

# DER STAHLBAU

Schriftleitung:

Dr.-Ing. A. Hertwig, Geh. Regierungsrat, Professor an der Technischen Hochschule Berlin, Berlin-Charlottenburg 2, Technische Hochschule  
Fernsprecher: C 1 Steinplatz 0011  
Professor W. Rein, Breslau, Technische Hochschule. — Fernsprecher: Breslau 421 61

Beilage  
zur Zeitschrift

## DIE BAUTECHNIK

Fachschrift für das ge-  
samte Bauingenieurwesen

Preis des Jahrganges 10 RM und Postgeld

7. Jahrgang

BERLIN, 14. September 1934

Heft 19

Alle Rechte vorbehalten.

### Hängebrücken mit einem Zweigelenkrahmen-Versteifungsträger.

Von Dr.-Ing. Alfred Hawranek, o. ö. Prof. an der Deutschen Technischen Hochschule in Brünn.  
(Schluß aus Heft 18.)

#### 5. Elastizitätsgleichungen.

$$\begin{aligned}
 \text{Gl. I. } & \left\{ \begin{aligned}
 -\Delta l &= P \delta_1 + H_1 \int_0^l y_1^2 \cdot \frac{ds}{EJ} + H_2 \int_0^l y_1 y_2 \cdot \frac{ds}{EJ} \\
 -H_2 c_1 \cdot \sin \beta \int_0^l \frac{\text{tg} \alpha \cdot ds}{EF} + H_1 c_1^2 \int_0^l \frac{ds}{EF} + 2 H_1 \int_0^h \frac{y_1^2 dy}{EJ_4} \\
 -\omega t c_1 \int_0^l ds - \omega \int_0^l \frac{\Delta t}{h'} \cdot y_1 ds, \\
 -\Delta z &= P \delta_2 + H_1 \int_0^l \frac{y_1 y_2 ds}{EJ} + H_2 \int_0^l \frac{y_2^2 ds}{EJ} \\
 + H_2 \cdot \sin^2 \beta \int_0^l \frac{\text{tg}^2 \alpha ds}{EF} - H_1 c_1 \cdot \sin \beta \int_0^l \frac{\text{tg} \alpha ds}{EF} \\
 + 2 H_2 \int_0^h \text{tg}^2 \alpha' \cdot \frac{dy}{EF_4} + H_2 \left[ \sum \frac{s \cdot \text{sek}^2 \alpha}{E_1 F_1} \right. \\
 + \frac{\sum (\text{tg} \alpha_l - \text{tg} \alpha_r)^2 s_h}{E_1 F_2} + \frac{2 s_1 \cdot \text{sek}^2 \alpha_1}{E_1 F_3} \\
 + \left. \frac{2 (\text{tg} \alpha_l - \text{tg} \alpha')^2 h_p}{EF_1} \right] + \omega t [\sum s \cdot \text{sek} \alpha \\
 + \sum (\text{tg} \alpha_l - \text{tg} \alpha_r) s_h + l s_1 \cdot \text{sek} \alpha_1 - 2 (\text{tg} \alpha_l + \text{tg} \alpha') h_p] \\
 - \omega \int_0^l \frac{\Delta t}{h'} \cdot y_2 ds.
 \end{aligned} \right. \\
 \text{Gl. II. } & \left\{ \begin{aligned}
 & \dots
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

#### 6. Auswertung der Integralbeiwerte.

$$\begin{aligned}
 \text{(18) in Gl. I. } & \int_0^l \frac{y_1^2 ds}{EJ} = 2 \int_0^{\frac{l}{2}} \frac{(h+cx)^2 ds}{EJ} = \frac{l}{12 E J c_1} [12 h^2 + 6 h c l + c^2 l^2]. \\
 \text{(19) } & \int_0^l \frac{y_1 y_2 ds}{EJ} = \frac{8 f}{E J l^2 c_1} \int_0^{\frac{l}{2}} (h+cx)x(l-x) dx = \frac{f l}{24 E J c_1} (16 h + 5 c l), \\
 \text{(20) } & \int_0^l \frac{\text{tg} \alpha ds}{EF} = 0, \\
 & c_1^2 \int_0^l \frac{ds}{EF} = \frac{l c_1}{EF}, \\
 \text{(21) } & \int_0^l \frac{\Delta t}{h'} \cdot y_1 ds = \frac{2 \Delta t}{h' c_1} \int_0^{\frac{l}{2}} (h+cx) dx = \frac{\Delta t l (4 h + c l)}{4 h' c_1}, \\
 \text{(22) } & \int_0^h \frac{y_1^2 dy}{E J_4} = \frac{h^3}{3 E J_4}, \\
 \text{in Gl. II: } & \int_0^l \frac{y_2^2 ds}{EJ} = \frac{16 f^2}{l^3 E J c_1} \int_0^l x^2 (l-x)^2 dx = \frac{8 f^2 l}{15 E J c_1},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{(24) } & \sin^2 \beta \int_0^l \frac{\text{tg}^2 \alpha ds}{EF} = \frac{16 f^2 \cdot \sin^2 \beta}{E F c_1 l^4} \int_0^l (l-2x)^2 dx = \frac{16 f^2 \cdot \sin^2 \beta}{3 E F l c_1}, \\
 & \int_0^l \frac{\text{tg} \alpha ds}{EF} = \frac{4 f}{l^2 E F c_1} \int_0^l (l-2x) dx = 0, \\
 & \int \text{tg} \alpha ds = 0, \\
 \text{(25) } & \int_0^l \frac{\Delta t}{h'} \cdot y_2 ds = \frac{4 f \Delta t}{l^2 h' c_1} \int_0^l x(l-x) dx = \frac{2 f l \Delta t}{3 h' c_1}, \\
 \text{(26) } & \int_0^h \text{tg}^2 \alpha' \cdot \frac{dy}{E F_4} = \frac{\text{tg}^2 \alpha' h}{E F_4}.
 \end{aligned}$$

Die  $EJ$ -fachen Beiwerte der Unbekannten  $H_1$  und  $H_2$  werden mit  $a_1, a_2, a_3, a_5, a_6, a_7, a_{10}, a_{11}$  bezeichnet, während für die von der gleichmäßigen und ungleichmäßigen Wärmewirkung herrührenden  $a_4, a_8, a_9$  der Faktor  $EJ$  erst in den Hauptgleichungen berücksichtigt wird.

Es bezeichnen:

$$\begin{aligned}
 \text{(27) } & \left\{ \begin{aligned}
 a_1 &= \frac{l}{12 c_1} [12 h^2 + 6 h c l + c^2 l^2], \\
 a_2 &= \frac{f l}{24 c_1} (16 h + 5 c l), \\
 a_3 &= l c_1 \cdot \frac{J}{F}, \\
 a_4 &= \frac{l}{4 h' c_1} (4 h + c l), \\
 a_5 &= \frac{8 f^2 l}{15 c_1}, \\
 a_6 &= \frac{16 f^2 \cdot \sin^2 \beta}{3 l c_1} \cdot \frac{J}{F}, \\
 a_7 &= \left[ \sum s \cdot \text{sek}^2 \alpha \cdot \frac{EJ}{E_1 F_5} + \sum (\text{tg} \alpha_l - \text{tg} \alpha_r)^2 s_h \cdot \frac{EJ}{E_1 F_2} \right. \\
 & \quad \left. + 2 s_1 \cdot \text{sek} \alpha_1 \cdot \frac{EJ}{E_1 F_3} + 2 (\text{tg} \alpha_l + \text{tg} \alpha')^2 h_p \cdot \frac{J}{F_1} \right], \\
 a_8 &= \left[ \sum s \cdot \text{sek} \alpha + \sum (\text{tg} \alpha_l - \text{tg} \alpha_r) s_h + 2 s_1 \cdot \text{sek} \alpha_1 \right. \\
 & \quad \left. - 2 (\text{tg} \alpha_l + \text{tg} \alpha') h_p \right], \\
 a_9 &= \frac{2 f l}{3 h' c_1}, \\
 a_{10} &= \frac{2 h^3 J}{3 J_4}, \\
 a_{11} &= 2 \text{tg}^2 \alpha' \cdot \frac{h J}{F_4}.
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

#### 7. Ermittlung der statisch unbestimmten Größen.

Danach entstehen die beiden Hauptgleichungen:

$$\text{(28) } \left\{ \begin{aligned}
 \text{Gl. I. } & -EJ \Delta l = EJP \delta_1 + H_1 [a_1 + a_3 + a_{10}] + H_2 a_2 \\
 & \quad -EJ \omega t l - EJ \omega \Delta t a_4, \\
 \text{Gl. II. } & -EJ \Delta z = EJP \delta_2 + H_1 a_2 + H_2 [a_5 + a_6 + a_7 + a_{11}] \\
 & \quad + EJ \omega t a_8 - EJ \omega \Delta t a_9,
 \end{aligned} \right.$$

oder

$$\text{(29) } \left\{ \begin{aligned}
 H_1 C_1 + H_2 C_2 &= O_1, \\
 H_1 C_2 + H_2 C_3 &= O_2,
 \end{aligned} \right.$$

wobei

$$(30) \begin{cases} O_1 = (-P \delta_1 - \mathcal{J}l + \omega t l + \omega \mathcal{J} t a_4) EJ, \\ O_2 = (-P \delta_2 - \mathcal{J}z - \omega t a_8 + \omega \mathcal{J} t a_9) EJ, \\ C_1 = a_1 + a_3 + a_{10}, \\ C_2 = a_2, \\ C_3 = a_5 + a_6 + a_7 + a_{11} \end{cases}$$

und damit ergeben sich die Gleichungen der Einflußlinien für eine wandernde Last  $P = 1$ :

$$(31) \quad H_1 = \frac{O_1 C_3 - O_2 C_2}{C_1 C_3 - C_2^2},$$

$$(32) \quad H_2 = \frac{O_2 C_1 - O_1 C_2}{C_1 C_3 - C_2^2},$$

und der Nenner:

$$(33) \quad N = (a_1 + a_3 + a_{10})(a_5 + a_6 + a_7 + a_{11}) - a_2^2.$$

8. Ermittlung der Einflußlinien für  $H_1, H_2, M_x, N_x, Q_x$ .

Für  $P = 1$  wird:

$$(34) \quad O_1 = -EJ \delta_1, \quad O_2 = -EJ \delta_2$$

und die Ordinaten der Einflußlinien für  $H_1$  und  $H_2$  sind nach Gl. (31)

$$(35) \begin{cases} H_1 = \frac{EJ C_2}{C_1 C_3 - C_2^2} \left( +\delta_2 - \frac{C_3}{C_2} \cdot \delta_1 \right) = K_1 \left( \delta_2 - \frac{C_3}{C_2} \cdot \delta_1 \right) \\ H_2 = \frac{EJ C_1}{C_1 C_3 - C_2^2} \left( -\delta_2 + \frac{C_2}{C_1} \cdot \delta_1 \right) = K_2 \left( -\delta_2 + \frac{C_2}{C_1} \cdot \delta_1 \right). \end{cases}$$

Für die Ziffernrechnung empfiehlt sich eine Umformung der Formeln (14) u. (16) mit

$$(36) \quad k = \frac{a}{l}$$

$$(14a) \quad EJ \delta_1 = -\frac{l^3}{24 c_1} \cdot k \left[ c(3 - 4k^2) + 12 \cdot \frac{h}{l} (1 - k) \right]$$

$$(16a) \quad EJ \delta_2 = -\frac{f l^2}{3} \cdot k(1 - k)(1 + k - k^2) - 2 f r k(1 - k).$$

Versteifungsrahmen.

