt für $Q_2 = 34,5$ t nur $s = \frac{34500}{120 \cdot 180} = 1,6$ kg und wird für Fall II (s. S. 86) etwas größer.)

Anmerkung: Aus der Formel

$$\frac{df_r}{dx} = \frac{M_r}{2l_r} \left(\frac{2l_r^2}{3} - 2xl_r + x^2\right) + \frac{M_{r+1}}{2l_r} \cdot \left(\frac{l_r^2}{3} - x^2\right) + \frac{\mathfrak{M}_r}{l_r} \left(\frac{l_r^2}{3} + \frac{4x^3}{3l_r} - 2x^2\right) = 0$$

ergibt sich der Abstand x der größten Durchbiegung vom linken Auflager in der Oeffnung r der kontinuierlichen Brücke, wobei die Ausdrücke M_r und M_{r+1} der negativen und \mathfrak{M}_r der positiven Momentenfläche (aus dem Maximalbiegemoment der Verkehrsbelastung) entsprechen, und aus der Gleichung dritten Grades x durch Interpolation zwischen zwei angenäherten Werten (mit Rechenstab) erhalten wird. Ist die Oeffnung r nicht belastet, so wird $\mathfrak{M}_r = 0$ und für die erste und letzte Oeffnung ist M_r bzw. $M_{r+1} = 0$ zu setzen.

Die allgemeine Formel zur Berechnung der genauen Durchbiegung bei x lautet ferner (J und E s. B. d. Eisenbetonkonstruktionen 1906, S. 28 und 1910, S. 15):

$$f_r \cdot J \cdot E = \frac{x \cdot M_r}{6l_r} (2l_r^2 - 3xl_r + x^2) + \frac{x \cdot M_{r+1}}{6l_r} (l_r^2 - x^2) + \frac{x \cdot \mathfrak{M}_r}{3l_r} \left(l_r^2 + \frac{x^3}{l_r} - 2x^2\right),$$

wobei auch M_r , M_{r+1} oder $\mathfrak{M}_r = 0$ werden können (M ist immer mit dem Vorzeichen einzusetzen).



C. W. Kreidel's Verlag in Wiesbaden.

Praktische Winke
zum
Studium der Statik
und zur Anwendung ihrer Gesetze.

Ein Handbuch für Studierende und praktisch tätige Ingenieure.

Von

Robert Otzen,

Professor an der Königl. Technischen Hochschule zu Hannover.

Mit 95 Abbildungen im Texte.

1911.

— **Preis gebunden 4 Mark 40 Pf.** —

Der Verfasser will mit dem vorliegenden Werkchen erreichen, daß Studierende und praktische Ingenieure an ihre Aufgaben stets mit vollem Verständnis des inneren Zusammenhanges der Kräfte herantreten. Weiter will er erreichen, daß in den genannten Kreisen Klarheit herrsche über die Grenzen der Richtigkeit unserer Berechnungen, über die Genauigkeit der Annahmen und Ergebnisse. Was das Werkchen erstrebt, wird wohl jeder verständige Lehrer der Statik als seine stete Aufgabe betrachten und somit das Erscheinen des Werkes als Unterstützung seiner Arbeit begrüßen. Nach dem Gesagten ist ohne weiteres klar, daß das Buch nicht dazu bestimmt und geeignet ist, Statik zu lehren; es soll als Ergänzung neben anderweitiger Belehrung dienen und als Nachschlagebuch zur Erinnerung an etwa Vergessenes. Es umfaßt sechs Kapitel: Allgemeine Grundlagen; Gesetze des Gleichgewichtes; Statisch bestimmte Konstruktionen; Einflußlinien; Elastische Formänderungen; Statisch unbestimmte Konstruktionen. — Das Buch kann bestens empfohlen werden.

Th. Landsberg (Zentralblatt der Bauverwaltung, 4. Februar 1911).

C. W. Kreidel's Verlag in Wiesbaden.

**Theorie der Verbundbauten in Eisen
und ihre Anwendung.**Von **G. Barkhausen**, Prof., Geh. Reg.-Rat.(Aus: „Organ f. d. Fortschritte d. Eisenbahnwesens“.) 26 S. m. 17 Abbild.
31,5 × 24,5 cm. 1907. M. 2.—.**Hilfsmittel für Eisenbetonberechnung.**Von **Ad. Jöhrens**, Beigeordneter.

(31 S. m. 22 Abbild. u. 11 farb. Taf.) 36,5 × 28 cm. 1908. In Mappe M. 4.60.

**Die Statik des Eisenbetonbaues.
Elementares Lehrbuch zum Gebrauche an Schulen und zum
Selbstunterricht.**Von **Ottomar Schmiedel**, Oberingenieur.Mit 98 in den Text gedruckten Abbild. und einem Anhang: Bestimmungen für
die Ausführung von Konstruktionen aus Eisenbeton bei Hochbauten (amtliche
Ausgabe). gr. Lex. 8. (VI u. 166 S.) 1908. M. 3.—.**Zahlenbeispiel zur statischen Berechnung von
massiven Dreigelenkbrücken
vermittels Einflusslinien.**Von **A. Teichmann**, Ingenieur.Bearb. nach den Grundzügen des Herrn Geh. Reg.-Rates **G. Barkhausen**, Prof.
an der Kgl. Techn. Hochschule zu Hannover. Mit 29 Abbild. auf 4 lith. Taf.
(32 S.) gr. 8. 1904. M. 2.40.**Tabellen**

zur

Berechnung von Eisenbeton-Konstruktionen.

Zum praktischen Gebrauch

für

Unternehmer, Techniker und Baubeamte

bearbeitet von

Professor **L. Landmann**.

Lex. 8. 72 Seiten. 1910. M. 4.60.

Tabellen

zur

**Berechnung von kontinuierlichen Balken
in Eisenbeton und doppelt armierten Konstruktionen nebst
mehreren Hilfstabellen für einfach armierte Konstruktionen.**

Zum praktischen Gebrauch

bearbeitet von

Professor **L. Landmann**.

Lex. 8. 80 Seiten. 1911. M. 5.40.

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000304053