

DER BAUINGENIEUR

23. Jahrgang

5. November 1942

Heft 45/46

DIE QUERVERTEILUNG DER LASTEN BEI BRÜCKEN MIT ZWEI HAUPTTRÄGERN.

Von Regierungsbaurat Dr.-Ing. Ernst Gruber, Hannover.

DK 624.21 : 042.3

Übersicht: Die Theorie der Faltwerke wird auf die Berechnung der Querverteilung der Lasten bei Brücken mit zwei Hauptträgern angewendet. Lösungen zum Teil in gebrauchsfertigen geschlossenen Formeln, zum Teil in Form von rasch konvergierenden Fourierschen Reihen. Die Untersuchungen erstrecken sich auf unsymmetrische und symmetrische, gelenkige und steifknotige Tragwerke sowie auf Systeme mit und ohne steife Querrahmen. Die wichtigste Erkenntnis ist, daß die lastverteilende Wirkung im wesentlichen durch die Seitensteifigkeit der Untergurte bedingt ist. Bei einem geschlossenen rechteckigen Röhrenquerschnitt würde die lastverteilende Wirkung sprunghaft zunehmen. Im Abschnitt G ist eine Übersicht über die Zusammenhänge der lastverteilenden Wirkungen gegeben.

A. Allgemeines.

Bei dem in Abb. 1 dargestellten Brückenquerschnitt wird die Verteilung der Lasten auf die beiden Hauptträger meist auf statisch bestimmte Weise vorgenommen. Durch den steifen Anschluß der Fahrbahnplatte an die beiden lotrechten Tragwände entsteht jedoch in den zur Brückenlängsachse senkrecht stehenden Querschnittsebenen eine rahmenartige Wirkung, welche eine statisch unbestimmte Querverteilung zur Folge hat, das heißt, eine Last G (Abb. 1), welche unmittelbar über einer Tragwand sitzt, wird nicht

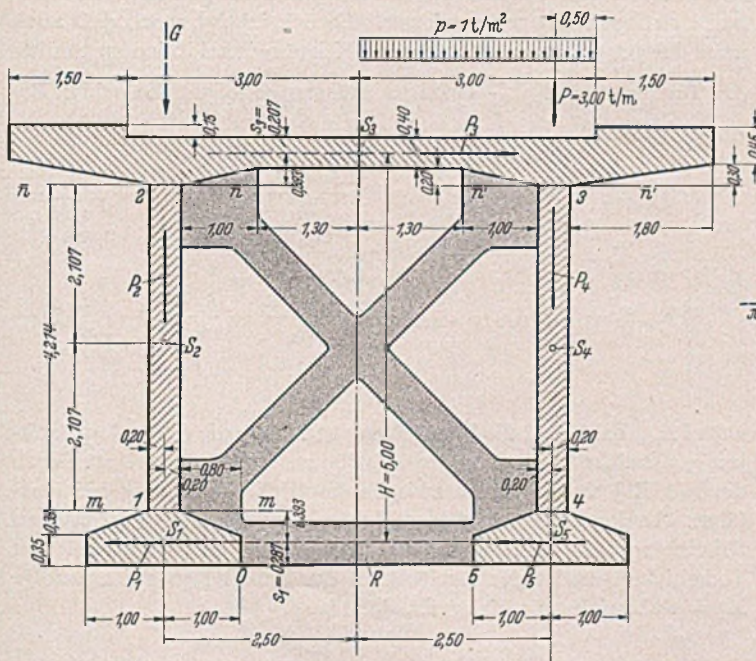


Abb. 1.

nur von dieser, sondern auch von der anderen Tragwand mitgetragen. Durch den Einbau von steifen Querscheiben wird diese Wirkung noch verstärkt. Allerdings übernimmt in beiden Fällen die erstere der beiden Tragwände den weitaus größeren Lastanteil.