Momente. Gl. (6).

$$(37) \quad M_x = M_0 - H_1 y_1 - H_2 y_2 = y_2 \left[ \frac{M_0}{y_2} - \left( H_1 \cdot \frac{y_1}{y_2} + H_2 \right) \right].$$

Nach dieser Umgestaltung der Formel läßt sich die Einflußlinie für  $M_x$  in ähnlicher Weise wie für den Zweigelenkbogen ermitteln, indem man eine „zusammengesetzte“  $H$ -Linie verwendet, deren Ordinaten sich aus  $\left( H_1 \cdot \frac{y_1}{y_2} + H_2 \right)$  errechnen. Die Einflußflächen ergeben sich aus der Differenz der  $\frac{M_0}{y_2}$ -Linie und der zusammengesetzten  $H$ -Linie, der Faktor ist  $y_2$ .

In gleicher Weise ergibt sich die Einflußlinie für die Querkräfte. Gl. (4).

$$(38) \begin{cases} Q_x = Q_0 \cdot \cos \beta - H_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \beta + H_1 \cdot \sin \beta \\ = \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \beta \left[ \frac{Q_0}{\operatorname{tg} \alpha} - \left( H_2 - H_1 \cdot \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \right]. \end{cases}$$

Normalkräfte. Gl. (5).

$$(39) \begin{cases} N_x = -Q_0 \cdot \sin \beta + H_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \beta - H_1 \cdot \cos \beta \\ = \operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \beta \left[ -\frac{Q_0}{\operatorname{tg} \alpha} + \left( H_2 - H_1 \cdot \frac{\cot \beta}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \right]. \end{cases}$$

Für den Rahmenstiel sind die Formeln (7) maßgebend.

9. Wärmewirkung.

$$(40) \begin{cases} O_1 = EJ \omega (t l + \mathcal{J} t a_4) \\ O_2 = EJ \omega (t a_8 + \mathcal{J} t a_9) \end{cases}$$

wird

$$(41) \begin{cases} H_1^t = \frac{EJ \omega C_2}{N} \left[ t \left( \frac{C_3}{C_2} \cdot l + a_8 \right) + \mathcal{J} t \left( \frac{C_3}{C_2} \cdot a_4 - a_9 \right) \right] \\ H_2^t = \frac{EJ \omega C_1}{N} \left[ -t \left( a_8 + \frac{C_2}{C_1} \cdot l \right) + \mathcal{J} t \left( a_9 - \frac{C_2}{C_1} \cdot a_4 \right) \right]. \end{cases}$$

Die Momente, Quer- und Normalkräfte ergeben sich für die Wärmewirkung mit

$$(42) \begin{cases} M_x^t = -H_1 y_1 - H_2 y_2 \\ Q_x^t = -H_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \beta + H_1 \cdot \sin \beta \\ N_x^t = +H_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \beta - H_1 \cdot \cos \beta. \end{cases}$$

Bedingung für die stete Zugbeanspruchung der Hängestangen bei Wärmezunahme.

a) Gleichmäßige Wärmezunahme.

Das negative Vorzeichen von  $H_2$  für Wärmezunahme macht die Untersuchung erforderlich.

Allgemein ist die Hängestangenkraft

$$L = H_2 (\operatorname{tg} \alpha_l - \operatorname{tg} \alpha_r).$$

Für eine parabolische Kettenform ist  $\operatorname{tg} \alpha_l - \operatorname{tg} \alpha_r = T = \text{konstant}$ .  
Daher  $L = H_2 T$ .

Es bezeichnen:

$g$  den bei der Montage unmittelbar auf die Kette übertragenen Eigengewichtsanteil pro m,

$g'$  jene Last des Eigengewichtes, die nach dem Vernieten des Versteifungsrahmens bei Normaltemperatur noch hinzukommt (eventuell Fahrbahndecke, Gehwegabdeckung, Rohrleitungen, Wasser) pro m,

$F_{H_2}$  die Fläche der  $H_2$ -Linie,

$l$  die Feldweite,

so wird die Hängestangenkraft ohne zufällige Last

$$L_g = g l + F_{H_2} T g'.$$

Damit kein Schlaffwerden der Hängestänge eintritt, muß

$$g l + F_{H_2} T g' > |H_2^t T|$$

$$\frac{g l}{T} + F_{H_2} g' > \frac{EJ}{N} \cdot \omega t (C_1 a_8 + C_2 l).$$

Die Hängestangen werden schlaff, wenn

$$(43) \quad t > \left( \frac{g l}{T} + F_{H_2} g' \right) \frac{N}{EJ \omega (C_1 a_8 + C_2 l)}$$

oder bei gegebener größter Wärmezunahme  $t^\circ$ , wenn

$$(44) \quad g + F_{H_2} \cdot \frac{T}{l} \cdot g' < \frac{EJ \omega t^\circ}{N} \cdot \frac{T}{l} (C_1 a_8 + C_2 l).$$

Jede hinzukommende zufällige Last wirkt günstig, weil die  $H_2$ -Werte durchweg positiv sind.

b) Ungleichmäßige Wärmeänderung des Versteifungsrahmens.

Für eine größere Erwärmung des Obergurtes des Versteifungsrahmens ist die Untersuchung auf Schlaffwerden der Hängestangen durchzuführen, wenn

$$(45) \quad C_1 a_9 - C_2 a_4 < 0, \text{ oder wenn } C_2 a_4 > C_1 a_9.$$

Treten beide Wärmewirkungen gleichzeitig auf, so wird man für beide Fälle die auftretende Hängestangenkraft ermitteln und sie mit der Hängestangenkraft für Eigengewicht vergleichen.

10. Exzentrische Aufstellung der Pendelpfeiler.

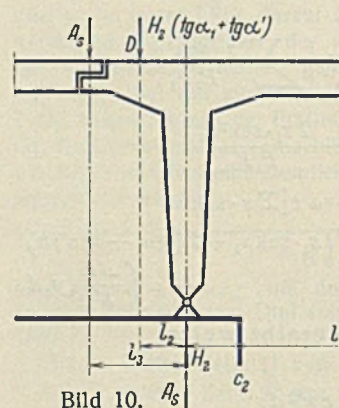


Bild 10.

Man kann die positiven Momente des Versteifungsrahmens bei Vollbelastung ermäßigen oder einen Ausgleich zwischen den positiven und negativen Maximalmomenten bewirken, wenn man die Pendelpfeiler außerhalb der Stützweite  $l$  um das Maß  $l_2$  exzentrisch vom Rahmenlager aufstellt (Bild 10).

Der Druck der Pendelpfeiler ist

$$(46) \quad H_2 (\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha') = H_2 c_2.$$

Eine im Abstand  $l_3$  erfolgte Auflagerung eines Seitenfeldes (Auflagerdruck  $A_3$ ) bewirkt gleichfalls eine Entlastung des Versteifungsrahmens.

Ist dieser Träger in der Seitenöffnung nicht mit der Kette verbunden, so ist er auf die Ermittlung der Horizontalkräfte  $H_1$  und  $H_2$  ohne Einfluß.

Bei exzentrischer Lagerung des Pendelpfeilers ergibt sich für den Versteifungsrahmen

$$(47) \begin{cases} M_x = M_0 - H_1 y_1 - H_2 y_2 - H_2 c_2 l_2, \\ M_x' = -y_1, \\ M_x'' = -y_2 - c_2 l_2 = -y_2'. \end{cases}$$

$N_x, Q_x$  sind die gleichen wie früher.

In Gl. (8) wird deshalb eine Änderung eintreten für

$$\int \frac{M_x M_x'}{EJ} ds = + \int_0^l (H_1 y_1 + H_2 y_2') y_1 \cdot \frac{ds}{EJ},$$

$$\int \frac{M_x M_x''}{EJ} ds = + \int_0^l (H_1 y_1 + H_2 y_2') y_2' \cdot \frac{ds}{EJ}.$$

In den Summen  $\sum \frac{S_x S_x'}{EF}$ ,  $\sum S_x' s$  ist für die neue Anordnung die Verlängerung der beiden obersten Kettenstäbe um das Maß von je  $l_2 \operatorname{sek} \alpha'$  zu berücksichtigen sowie die sonstigen Längenänderungen; außerdem kommt für die ungleiche Wärmewirkung ein Glied hinzu.