B. Das unsymmetrische Tragwerk.

Für die nachstehenden Untersuchungen, welche die Berechnung dieser Tragwerke zum Ziele haben, wird das System als 5-teiliges Faltwerk aufgefaßt, wobei wie gewöhnlich der Einfluß des Torsionswiderstandes der einzelnen dünnwandigen Scheiben vernachlässigt werden kann. Wir nehmen zunächst längs der Kan-

ten 1 bis 4 scharnierartige Verbindungen an, so daß von einer Scheibe auf die andere nur in diesen Kanten wirkende Schubspannungen τ übertragen werden können. Die zwischen den Kanten angreifenden äußeren Kräfte werden auf drei Scheiben, und zwar auf die von der Last unmittelbar ergriffene und auf die beiden dieser letzteren anliegenden Scheiben auf statisch bestimmte Weise aufgeteilt. So zerlegt sich zum Beispiel die Last P (Abb. 2) in die in den drei Scheiben 1, 2, 3 und 4 wirkenden Lasten p_1 , p_2 , p_3 und p_4 . Nachdem aber die Scheiben längs der Kanten 1 bis 4 miteinander nicht scharnierartig, sondern steif verbunden sind, treten in den Ecken stetig verteilte Biegemomente X_n auf, von denen infolge der Vernachlässigung des Torsionswiderstandes der einzelnen Scheiben X_1 und X_4 gleich Null werden. Läßt man die beiden übrigbleibenden Momente X_2 und X_3 an dem mit Scharniergelenken versehenen Faltwerk im Sinne der Abb. 2 als äußere Kräfte angreifen und bestimmt im obigen Sinne auf statisch bestimmtem Wege die entsprechenden Reaktionen, so ergeben sich die folgenden zu den bereits vorhandenen Belastungen p_n hinzuzufügenden stetig verteilten Kostenlasten

$$(1) \quad \begin{cases} \pi_1 = -\frac{X_2}{h_1}; & \pi_2 = \frac{X_2 - X_3}{l}; & \pi_3 = -\frac{X_2}{h_1} + \frac{X_3}{h_2}; \\ \pi_4 = \frac{X_2 - X_3}{l}; & \pi_5 = \frac{X_3}{h_2}. \end{cases}$$

Trennt man durch zwei um dx voneinander entfernte, zur Brückenlängsachse senkrecht stehende Querschnitte von dem

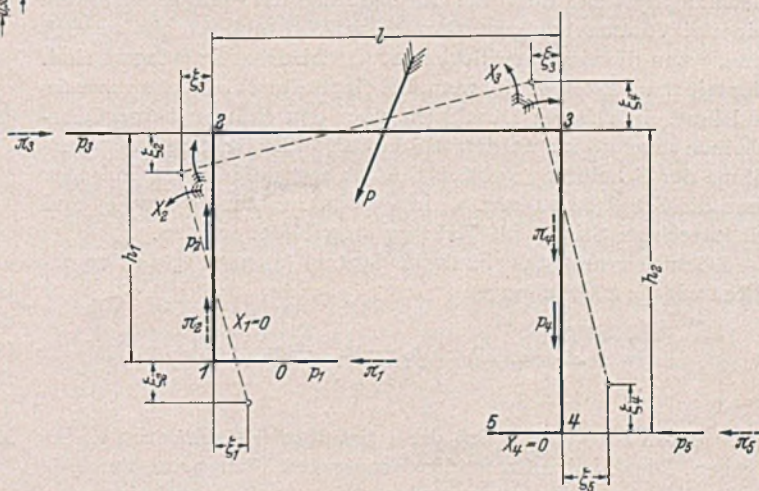


Abb. 2.

Tragwerk ein Segment ab, zerlegt dieses abermals durch längs der Kanten 1 bis 4 geführte Schnitte, so entstehen 5 Fragmente, an welchen sich die inneren Kräfte M , N , Q und τ mit den stetig verteilten äußeren Lasten m , n und p das Gleichgewicht halten müssen. In Abb. 3 sind die mit den wirkenden Kräften versehenen Elemente in eine Ebene geklappt zur Darstellung gebracht. Die diesbezüglichen Gleichgewichtsbedingungen lauten:

$$\begin{aligned} (2a) \quad M'_n &= -\tau_n \cdot h_{n,n} - \tau_{n-1} \cdot h_{n,n-1} + Q_n - m_n \\ (2b) \quad N'_n &= \tau_{n-1} - \tau_n - n_n \\ (2c) \quad Q'_n &= p_n + \pi_n \quad n = 1, 2, 3, 4, 5. \end{aligned}$$

Da zur Aufrechterhaltung der Kontinuität die bezogenen Deh-

nungen längs der Kanten n punktwise übereinstimmen müssen, ergibt sich

$$(3) \begin{cases} M_n \cdot h_{n,n} + M_{n+1} \cdot t_{n,n+1} \cdot e_{n,n+1} \cdot h_{n+1,n} + N_n \cdot i_n^2 - \\ - N_{n+1} \cdot t_{n,n+1} \cdot i_{n+1}^2 = 0, \end{cases}$$

wobei

$$t_{n,n+1} = \frac{O_n}{O_{n+1}} \quad \text{und} \quad e_{n,n+1} = \frac{E_n}{E_{n+1}}$$

$n = 1, 2, 3, 4$ (siehe Abb. 4)

bedeutet.