Die Gl. (17) lauten deshalb

$$(48) \left\{ \begin{aligned} -\Delta l &= P\delta_1 + H_1 \int_0^l \frac{y_1^2 ds}{EJ} + H_2 \left[ \int_0^l \frac{y_1 y_2 ds}{EJ} + c_2 l_2 \int_0^l \frac{y_1 ds}{EJ} \right] + \dots \\ -\Delta z &= P\delta_2 + H_1 \left[ \int_0^l \frac{y_1 y_2}{EJ} + c_2 l_2 \int_0^l \frac{y_1 ds}{EJ} \right] + H_2 \left[ \int_0^l \frac{y_2^2 ds}{EJ} \right. \\ &\quad \left. + 2 c_2 l_2 \int_0^l \frac{y_2 ds}{EJ} + c_2^2 l_2^2 \int_0^l \frac{ds}{EJ} \right] + \dots - \omega \int \frac{\Delta t}{h'} \cdot y_2 ds \\ &\quad - \omega \int_0^l \frac{\Delta i}{h'} \cdot c_2 l_2 ds. \end{aligned} \right.$$

In den beiden Gleichungen kommen gegenüber Gleichung (17) nur die unterstrichenen Glieder hinzu.

$$(49) \left\{ \begin{aligned} \int_0^l \frac{y_1 ds}{EJ} &= \frac{l(4h + cl)}{4EJc_1}, \\ \int_0^l \frac{y_2 ds}{EJ} &= \frac{2}{3} \cdot \frac{fl}{EJc_1}, \\ \int_0^l \frac{ds}{EJ} &= \frac{l}{c_1 EJ}. \end{aligned} \right.$$

Es erfahren dabei die früheren Beiwerte  $a_2, a_5$  und  $a_9$  eine Änderung in  $a_2', a_5', a_9'$ .

Es wird

$$(50) \left\{ \begin{aligned} a_2' &= \frac{fl}{24c_1} (16h + 5cl) + c_2 l_2 \cdot \frac{l(4h + cl)}{4c_1}, \\ a_5' &= \frac{8f^2 l}{15c_1} + \frac{4}{3} \cdot \frac{c_2 l_2}{c_1} \cdot fl + \frac{c_2^2 l_2^2 l}{c_1}, \\ a_9' &= \frac{l}{h' c_1} \left( \frac{2f}{3} + c_2 l_2 \right). \end{aligned} \right.$$

Diese Beiwerte ändern nur die Werte  $C_2, C_3$  in Gl. (30). Der sonstige Weg zur Bestimmung von  $H_1$  und  $H_2$  ist der gleiche [Gl. (31), (32)].

### 11. Versteifungsrahmen mit Kragarmen und eingehängten Endträgern.

Die Endträger sind mit der Kette nicht verbunden. Kraglänge  $l_3$ . Diese Anordnung mindert die Feldmomente des Versteifungsträgers herab, so daß eine ähnliche Wirkung entsteht, wie bei einer exzentrischen Abstützung des Pendelpfeilers und ein Ausgleich der -- und +-Maximalmomente des Versteifungsträgers bei bestimmtem Längenverhältnis  $l_3$  zur seitlichen Öffnungsweite eintreten kann (Bild 10).

Die Einflußlinien für  $H_1, H_2$  bzw. für die „zusammengesetzten“  $H$ -Linien brauchen bloß über die Stützpunkte des Rahmens tangentiell und geradlinig bis zur Gelenkstelle  $A_3$  des eingehängten Trägers verlängert werden.

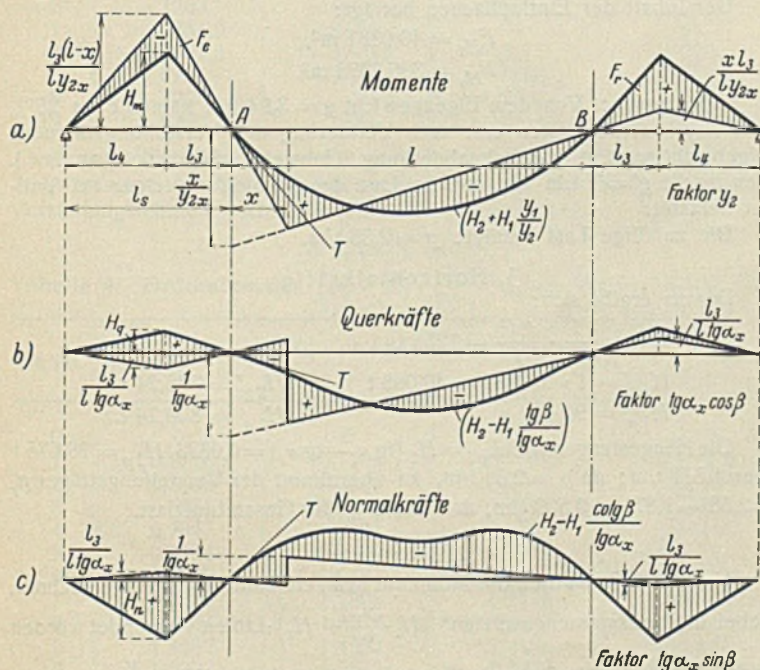


Bild 11 a bis c. Einflußlinien für die Momente, Querkräfte und Normalkräfte eines Versteifungsrahmens mit Kragarmen.

Die Endtangente  $T_{H_1}$  für die  $H_1$ -Linie haben den Neigungswinkel  $\gamma$  gegen die Waagerechte und  $\delta$  von  $T_{H_2}$  für die  $H_2$ -Linie (Bild 11). Sie lassen sich aus der Differentiation der Gleichungen für  $H_1$  und  $H_2$  bestimmen. Berechnung der Neigungswinkel der Endtangente der  $H_1$ - und  $H_2$ -Linien.

Die Gleichung der  $H_1$ -Linie lautet

$$H_1 = K_1 \left\{ -\frac{fa}{3l^2} [l^3 - 2la^2 + a^3] - \frac{C_3}{C_2} \cdot \frac{1}{24c_1} \cdot a [c(4a^2 - 3l^2) - 12(l-a)h] \right\}.$$

$$(51) \quad \text{tg } \gamma = \frac{dH_1}{da} = K_1 l \left[ -\frac{f}{3} + \frac{C_3}{C_2} \cdot \frac{1}{8c_1} (cl + 4h) \right] \quad \text{für } a = 0.$$

Die Ordinate der  $H_1$ -Linie an der Gelenkstelle  $A_3$  wird

$$(52) \quad H_{1s} = -l_3 \cdot \text{tg } \gamma.$$

Die Gleichung der  $H_2$ -Linie lautet

$$(53) \left\{ \begin{aligned} H_2 &= K_2 \left\{ \frac{fa}{3l^2} (l^3 - 2la^2 + a^3) \right. \\ &\quad \left. + \frac{C_3}{C_1} \cdot \frac{1}{24c_1} \cdot a [c(4a^2 - 3l^2) - 12(l-a)h] \right\} \\ \text{tg } \delta &= \frac{dH_2}{da} = K_2 l \left[ \frac{f}{3} - \frac{C_3}{C_1} \cdot \frac{1}{8c_1} (cl + 4h) \right] \quad \text{für } a = 0. \end{aligned} \right.$$

Die Ordinate der  $H_2$ -Linie an der Gelenkstelle  $A_3$  ist

$$(54) \quad H_{2s} = -l_3 \cdot \text{tg } \delta.$$

Damit ergeben sich die Ordinaten der „zusammengesetzten“  $H$ -Linien in den Gelenkstellen für die Einflußlinien der Momente, Querkräfte und Normalkräfte an den Schnittstellen  $x$  des Versteifungsträgers

$$(55) \left\{ \begin{aligned} \text{Momente: } H_m &= l_3 \left( \text{tg } \delta + \frac{y_{1x}}{y_{2x}} \cdot \text{tg } \gamma \right) \\ \text{Querkräfte: } H_q &= l_3 \left( \text{tg } \delta - \frac{\text{tg } \beta}{\text{tg } \alpha_x} \cdot \text{tg } \gamma \right) \\ \text{Normalkräfte: } H_n &= l_3 \left( \text{tg } \delta - \frac{\text{cotg } \beta}{\text{tg } \alpha_x} \cdot \text{tg } \gamma \right). \end{aligned} \right.$$

### 12. Ausgleich der Größtmomente durch exzentrische Stellung der Pendelpfeiler.

$l_2$  = Exzentrizität des Pendelpfeilers nach außen. Sind  $H_{2g}$  und  $H_2(g' + p)$  die Horizontalkräfte der Kette für einen zentrisch gelagerten Pendelpfeiler, so ist die Kraft  $A_p'$  im exzentrisch gelagerten Pendelpfeiler:

$$(56) \quad A_p' = c_2 [H_{2g} + H_{2(g'+p)}] (1 - l_2 \cdot \text{tg } \delta)$$

und erzeugt im Versteifungsträger das Moment

$$(57) \quad M_e = -A_p' l_2.$$

a) Ausgleich der +- und -- Momente im Versteifungsträger bei Vollast. Moment am Trägerende (zentrische Lagerung der Pendelstütze)

$$M_o^v = -H_{1(g'+p)} h$$

Moment in Trägermitte

$$M_l^v = \frac{1}{8} (g' + p) l^2 - H_{1(g'+p)} h_1 - H_{2(g'+p)} f.$$

Durch die Exzentrizität zu erzeugendes Moment

$$M_e' = -\frac{1}{2} (M_o^v + M_l^v)$$

aus  $M_e = M_e'$  ergibt sich die erforderliche Exzentrizität mit

$$(58) \quad H_{2g} + H_{2(g'+p)} = H'$$

ist

$$(59) \quad l_2 = \frac{1}{2 \cdot \text{tg } \delta} \pm \sqrt{\frac{1}{4 \cdot \text{tg}^2 \delta} + \frac{M_e'}{c_2 H' \cdot \text{tg } \delta}}.$$

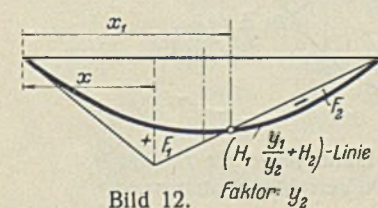


Bild 12. Faktor  $y_2$

b) Ausgleich der größten +- und -- Momente einschließlich Wärmewirkung.

Bedeutet

$F_{H_1}$  die Einflußfläche der  $H_1$ -Linie (Bild 12),

$F_1$  u.  $F_2$  die + bzw. -- für jenen Querschnitt  $x$  des Versteifungsträgers, der einschließlich der +-Temperaturwirkung das größte + max  $M$  aufweist. (Am besten aus der Momentenumhüllungsline zu bestimmen; er liegt in etwa  $x = \frac{3}{8} \cdot l$  vom linken Ende),

$x_1$  die bezügliche Belastungslänge,  
 $H_{1l}, H_{2l}$  die Horizontalkräfte infolge der Wärmezunahme in  $t^\circ \text{C}$ ,

so wird für die zentrische Lagerung des Pendelpfeilers das größte negative Moment am linken Trägerende

$$M_{x=0} = - (g' + p) F_{H_1} + H_{1t} h$$

Das größte positive Moment

$$M_{x_{max}} = g' (F_1 - F_2) y_2 + p F_1 y_2 - H_{1t} y_1 - H_{2t} y_2$$

Sollen beide Momente gleich groß werden, so muß ein negatives Moment  $M_e''$  hinzukommen:

$$(60) \quad M_e'' = - \frac{1}{2} (M_{x=0} + M_{x_{max}})$$

Die Pendelstützkraft wird

$$(61) \quad A_p'' = c_2 [H_{2g} + H_{2g}' + H_{2p}' + H_{2t}] (1 - l_2 \cdot \text{tg } \delta)$$

wobei  $H_{2p}'$  die Horizontalkraft für die Belastungslänge  $x_1$  darstellt.

Mit

$$(62) \quad H_{2g} + H_{2g}' + H_{2p}' + H_{2t} = H''$$

und

$$(63) \quad M_e = - A_p'' l_2$$

ergibt sich bei Gleichsetzung der Momente  $M_e = M_e''$ :

$$M_e = - c_2 H'' l_2 + c_2 H'' l_2^2 \cdot \text{tg } \delta = M_e''$$

und daraus

$$(64) \quad l_2 = \frac{1}{2 \cdot \text{tg } \delta} \pm \sqrt{\frac{1}{4 \cdot \text{tg}^2 \delta} + \frac{M_e''}{c_2 H'' \cdot \text{tg } \delta}}$$

13. Waagerechte Verschiebung  $\Delta h$  des Pendelpfeilers am Kopfende.

Bedeutet

- $\Delta s_1$  die Längenänderung der Rückhaltkette,
- $\Delta_1$  Verkürzung des Pendelpfeilers und Rahmenstieles,

so wird aus einem Verschiebungsplan Bild 13 die waagerechte Verschiebung des Kopfendes des Pendelpfeilers

$$(65) \quad \Delta h = \Delta s_1 \cdot \cos \alpha_1 + (\Delta_1 + \Delta s_1 \cdot \sin \alpha_1) \cdot \text{tg } \alpha_1$$

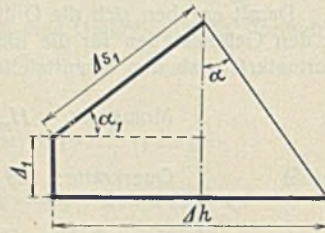


Bild 13.

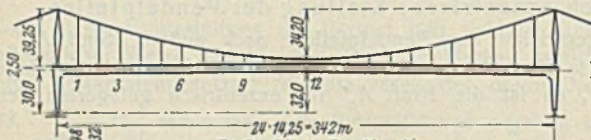


Bild 14.

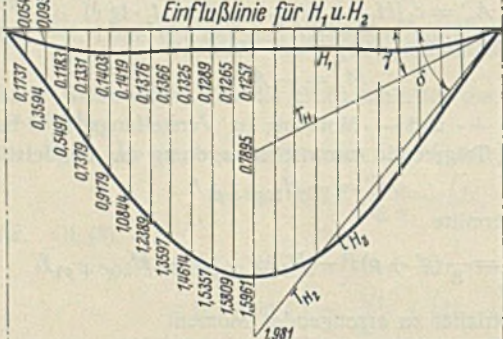


Bild 15.

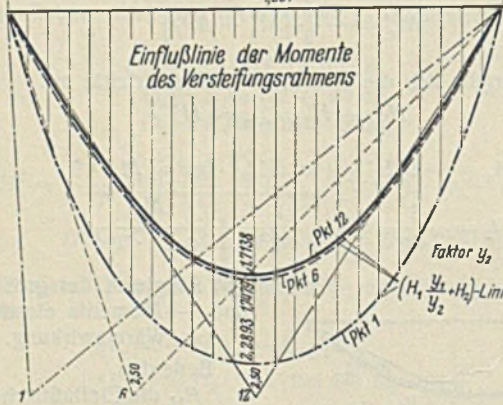


Bild 16.

Bild 14 bis 16. Tragwerksnetz, Einflußlinien für  $H_1$  und  $H_2$  sowie für die Momente des Versteifungsrahmens.

Beispiel.

Als Beispiel wird eine Kabelbrücke von 342 m Stützweite gewählt, deren Hängestangen aus Drahtseilen bestehen (Bild 14 bis 16).

Belastungen:

- $g_k = 3,940$  t/m (Eigengewicht je Kabel einschließlich Kabel).
- $p' = 1,265$  t/m (Zufällige Last für die Kabelbemessung).
- $p = 2,380$  t/m (Zufällige Last für den Versteifungsträger).

Abmessungen:

- $l = 342$  m =  $24 \times 14,25$  m
- $f = 34,2$  m
- $\frac{f}{l} = 0,1$
- $h = 30,0$  m
- $h_1 = 32,0$  m
- $h = 5,0$  m
- $h_p = 39,25$  m
- $s_1 = 226,688$  m
- $s_1' = 119,62$  m (ohne Verankerung im Schacht).
- $\text{tg } \alpha_1 = 0,3312$ ,  $\text{sek } \alpha_1 = 1,0534$
- $\text{tg } \alpha' = \frac{4f}{l} = 0,4$
- $c_2 = \text{tg } \alpha_1 + \text{tg } \alpha' = 0,7312$
- $c = \text{tg } \beta = 0,011695$
- $c_1 = \cos \beta = 0,99993$
- $\sin \beta = 0,0116951$
- $\text{tg } \alpha_l - \text{tg } \alpha_r = 0,033333$  konst. für Parabel
- $(\text{tg } \alpha_l - \text{tg } \alpha_r)^2 = 0,001110889$

- Versteifungsrahmen:  $F = 0,16205$  m<sup>2</sup>  $J = 1,61416$  m<sup>4</sup>
- Kabel:  $F = 0,0541$  m<sup>2</sup>
- Pendelpfeiler:  $F_1 = 0,19898$  m<sup>2</sup>
- Rahmenstiel:  $F_4 = 0,24568$  m<sup>2</sup>  $J_4 = 0,13578$  m<sup>4</sup>
- Hängestangen:  $F_2 = 0,004564$  m<sup>2</sup>
- Rückhaltkabel:  $F_3 = 0,05412$  m<sup>2</sup>

- $\frac{J}{F} = 9,9609$  m<sup>2</sup>  $\frac{J}{F_3} = 29,8255$  m<sup>2</sup>
- $\frac{J}{F_1} = 8,1122$  m<sup>2</sup>  $\frac{J}{F_4} = 6,2837$  m<sup>2</sup>
- $\frac{J}{F_2} = 353,672$  m<sup>2</sup>  $\frac{J}{J_4} = 11,888$

$E = 21,000000$  t/m<sup>2</sup> (Versteifungsträger, Pendelpfeiler)

$E_1 = 16,000000$  t/m<sup>2</sup> (Hängesäulen als Drahtseile)

$E_2 = 19,000000$  t/m<sup>2</sup> (Kabel)

$EJ = 33,897360$  t/m<sup>2</sup>

$\Sigma s_h = 332,534$  m.

Die Gleichungen der Biegelinien lauten mit  $k = \frac{x}{l}$ :

Gl. (14)  $EJ \delta_1 = -1,6668537 k \{0,011695 [3 - 4k^2] + 1,05263 (1 - k)\}$

Gl. (16)  $EJ \delta_2 = -1,3333896 k (1 - k)(1 + k + k^2) - 0,18639 k (1 - k)$

Die Beiwerte:

- Gl. (27)  $a_1 = 332900,00$   $a_7 = 28450,67$   
 $a_2 = 243691,30$   $a_8 = 791,47$   
 $a_3 = 3406,38$   $a_9 = 1559,63$   
 $a_4 = 2120,54$   $a_{10} = 213984,0$   
 $a_5 = 213357,27$   $a_{11} = 60,3235$   
 $a_6 = 0,024852$   $a_8' = 565,89$  (für Wärmewirkung)

$C_1 = 550290,0$   $\frac{C_2}{N} = 0,00000330598$

$C_2 = 243691,3$   $\frac{C_1}{N} = 0,00000746538$

$C_3 = 241868,0$   $\frac{C_3}{C_2} = 0,992519$

$N = 73712,238239,0$   $\frac{C_2}{C_1} = 0,442841$

Es ergeben sich aus Gl. (35) die Ordinaten der  $H_1$ - und  $H_2$ -Linien, die in Bild 15 eingetragen sind.

Der Inhalt der Einflußflächen beträgt:

$F_{H_1} = 40,0881$  m<sup>2</sup>,

$F_{H_2} = 336,2373$  m<sup>2</sup>.

Belastungen: Von dem Eigengewicht  $g = 3,94$  t/m kämen etwa 25% in Abzug, welche Lasten erst nach Vernietung des Versteifungsrahmens aufgebracht werden (Fahrbahnabdeckung, Gehsteige, Wasserleitung usw.). Dies macht  $g' = 1$  t/m aus, welche Last den Versteifungsträger bei Vollast belastet:

Die zufällige Last beträgt:  $p = 2,38$  t/m.

1. Horizontalkräfte.

Daraus ergibt sich:

$H_{2g} = \frac{1}{8} \cdot \frac{g l^2}{f} = 1256$  t

$H_{1g}' = 1 \cdot 40,0881 = 40,088$  t  $H_{2g}' = 336,24$  t

$H_{1p} = 95,41$  t  $H_{2p} = 800,24$  t.

Die Hängestangenkraft  $L_{p2} = H_2 (\text{tg } \alpha_l - \text{tg } \alpha_r) = 0,0333$ ,  $H_{2p} = 26,675$  t oder 1,871 t/m; da  $p = 2,38$  t/m, so übernimmt der Versteifungsträger  $p_r = 2,38 - 1,871 = 0,509$  t/m, d. i. 21,38% der Gesamtnutzlast.