Differenziert man Gl. (3) nach x, setzt darin die Gl. (2) ein, differenziert diesen Ausdruck nochmals nach x und benutzt Gl. (2 c), so erhalten wir die simultanen Differentialgleichungen

$$(4) \begin{cases} \tau'_{n-1} (h_{n,n-1} \cdot h_{n,n} - i_n^2) + \tau'_n [h_{n,n}^2 + i_n^2 + \\ + e_{n,n+1} \cdot t_{n,n+1} (h_{n+1,n}^2 + i_{n+1}^2)] + \\ + \tau'_{n+1} \cdot e_{n,n+1} \cdot t_{n,n+1} (h_{n+1,n} \cdot h_{n+1,n+1} - i_{n+1}^2) = \\ = (p_n + \pi_n - m'_n) h_{n,n} + (p_{n+1} + \pi_{n+1} - \\ - m'_{n+1}) h_{n+1,n} \cdot e_{n,n+1} \cdot t_{n,n+1} - n'_n \cdot i_n^2 + \\ + n'_{n+1} \cdot e_{n,n+1} \cdot t_{n,n+1} \cdot i_{n+1}^2. \quad n = 1, 2, 3, 4. \end{cases}$$

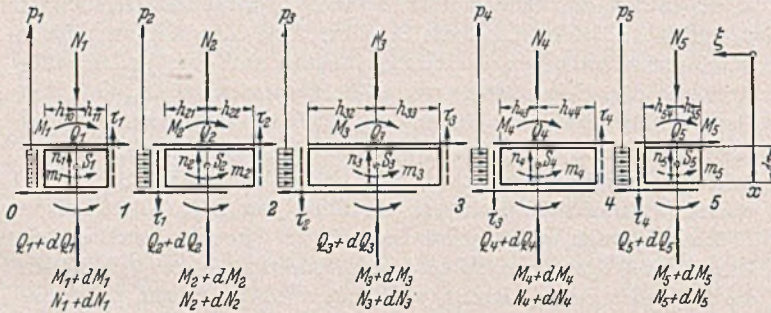


Abb. 3.

Da die Ränder 0 und 5 der Scheiben 01 und 45 kraftfrei sind, ist in den Gl. (2) und (4) $\tau_0 = \tau_5 = 0$ zu setzen. Es ergeben sich also für die vier unbekannt Funktionen $\tau_n(x)$ auch vier Gleichungen, von welchen die erste und die vierte 2gliedrig und die zweite und die dritte je 3gliedrig sind. Da bei der Herleitung dieses Gleichungssystems über die Auflagerung der Tragkonstruktion keinerlei Voraussetzungen getroffen werden mußten, gilt es auch dann, wenn die einzelnen Scheiben verschiedenartig gelagert sind. Dies tritt zum Beispiel ein, wenn bei einem Durchlaufträger zwecks Erzielung einer freien Durchsicht über den Stützen keine Querscheiben angeordnet werden, so daß also alle Scheiben mit Ausnahme der Scheibe 23 auf den Stützen fest aufgelagert sind oder wenn die Scheiben 12 bzw. 34 in Verbindung mit 01 bzw. 45 und mit lotrechten Stielen als Rahmen ausgebildet werden.

Lösen wir nun das simultane System (4) nach τ'_n auf, so erhalten wir die 4 Gleichungen

$$(5) \begin{cases} \tau'_n = \sum_{r=1}^{r=5} [a_{n,r} (p_r + \pi_r - m'_r) + \alpha_{n,r} \cdot n'_r] \\ n = 1, 2, 3, 4, \end{cases}$$

durch deren Integration sich die 4 simultanen Funktionen $\tau_n(x)$ ergeben. Die dabei auftretenden Konstanten können aus den Auflagerbedingungen bestimmt werden.