2. Momente.

Nach Gl. (37) wurden die Momente des Versteifungsrahmens gerechnet, wobei die „zusammengesetzten“  $(H_1 \cdot \frac{y_1}{y_2} + H_2)$ -Linien verwendet worden sind; für untersuchte Querschnitte sind die bezüglichen Werte  $\frac{y_1}{y_2}$  konstant, d. h. es sind die für die Schnittstelle maßgebenden  $y_1$ - bzw.  $y_2$ -Werte ein-

zusetzen. Die Bestimmung der Einflußflächen erfolgte mittels Rechenschiebers ( $\delta_1, \delta_2, H_1, H_2$  sind mit der Rechenmaschine gerechnet) (Bild 16).

Tabelle 1.

Ordinaten der  $(H_1 \cdot \frac{y_1}{y_2} + H_2)$ -Linie für die Momente im Punkte.

Punkt	Momente im Punkt			
	3	6	9	12
0	0	0	0	0
1	0,2857	0,2399	0,2275	0,2251
2	0,5494	0,4719	0,4509	0,4467
3	0,7913	0,6927	0,6660	0,6606
4	1,0098	0,8988	0,8689	0,8629
5	1,2039	1,0873	1,0558	1,0492
6	1,3720	1,2557	1,2237	1,2173
7	1,5193	1,4049	1,3740	1,3678
8	1,6378	1,5246	1,4938	1,4877
9	1,7314	1,6214	1,5915	1,5854
10	1,7881	1,6914	1,6624	1,6564
11	1,8389	1,7338	1,7053	1,6994
12	1,8521	1,7479	1,7196	1,7138

Mit Hilfe  $M_0$ -Linien wurden die +- und -- Momentenflächen und die Momente  $M_x$  ermittelt (Tabelle 2).

Zum Vergleich wurde eine Hängebrücke mit einfachem Verstiefungsbalken sonst gleicher Form gerechnet, wobei alle Abmessungen, Flächen und Trägheitsmomente die gleichen waren wie bei der Brücke mit Verstiefungsrahmen.

Tabelle 2. Größte +- und -- Momente.

Hängebrücke mit Verstiefungsrahmen $p = 2,38$ t/m		Hängebrücke mit Verstiefungsbalken $p = 2,38$ t/m	
Punkt	positive Momente tm	Punkt	negative Momente tm
0	0	0	-2862,3
1	+1062	1	-2740
3	+3744	3	-3392
6	+5645	6	-3068
9	+5556	9	-1594
12	+4652	12	-262
Vollbelastung		Vollbelastung	
0	-2862,3	6	+2577
1	-1682	9	+3962
3	+352	12	+4390

Tabelle 3. Gesamtmomente für  $g'$  (Vollast) +  $p$ .

Punkt	Hängebrücke mit Verstiefungsrahmen		Hängebrücke mit Verstiefungsbalken	
	+ max M tm	- min M tm	+ max M tm	- min M tm
0	-1203	-4065,3	0	0
1	+354,9	-3447	0	0
3	+3892,5	-3243,5	+5111	-1775
6	+6725	-1988	+7280	-1452
9	+7225	+75	+7304,5	+102,5
12	+6497	+1583	+6211	+1248

Sowohl die Gesamtmomente wie die Größtmomente sind für beide Tragwerkarten in Bild 18 eingetragen, links für die Hängebrücke mit Verstiefungsrahmen, rechts für den Verstiefungsbalken.

3. Querkräfte.

Tabelle 4. Ordinaten der  $(H_2 - H_1 \cdot \frac{tg \beta}{tg \alpha})$ -Linie für die Querkräfte.

Punkt	Querkräfte im Punkt:			
	3	6	9	12, ( $H_1 \sin \beta$ )
0	0	0	0	0
1	0,1716	0,1705	0,1672	0,00064
2	0,3558	0,3540	0,3485	0,00109
3	0,5451	0,5428	0,5359	0,00138
4	0,7327	0,7301	0,7223	0,00156
5	0,9124	0,9097	0,9015	0,00164
6	1,0789	1,0761	1,0678	0,00166
7	1,2335	1,2308	1,2228	0,00161
8	1,3544	1,3517	1,3437	0,00160
9	1,4562	1,4537	1,4459	0,00155
10	1,5307	1,5282	1,5206	0,00151
11	1,5760	1,5735	1,5661	0,00148
12	1,5912	1,5888	1,5814	0,00147

Tabelle 5. Größte +- und -- Querkräfte.

Hängebrücke mit Verstiefungsrahmen $p = 2,38$ t/m		Hängebrücke mit Verstiefungsbalken $p = 2,38$ t/m	
Punkt	positive Querkräfte t	Punkt	negative Querkräfte
0	+169,40	0	-63,12
1	+130,20	1	-47,14
3	+98,26	3	-32,00
6	+92,38	6	-47,05
9	+104,44	9	-77,48
12	+101,36	12	-102,40

Tabelle 6. Maximale Querkräfte bei Vollbelastung.

Hängebrücke mit Verstiefungsrahmen $p = 2,38$ t/m		Hängebrücke mit Verstiefungsbalken $p = 2,38$ t/m	
Punkt	positive Querkräfte t	Punkt	negative Querkräfte
0	+106,28	6	+45,33
1	+83,06	9	+26,96
3	+66,26	12	+1,04

Tabelle 7. Größte Querkräfte für  $g' + p$ .

Punkt	Hängebrücke mit Verstiefungsrahmen			Hängebrücke mit Verstiefungsträger		
	+ max Q t	- min Q t	Vollbelastung	+ max Q t	- min Q t	Vollbelastung
0	+214,01	-18,51	+150,89	+157,02	-68,04	+68,166
1	+165,06	-12,28	+117,92	—	—	—
3	+126,10	-4,16	+94,14	+100,89	-33,69	+52,11
6	+111,38	-28,05	+64,33	+86,92	-42,47	+34,62
9	+115,69	-66,23	+38,21	+102,17	-78,33	+18,67
12	+100,89	-101,93	0	+101,85	-101,85	0

4. Normalkräfte.

Tabelle 8. Hängebrücke mit Verstiefungsrahmen.

Punkt	$p = 2,38$ t/m	Vollbelastung $g' + p$
0	-96,45	-136,95 t
3	-88,80	-126,10
6	-111,60	-158,40
9	-94,0	-133,45
12	-95,2	-135,20

Tabelle 9. Stabkräfte.

Bezeichnung	$g = 2,94$ t/m	$p' = 2,38$ t/m	$g' + p = 3,38$ tm	Vollast: $g + g' + p = 6,32$ t/m
	$H_2$ . . . . .	+1256 t	+800,24 t	+1136,5 t
Pendelpfeiler . . . . .	-918	-585,0	-831	-1749
Größte Seilkraft (0 bis 1)	+1345	+855,0	+1216	+2561
Rückhaltkette . . . . .	+1321	+842,0	+1195	+2516
Hängestangen . . . . .	+41,8	+26,68	+37,9	+79,7

5. Wärmewirkung.

a) Gleichmäßige:  $t = \pm 35^\circ C$   $\omega = 0,00012$  Momente  $M_t = -H_1^t y_1 - H_2^t y_2$   
 $EJ = 33,897360$  tm<sup>2</sup> Punkt 0 . . .  $M_t = -1278,3$  tm  
 $EJ\omega = 406,7683$  tm<sup>2</sup> 1 . . . -866,0  
 $EJ\omega t = 14236,8912$  tm<sup>2</sup> 3 . . . -160,0  
 $H_1^t = +42,611$  t 6 . . . +638  
 $H_2^t = -76,2418$  t 9 . . . +1099  
 $p_t = -0,1785$  t/m (Hängestangen) 12 . . . +1243

Die Rückhaltketten sind hierbei nur mit einer Länge von je  $s_1' = 119,62$  m eingesetzt (Bild 7) (Wärme im Verankerungsschacht konstant angenommen).

b) Ungleichmäßige Wärme des Verstiefungsträgers  $\Delta t = 10^\circ C$ :  
 $H_1^{\Delta t} = +0,7330 \Delta t$  Momente  $M_{\Delta t}$   
 $H_2^{\Delta t} = +1,8845 \Delta t$  Punkt 0 . . .  $M_{\Delta t} = -219,9$  tm  
für  $\Delta t = 10^\circ C$ . 1 . . . -323,9  
 $H_1^{\Delta t} = 7,3296$  t 3 . . . -505,4  
 $H_2^{\Delta t} = 18,8447$  t 6 . . . -711,3  
 $p_{\Delta t} = 0,044$  t/m (Hängestangen) 9 . . . -835,3  
12 . . . -879,0

Aus den ziffernmäßigen Rechnungen ergibt sich, daß bei den gegebenen Belastungen der Hängebrücke der Riegel des Versteifungsrahmens 21,4% der Gesamtnutzlast übernimmt, der Rest geht an die Kette. Bei einer einfachen versteiften Hängebrücke (einfach statisch unbestimmtes System), bei der der Versteifungsbalken das gleiche Trägheitsmoment aufweist wie der Rahmenriegel, übernimmt der Versteifungsbalken 11,8% der Nutzlasten.

sind, da der Grundquerschnitt des einfachen Versteifungsbalkens in der Nähe der Enden nicht ausgenutzt ist, so daß sich bei diesem Beispiel eine ausgesprochene Ersparnis an Material für die Rahmenbrücke trotz des großen Wärmeinflusses, besonders im Falle *b*, ergibt. Der Verlauf der *R*-Linie in diesem Fall zeigt den ziemlich günstigen Ausgleich der Größtmomente bei erhöhter Ersparnis.

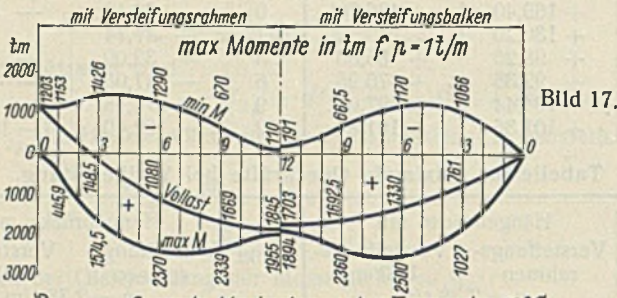


Bild 17.

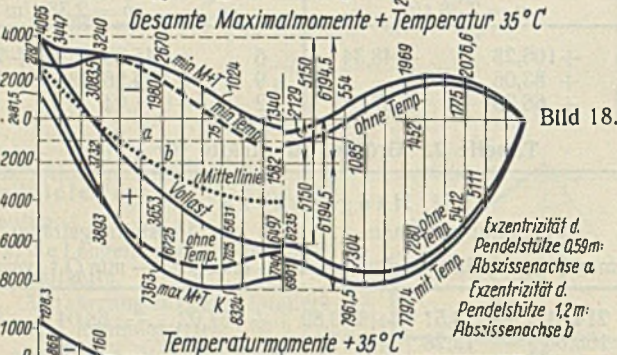


Bild 18.

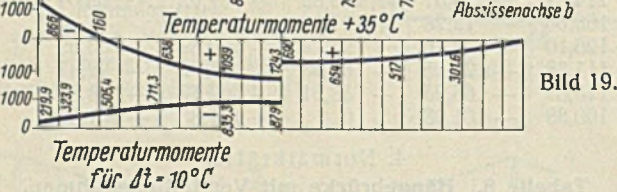


Bild 19.

Bild 17 bis 19.

Momentenwerte für die Belastung und Wärmewirkung.

In den Bildern 17 bis 21 sind auf der linken Hälfte die bezüglichen Werte für die Hängebrücke mit Zweigelenk-Versteifungsrahmen, auf der rechten Hälfte jene für die Hängebrücke mit einfachem Versteifungsbalken eingetragen, und zwar sind enthalten:

- Bild 17 die Größtmomente für  $p = 1 \text{ t/m}$  (auch die Momente für Vollast),
- 18 die gesamten Größtmomente für  $(g' + p)$  einschließlich der Wärmewirkung von  $\pm 35^\circ \text{C}$ ,
- Bild 19 die Wärmewirkung von  $35^\circ \text{C}$  und jene einer ungleichen Erwärmung der Versteifungsträger von  $\Delta t = 10^\circ \text{C}$ ,
- 20 die größten Querkräfte für  $p = 1 \text{ t/m}$ ,
- 21 die gesamten Größtquerkräfte für  $g' + p$ ,
- 22 gibt die Einflußlinie für  $Q_x$ ,
- 23 gibt die Einflußlinie für  $N_x$ ,
- 24 die größten Normalkräfte für  $p = 1 \text{ t/m}$ .

In Bild 25 ist der Ausgleich der Momente durch exzentrische Lagerung der Pendelstütze wiedergegeben. Es werden zwei Fälle untersucht:

- a) Die Rahmeneckmomente und die positiven Momente in Brückenmitte für Vollast werden gleich groß gemacht. Diese Forderung bedingt eine Verschiebung der Abszissenachse der Momentenlinie in Bild 18 nach der Geraden *a*. Dies wird durch eine Exzentrität der Pendelstütze nach außen um 0,59 m erzielt.
- b) Die Größtmomente für Eigengewicht, zufällige Last und Wärmewirkung am Rahmeneck und in der Öffnung bei *K* (Bild 18) werden absolut gleich groß gemacht, was zu einer Verschiebung der Abszissenachse der Maximalmomente nach der Geraden *b* (Bild 18) führt. Hierzu ist eine Exzentrität der Pendelstütze um 1,20 m nach außen nötig.

Zum Vergleich sind noch in Bild 25 die Maximalmomente einer einfachen Hängebrücke mit Versteifungsbalken für Eigengewicht, zufällige Last und Wärmewirkung eingetragen (Linie *B*) und außerdem die Momentenumhüllungslinien für das vorliegende neue System (*R*), und zwar auf der linken Hälfte für eine Exzentrität der Pendelstütze von 0,59 m und auf der rechten Hälfte für die Exzentrität von 1,20 m. Die schraffierten Flächen ergeben die Ersparnisse an Momenten für die Hängebrücke mit Versteifungsrahmen gegenüber der Hängebrücke mit Versteifungsbalken, die außerdem im Bild in Prozenten angegeben sind. In der Nähe der Rahmenecken ergibt sich im ersten Falle ein Mehrbedarf an Material, dessen Momentenwerte durch waagerechte Geraden gekürzt

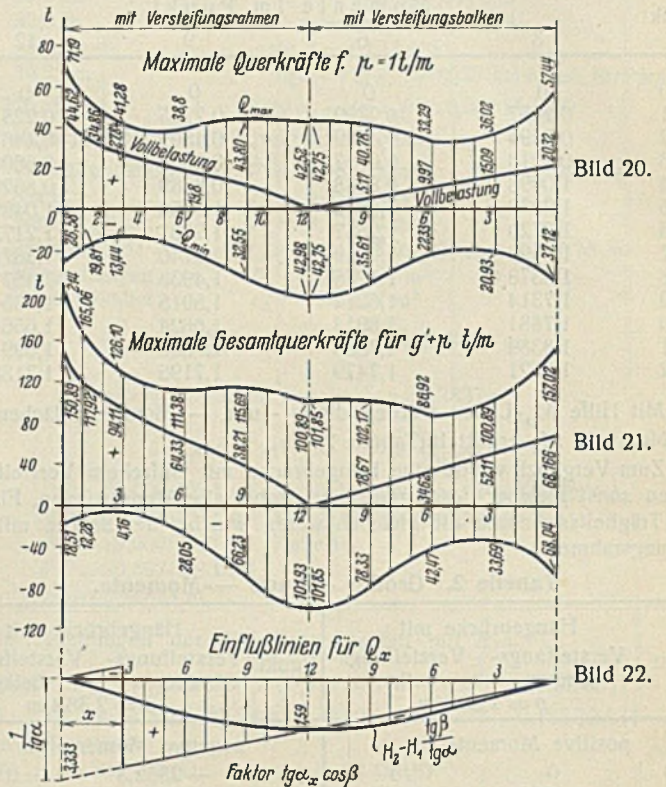


Bild 20.

Bild 21.

Bild 22.

Bild 20 bis 22.  
Maximale Querkräfte und Einflußlinie für  $Q_x$ .

Die erforderlichen Exzentritäten der Pendelstiele von 0,59 m bzw. 1,20 m sind gegenüber der oberen Breite des Rahmenstiels von 5 m tatsächlich sehr gering.

Wie aus Bild 23 zu entnehmen ist, sind die Normalkräfte des Rahmenriegels wenig schwankend und an sich klein. Sie betragen 88,6 t bis

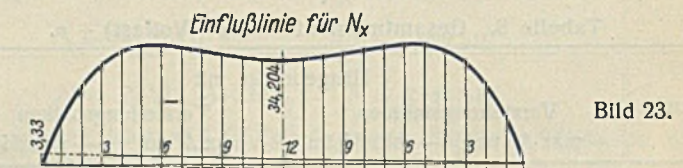


Bild 23.

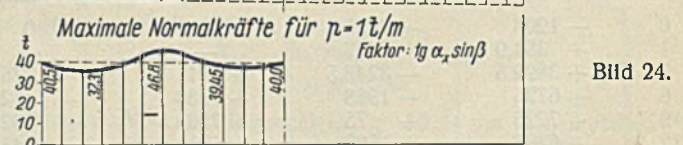


Bild 24.

Ausgleich d. Größtmomente bei exzentri. Abstütz. d. Pendelpfeiler

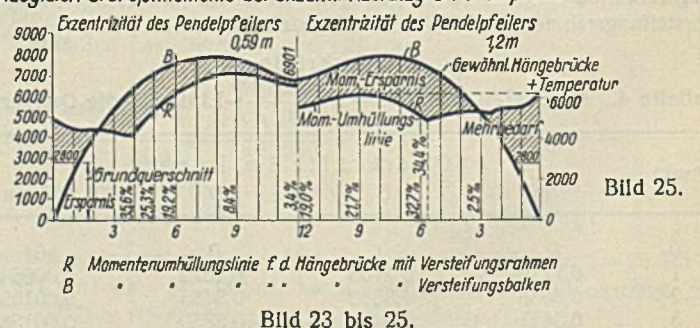


Bild 25.

111,8 t für  $p = 2,38 \text{ t/m}$  gegenüber den Maximalmomentenwerten von 6000 tm selbst bei Momentenausgleich *b* und 8324 tm ohne Momentenausgleich. Ihr Anteil an Spannungen in den Querschnitten schwankt von 54 bis 69 kg/cm<sup>2</sup>.

Bezüglich der Wärmewirkung ergibt sich im vorliegenden Beispiele folgendes:

Für eine Wärmezunahme von  $+35^{\circ}\text{C}$  ergibt sich eine Hängestangenkraft von  $p_t = -0,1785\text{ t/m}$ , das ist je Hängestange  $L_t = -14,25 \times 0,1785 = -25,4\text{ t}$ , während die Hängestangen bei der Eigengewichtswirkung allein ( $g + g'$ ) schon  $+53\text{ t}$  Zug erhalten und bei Vollast  $+79,7\text{ t}$ . Die Hängestangen können also bei der Wärmezunahme nicht schlaff werden, so daß diese Besorgnis bei großen Brücken und bei kleinen schweren Brücken wenigstens bei diesem System unbegründet ist. Erst wenn das Eigengewicht hier um mehr als die Hälfte kleiner wäre, könnten die Hängestangenkräfte Null werden. Aber die geringste dadurch eingeleitete Durchbiegung des Trägers würde diesen Zustand sofort aufheben.

Wenn also im vorliegenden Falle das Eigengewicht auf die Hälfte herabsinken müßte, damit die Hängestangen schlaff werden, so ergäbe sich ein notwendiges Verhältnis von  $p/g = 1,24$ , während dies jetzt  $0,6$  beträgt und die meisten Hängebrücken einen Wert von  $p/g$  zwischen  $0,2$  und  $0,46$  haben, der bei ganz leichten Brücken kleiner Spannweite höchstens auf  $0,8$  bei ausgeführten Objekten ansteigt. Da bei den Hänge-

brücken mit Versteifungsbalken der Fall eines völligen Schlaffwerdens der Hängestangen bei Wärmezunahme nicht eintritt, so muß, wenigstens im vorliegenden Falle für alle kleineren bis auf Null abnehmenden Höhen des Rahmenstieles das gleiche gelten, und eine größere Stielhöhe, hier  $1/10 L$ , wird praktisch nicht vorkommen.

Etwaige Bedenken beim Beginn der Montage der gelenkig gelagerten Rahmenstiele fallen fort, weil Pendelpfeiler von Hängebrücken mit sogar ganz geringen Ergänzungsstücken und Verankerungen ausgeführt worden sind (Steinman, Suspension bridges, 2. Aufl. 1929, S. 233).