Setzt man die π_n der Gl. (1) in die Lösungen (5) ein, so ergibt sich

$$(6) \begin{cases} \tau'_n = + (X_2 - X_3) \frac{1}{h_1} (a_{n,2} + a_{n,4}) - \frac{X_2}{h_1} (a_{n,1} + a_{n,3}) + \\ + \frac{X_3}{h_2} (a_{n,3} + a_{n,5}) + \\ + \sum_{r=1}^{r=5} [a_{n,r} (p_r - m'_r) + \alpha_{n,r} \cdot n'_r]. \quad n = 1, 2, 3, 4. \end{cases}$$

Schneidet man das Tragwerk längs der Kanten n auf, so wird jede der losgelösten Scheiben unter dem Einfluß der Wirkungen p_n, m_n, n_n, π_n und τ_n in ihrer Ebene Verformungen erfahren, nach deren Beendigung das Faltnetz längs der Kanten n klappt. Be-

wegt man die Ränder der im obigen Sinne verformten Scheiben senkrecht zu deren Ebenen solange, bis sie sich wieder längs der Kanten n treffen, so ist der ursprünglich vorhandene Zusammenhang wieder hergestellt. Da, wie schon eingangs erwähnt, der Torsionswiderstand der einzelnen Scheiben als äußerst geringfügig unterdrückt wird, werden durch dieses Zurückbiegen der Scheibenränder keine neuen Kraftwirkungen zusätzlich ausgelöst. Die Durchbiegungen ξ_n der losgelösten Scheiben gehorchen dabei den Differentialgleichungen

$$(7) \begin{cases} E_n O_n \xi_n^{IV} = \tau'_{n-1} \cdot h_{n,n-1} + \tau'_n \cdot h_{n,n} - p_n - \pi_n + m'_n \\ n = 1, 2, 3, 4, 5. \end{cases}$$

Setzt man in diese die Gl. (6) ein, so erhalten wir diese Durchbiegungen als Funktionen der Momente X_2 und X_3 und der äußeren Lasten p_n, m_n und n_n . Es ist also

$$(8) \begin{cases} E_n O_n \xi_n^{IV} = \\ = \frac{X_2 - X_3}{1} [(a_{n-1,2} + a_{n-1,4}) h_{n,n-1} + (a_{n,2} + a_{n,4}) h_{n,n}] - \\ - \frac{X_2}{h_1} [(a_{n-1,1} + a_{n-1,3}) h_{n,n-1} + (a_{n,1} + a_{n,3}) h_{n,n}] + \\ + \frac{X_3}{h_2} [(a_{n-1,3} + a_{n-1,5}) h_{n,n-1} + (a_{n,3} + a_{n,5}) h_{n,n}] - \pi_n + \\ + h_{n,n-1} \sum_{r=1}^{r=5} [a_{n-1,r} (p_r - m'_r) + \alpha_{n-1,r} n'_r] + \\ + h_{n,n} \sum_{r=1}^{r=5} [a_{n,r} (p_r - m'_r) + \alpha_{n,r} n'_r] - p_n + m'_n \\ n = 1, 2, 3, 4, 5. \end{cases}$$

wobei $a_{0,r} = a_{5,r} = \alpha_{0,r} = \alpha_{5,r} = 0$ zu setzen ist, da $\tau_0 = \tau_5 = 0$ sein soll.

Infolge der Momente X_2 und X_3 und der zwischen den Knoten sitzenden Lasten werden die einzelnen Scheiben auch noch senkrecht zu ihren Ebenen verformt. Berücksichtigt man, daß auch nach der gesamten Verformung die Knotenwinkel in jedem Punkte der Kanten 2 und 3 $\frac{\pi}{2}$ betragen müssen, so folgen die beiden Bedingungen

$$(9) \begin{cases} X_2 (\Delta_{21} + \Delta_{23}) + X_3 \Delta_0 = - \frac{\xi_1 + \xi_3}{h_1} + \frac{\xi_2 + \xi_4}{1} - \frac{\Omega_{21}}{E_2 J_2} - \\ - \frac{\Omega_{23}}{E_3 J_3} \\ X_2 \Delta_0 + X_3 (\Delta_{34} + \Delta_{32}) = + \frac{\xi_5 + \xi_3}{h_2} - \frac{\xi_2 + \xi_4}{1} - \frac{\Omega_{34}}{E_4 J_4} - \\ - \frac{\Omega_{32}}{E_3 J_3}, \end{cases}$$