Die Berechnung des Windverbandes sowie die genaue Berechnung des Tragwerkes nach der Verformungstheorie ist gleichfalls abgeschlossen und wird demnächst veröffentlicht.

Bei der ziffernmäßigen Auswertung der Formeln haben mich meine Assistenten Dr.-Ing. Schier, Ing. Haulena und Ing. Sedlaczek in dankenswerter Weise unterstützt.

Alle Rechte vorbehalten.

### Vierschiffige Lager- und Verladehalle in Stahlkonstruktion.

Die Maßnahmen der nationalsozialistischen Regierung sowohl zur Steigerung des gewerblichen Absatzes wie zur Förderung der Bautätigkeit durch geldliche Erleichterung bei Um- und Erweiterungsbauten veranlaßten die Leitung eines bedeutenden norddeutschen Industrieunternehmens, den lange gehegten Plan einer Zusammenfassung des Versandes der fertigen Erzeugnisse in Verbindung mit der Schaffung von Raum zur Zwischenlagerung zu verwirklichen.

zur Ausarbeitung von Entwürfen nebst Kostenanschlägen auf, denen die vorstehenden Abmessungen zugrunde zu legen waren. Die Firma Breest & Co. reichte zwei Entwürfe ein, und zwar einen mit durchgehendem Dach über allen vier Schiffen und mit dem Westgiebel gleichlaufenden Oberlichtern, sowie einen zweiten, bei dem jedes Schiff einen eigenen First erhält und die Laternenbauten im Grundriß quer zum Giebel liegen. Dieser in Bild 2 (rechts) dargestellte Entwurf wurde für die Ausführung gewählt. Bei annähernd gleichen Preisen sprach für ihn das gefällige Aussehen und besonders die gute architektonische Übereinstimmung mit den vorhandenen, in gleicher Flucht liegenden Hallenbauten des Werkes, bei denen sich gleichfalls jedes Schiff im Giebel abzeichnet.

Nachdem die Entscheidung zugunsten des zweiten Breestschen Entwurfes gefallen war, erfolgte die weitere Formgebung in enger Zusammenarbeit mit den von der Werkleitung beauftragten Architekten Prof. Mebes und Emmerich. Auf das Aussehen wurde bei aller Betonung der Notwendigkeit größter Wirtschaftlichkeit nicht zum wenigsten deshalb Wert gelegt, weil die Halle auch zu festlichen Versammlungen der Gefolgschaft benutzt werden soll.

Die Linienführung des Haupttragwerkes stellt sich als ein System von vier Rahmen dar, deren Stiele gleichlaufende senkrechte Gurte aufweisen, während die Riegel sich von den ausgerundeten Ecken her nach den Firstpunkten hin verjüngen. Diese Riegel bestehen aus Flachseisen, die in I-Form zusammengeschweißt sind und so die unmittelbare Fortsetzung des Steges und der Flansche der die Stützen bildenden IP 45 darstellen (Bild 3). Da mit Rücksicht auf den teilweise aufgeschütteten Baugrund ein hochgradig statisch unbestimmtes System unzweckmäßig erschien, wurden Gelenke eingeschaltet. Solche ergaben sich ohne weiteres in den First- und Fußpunkten, außerdem wurden sie in den Riegeln angeordnet, dergestalt, daß das von Süden her gerechnet zweite Schiff einen vollständigen Dreigelenkbogen erhält, an den sich zu beiden Seiten Bogensysteme anschließen, die je aus einem halben Normalbinder und einem in Gelenken endenden Riegelstück bestehen. Um die gleichmäßige Linienführung nicht zu stören, wurden die Zwischengelenke so ausgebildet, daß sie symmetrisch zu den Binderstößen liegen und diesen äußerlich nahezu gleichen.

Die schlanke Form der Bogenbinder wird auch durch die Pfetten nicht unterbrochen, da diese nicht gegen die Stegbleche stoßen, sondern als durchlaufende Träger oberhalb der Bindergurte liegen. Sie sind nur in den Firstpunkten, unterhalb der Laternenwände und zu beiden Seiten der breiten Rinnen angeordnet, um das Bild des Halleninnern so wenig wie möglich zu beeinflussen. Auf ihnen liegen in den Laternen gehörigen Dachteilen Zwischenpfetten von  $5,75\text{ m}$  Stützweite und  $3,33\text{ m}$  gegenseitigem Abstand, die die Holzsparren des aus doppelter Papplage auf Schalung bestehenden Daches aufnehmen. Im unteren Dachteile dagegen konnten die Holzsparren unmittelbar auf die in einem Abstand von nur  $2,85\text{ m}$  befindlichen Pfetten gelagert werden. Der Achsabstand der neben den Traufen angeordneten Pfetten beträgt  $0,40\text{ m}$ .

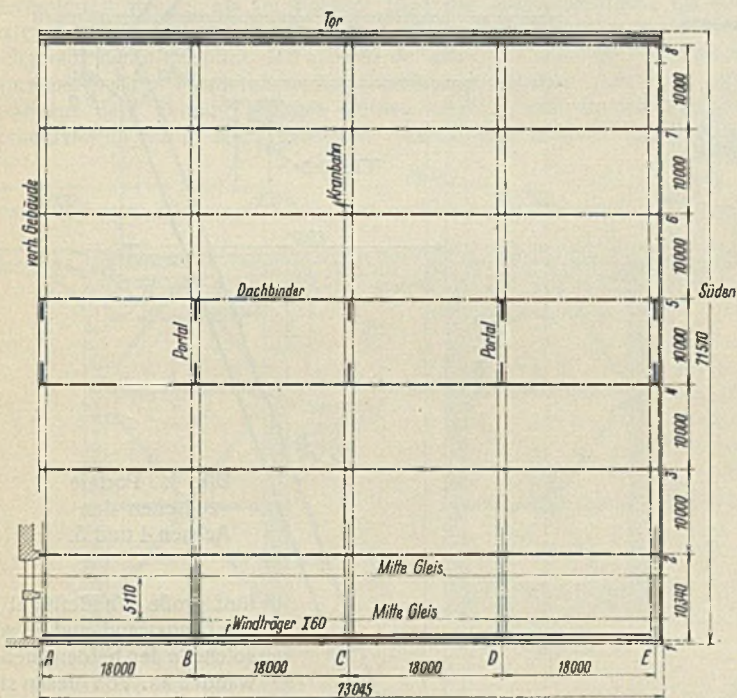
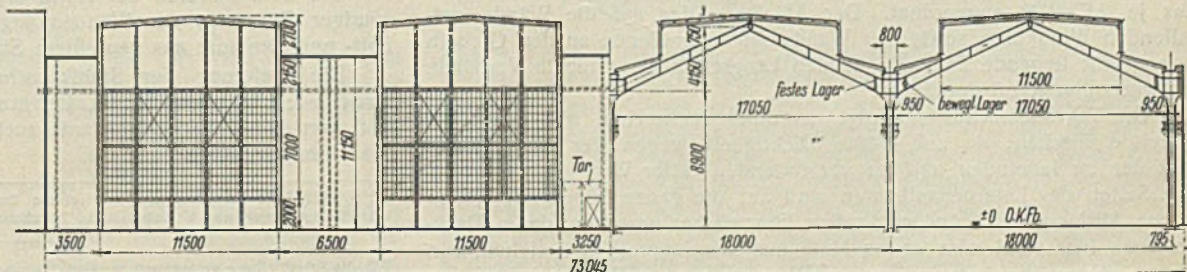


Bild 1. Grundriß der Halle.

Örtliche Verhältnisse hatten es mit sich gebracht, daß bis jetzt der Versand von Lagerräumen aus erfolgte, die in der Nähe der älteren Erzeugungsstätten des Werkes lagen und von den neuen, während des Krieges und nach diesem errichteten Hallenbauten nicht unbeträchtlich entfernt sind. Da neben diesen werkeigenes Gelände in genügender Fläche zur Verfügung stand, wurde beschlossen, den neuen Hallenraum unmittelbar neben den modernen Erzeugungsstätten des Werkes zu errichten.

Die Lager- und Verladehalle schließt daher unmittelbar an die rund  $210\text{ m}$  lange Südwand der Erzeugungshalle an, und zwar zunächst auf eine Länge von  $70\text{ m}$ . Die gemeinsame Mauer ist durch drei für den Durchlaß regelspuriger Bahnwagen bemessene Öffnungen durchbrochen. Die neue Halle (Bild 1) stellt ein Rechteck von  $70 \times 72\text{ m}$  dar, dessen Breite in vier Schiffe von je  $18\text{ m}$  Stützweite unterteilt ist. Jedes Schiff erhält einen elektrisch betriebenen Laufkran von  $5\text{ t}$  Tragfähigkeit.

Die Werkleitung forderte mehrere namhafte Stahlbauanstalten



Giebelwand

Bild 2.

Querschnitt

Man war sich klar darüber, daß gegenüber dem Vorschlag eines über je zwei Schiffen durchgehenden Gefälles die gewählte Dachform besondere Beachtung der Gefahr der Bildung von Schneeflächen und Undichtigkeiten erforderte. Ihr wurde durch folgende Maßnahmen begegnet:

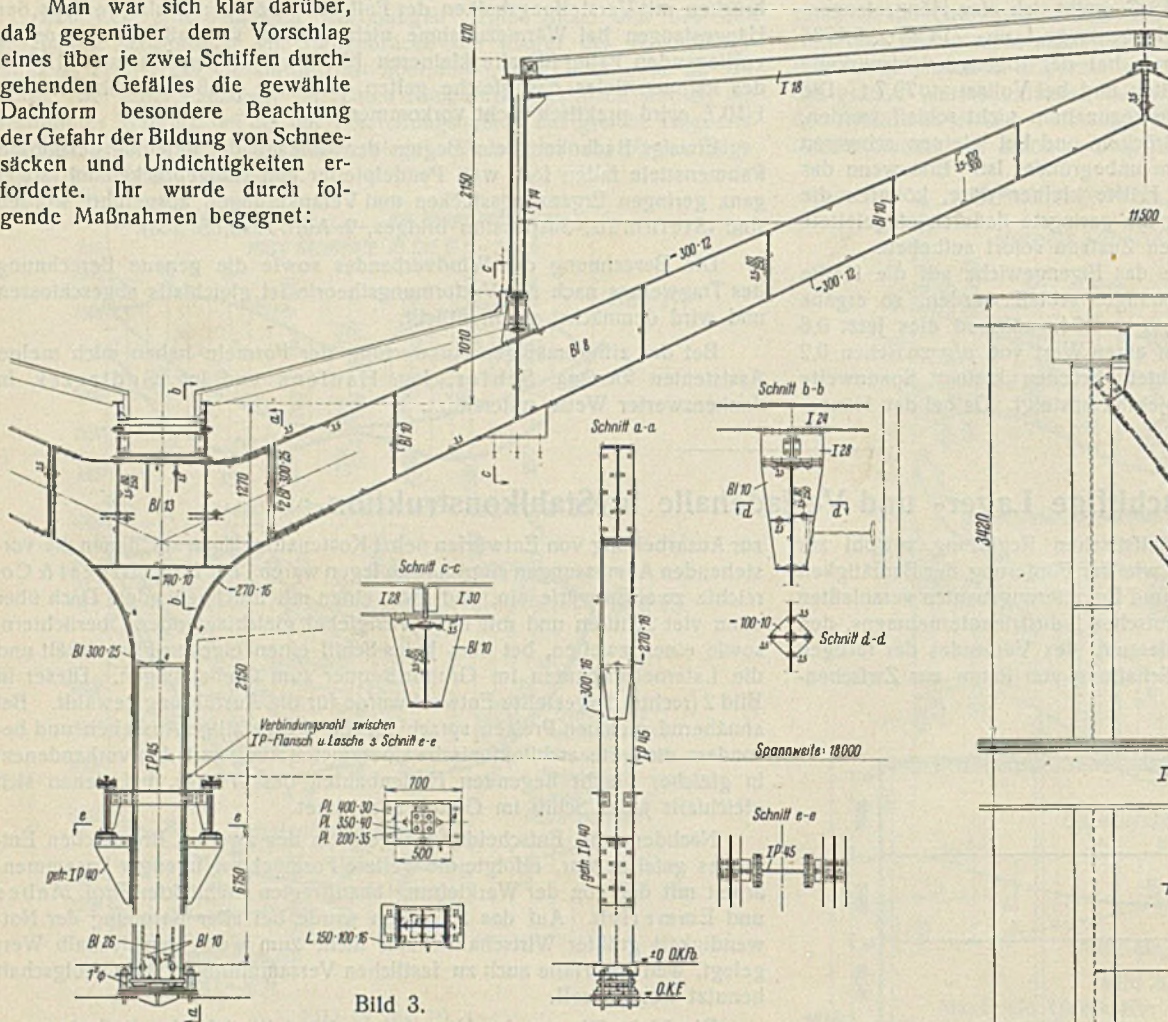


Bild 3.

1. besonders breite Rinnen;
2. Holzunterlagen unterhalb der Rinnen auf den Unterflanschen der Traufpfetten, um die Rinnen zwecks Reinigung begebar zu machen und sie gegen Verbiegungen und damit Gefällveränderungen zu schützen;
3. Anordnung von drei Abfallrohren großen Durchmessers in jeder Traufenachse, so daß der Abstand vom höchsten Punkt zur Abflußstelle nirgends mehr als 20 m beträgt.

Die drei neu zu schaffenden Umfassungswände bestehen aus Ziegelmauerwerk zwischen Stahlfachwerk. Sie sind frei vor die tragende Konstruktion gestellt, so daß an der Ost- und Südseite spätere Erweiterungen durch Fortnahme der Wände und Anbau neuer Binderfelder ohne Schwierigkeit möglich sind; die Wände können wieder verwendet werden.

Die Westwand, die den repräsentativen Giebel an einer Seite bildet, die für Erweiterungen nicht in Frage kommt, ist architektonisch reicher, wenn auch mit einfachsten Mitteln ausgebildet (Bild 2 links). Die zwischen den Laternen befindlichen 6,50 m breiten Teile sind im Gegensatz zu allen anderen, nur 1/2 Stein starken Wandgefachen 25 cm stark ausgemauert, und zwar so, daß das Stahlfachwerk nur an den Rändern sichtbar wird. Ferner ist die Oberkante dieses Wandteils über die eigentliche Dachumrißlinie emporgezogen, so daß eine risalitartige Betonung der Haupttragachsen geschaffen ist.

Während waagerechte Kräfte auf die Hallenlangseite, wie Wind und Abbremsen der Krankatzen sowie Schrägzug der Lasten durch die Rahmenform der Binder aufgenommen und abgeleitet werden, waren in der Ostwestrichtung Verbände zu schaffen. Diese bestehen aus Portalen zwischen den Achsen 4 und 5 (Bild 4). Als Stiele dienen diejenigen der Binderrahmen, als Riegel die Kranbahnträger, außerdem sind Schrägen aus je 2 C P 20 angeordnet. Der Ableitung der auf die Wände entfallenden Windkräfte sowie der Wandaussteifung dienen an den Giebeln waagerecht liegende I NP 60, an den Langseiten waagerechte Verbände zwischen den Kranbahnträgern.

Die Tagesbeleuchtung erfolgt nur durch senkrechte, nirgends durch geneigte Flächen, da auf größte Dichtigkeit wegen der Empfindlichkeit der zu lagernden und zu versendenden Güter Wert gelegt wurde. Die Seiten der Laternenaufbauten sind auf die ganze Länge mit 1,80 m hohen kittlosen Lichtbändern System Eberspächer versehen, deren Deckplatten hier wohl zum ersten Male aus Messingprofilen bestehen, von denen man sich einen größeren Widerstand gegen Witterungseinflüsse verspricht.

Neben den rd. 1040 m<sup>2</sup> Lichtbandflächen sind noch etwa 800 m<sup>2</sup> Stahlfenster vorhanden, so daß das Verhältnis der verglasten zur Grundfläche etwa 37 % ausmacht, also sehr reichlich bemessen ist.

Bei der Wahl der Lüftungseinrichtungen war die Forderung zu beachten, daß mit Rücksicht auf die Empfindlichkeit der Erzeugnisse gegen Regen die Möglichkeit schnellsten Schließens aller Öffnungen gegeben sein mußte. Daher verzichtete man ganz auf Klappen in den Laternenlichtbändern, ordnete dafür aber

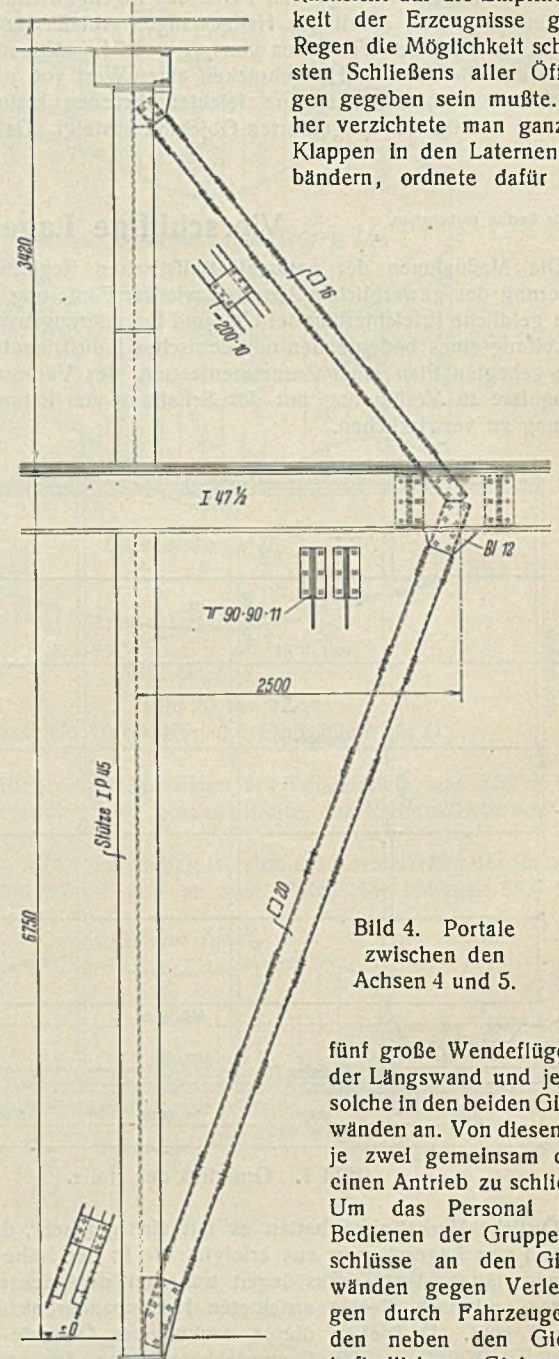


Bild 4. Portale zwischen den Achsen 4 und 5.

fünf große Wendeflügel in der Längswand und je acht solche in den beiden Giebelwänden an. Von diesen sind je zwei gemeinsam durch einen Antrieb zu schließen. Um das Personal beim Bedienen der Gruppenverschlüsse an den Giebelwänden gegen Verletzungen durch Fahrzeuge auf den neben den Giebeln befindlichen Gleisen zu

schützen, ist neben jedem Gruppenverschluß ein Geländer angebracht, dessen Ausgang parallel zum Giebel liegt, dergestalt, daß der Bedienungsmann immer nur in Richtung des Gleises, nie aber quer zu diesem nach vorgemommener Bedienung zurückgehen kann.

Die zum Betreten der Halle und zum Durchlaß regel- und schmalspuriger Gleise in den Wänden angeordneten Öffnungen werden durch Fall- und Drehtore aus gepreßtem Stahlblech verschlossen.

Die Lieferung der Stahlkonstruktion erfolgte durch die Firmen Breest & Co. sowie Hein, Lehmann & Co., beide in Berlin-Tempelhof, von denen die erstgenannte auch die Aufstellung des Entwurfs und die Gesamtmontage bewirkte.

H. D. K.

INHALT: Hängebrücken mit einem Zweigelenrahmen-Versteifungsträger. (Schluß). — Vierschiffige Lager- und Verladehalle in Stahlkonstruktion.

Für die Schriftleitung verantwortlich: Geh. Regierungsrat Prof. A. Hertwig, Berlin-Charlottenburg. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin W 8. Druck der Buchdruckerei Gebrüder Ernst, Berlin SW 68.