wobei $\Delta_{r,\mu}$ bzw. $\Omega_{r,\mu}$ die Verdrehung bedeutet, die die in den Punkten r, μ balkenartig gelagerte Scheibe zufolge $X_r = 1$ bzw. durch die mit EJ vervielfachte zwischenknotliche Belastung bei r erfährt. Analog bedeutet Δ_0 den Drehwinkel der ebenso gelagerten Scheibe 23 bei 3 zufolge $X_2 = 1$. Infolge der Gegenseitigkeit der Verschiebungen ist der Drehwinkel der Scheibe 32 bei 2 zufolge $X_3 = 1$ ebenfalls Δ_0 . Es ergibt sich also

$$(10) \begin{cases} \Delta_{21} = \frac{h_1}{3 E_2 J_2} \beta_{21}; \Delta_{23} = \frac{1}{3 E_3 J_3} \beta_{23}; \Delta_0 = \frac{1}{6 E_3 J_3} \beta_0; \\ \Delta_{34} = \frac{h_2}{3 E_4 J_4} \beta_{34}; \Delta_{32} = \frac{1}{3 E_3 J_3} \beta_{32}. \end{cases}$$

wobei J_2, J_4 und J_3 die Vergleichsträgheitsmomente der Scheiben um deren Längsachsen je Längeneinheit der Kanten bedeuten. Die $\beta_{r,\mu}$ sind diejenigen Zahlen, mit welchen man den zum Balken mit konstantem J gehörigen Drehwinkel multiplizieren muß, um den Drehwinkel für veränderliches J zu erhalten. Man kann diese Zahlen für verschiedene Trägerformen zum Beispiel aus Strasser: Neuere Methoden entnehmen. Setzt man Gl. (10) in Gl. (9) ein, so erhalten wir nach Multiplikation mit $\frac{6 E_3 J_3}{1}$ und nach 4-maliger Differentiation nach x

$$(11) \begin{cases} 2 X_2^{IV} \left(\frac{h_1}{1} e_{32}^0 t_{32} \beta_{21} + \beta_{23} \right) + X_3^{IV} \beta_0 = - \frac{6 E_3 J_3}{1} \left(\frac{\xi_1^{IV} + \xi_2^{IV}}{h_1} - \frac{\xi_3^{IV} + \xi_4^{IV}}{1} \right) - \frac{6}{1} (e_{32}^0 t_{32} \Omega_{21}^{IV} + \Omega_{23}^{IV}) \\ X_2^{IV} \beta_0 + 2 X_3^{IV} \left(\frac{h_2}{1} e_{34}^0 t_{34} \beta_{34} + \beta_{32} \right) = \frac{6 E_3 J_3}{1} \left(\frac{\xi_3^{IV} + \xi_4^{IV}}{h_2} - \frac{\xi_1^{IV} + \xi_2^{IV}}{1} \right) - \frac{6}{1} (e_{34}^0 t_{34} \Omega_{34}^{IV} + \Omega_{32}^{IV}) \end{cases}$$

Hierbei bedeutet

$$e_{n,n+1} = \frac{E_n}{E_{n+1}}; t_{n,n+1} = \frac{J_n}{J_{n+1}}$$

Eliminiert man aus Gl. (8) und Gl. (11) die ξ_n^{IV} , so ergeben sich zwei simultane lineare Differentialgleichungen vierter Ordnung, die für die Bestimmung von X_2 und X_3 hinreichen. Es ist

$$(12) \begin{cases} b_1 X_2^{IV} + \beta_0 X_3^{IV} + c_1 X_2 + c_0 X_3 = \sum_{r=1}^{r=5} [d_{1,r} (p_r - m'_r) + \gamma_{1,r} n'_r] - \frac{6}{1} (e_{32}^0 t_{32} \Omega_{21}^{IV} + \Omega_{23}^{IV}) \\ b_0 X_2^{IV} + b_2 X_3^{IV} + c_0 X_2 + c_2 X_3 = \sum_{r=1}^{r=5} [d_{2,r} (p_r - m'_r) + \gamma_{2,r} n'_r] - \frac{6}{1} (e_{34}^0 t_{34} \Omega_{34}^{IV} + \Omega_{32}^{IV}) \end{cases}$$

Die normale Integration dieses Systems würde zu sehr umfangreichen Zahlenrechnungen führen. Die charakteristische Gleichung ist vom achten Grade, und den acht Integrationskonstanten stehen acht verwickelte Randbedingungen gegenüber. Wir gelangen hingegen viel rascher zum Ziele, wenn wir die rechten Seiten der Gleichungen in Fouriersche Reihen entwickeln. Es ergibt sich zunächst

$$(13a) \begin{cases} p_r = \frac{2}{L} \sum_1^\infty k \sin \frac{k\pi}{L} x \cdot \int_0^L p_r(\xi) \sin \frac{k\pi}{L} \xi d\xi \\ n_r = N_r + \frac{2}{L} \sum_1^\infty k \cos \frac{k\pi}{L} x \cdot \int_0^L n_r(\xi) \cos \frac{k\pi}{L} \xi d\xi \\ N_r = \frac{1}{L} \int_0^L n_r(\xi) d\xi \\ m_r = M_r + \frac{2}{L} \sum_1^\infty k \cos \frac{k\pi}{L} x \cdot \int_0^L m_r(\xi) \cos \frac{k\pi}{L} \xi d\xi \\ M_r = \frac{1}{L} \int_0^L m_r(\xi) d\xi \\ \Omega = \frac{2}{L} \sum_1^\infty k \sin \frac{k\pi}{L} x \cdot \int_0^L \omega(\xi) \sin \frac{k\pi}{L} \xi d\xi \end{cases}$$

Daraus folgt durch Differentiation nach x

$$(13b) \begin{cases} n'_r = - \frac{2}{L} \sum_1^\infty k \frac{k\pi}{L} \sin \frac{k\pi}{L} x \cdot \int_0^L n_r(\xi) \cos \frac{k\pi}{L} \xi d\xi \\ m'_r = - \frac{2}{L} \sum_1^\infty k \frac{k\pi}{L} \sin \frac{k\pi}{L} x \cdot \int_0^L m_r(\xi) \cos \frac{k\pi}{L} \xi d\xi \\ \Omega^{IV} = \frac{2}{L} \sum_1^\infty k \left(\frac{k\pi}{L} \right)^4 \sin \frac{k\pi}{L} x \cdot \int_0^L \omega(\xi) \cos \frac{k\pi}{L} \xi d\xi \end{cases}$$

Aus der ersten der Gl. (13a) folgt durch Grenzübergang die Entwicklung für eine Einzellast im Abstand a vom Endpunkt $x = 0$ zu

$$(13c) \quad P = \frac{2P}{L} \sum_1^\infty k \sin \frac{k\pi a}{L} \sin \frac{k\pi x}{L}$$

In diesen Entwicklungen bedeutet L die Stützweite des Systems. Führt man diese Werte in die Gl. (12) ein, so ergeben sich

die rechten Seiten derselben in der Form

$$(14) \quad \sum_1^\infty k S_{1,k} \sin \frac{k\pi}{L} x; \quad \sum_1^\infty k S_{2,k} \sin \frac{k\pi}{L} x$$

Wählt man für die Unbekannten X_2 und X_3 die Ansätze

$$(15) \quad X_2 = \sum_1^\infty k A_{2,k} \sin \frac{k\pi}{L} x; \quad X_3 = \sum_1^\infty k A_{3,k} \sin \frac{k\pi}{L} x$$

und substituiert diese in Gl. (12), so ergibt sich

$$(16) \begin{cases} \sum_1^\infty k \left\{ A_{2,k} \left[\left(\frac{k\pi}{L} \right)^4 \cdot b_1 + c_1 \right] + A_{3,k} \left[\left(\frac{k\pi}{L} \right)^4 \cdot \beta_0 + c_0 \right] - S_{1,k} \right\} \sin \frac{k\pi}{L} x \equiv 0 \\ \sum_1^\infty k \left\{ A_{2,k} \left[\left(\frac{k\pi}{L} \right)^4 \cdot \beta_0 + c_0 \right] + A_{3,k} \left[\left(\frac{k\pi}{L} \right)^4 \cdot b_2 + c_2 \right] - S_{2,k} \right\} \sin \frac{k\pi}{L} x \equiv 0 \end{cases}$$

Diese Identitäten können nur dann für jedes x bestehen, wenn jedes Glied der obigen Reihen Null wird. Wir erhalten also für jeden Index k ein lineares Gleichungspaar für $A_{2,k}$ und $A_{3,k}$, durch dessen Auflösung man die Koeffizienten der Ansätze (15) der Reihe nach ermittelt. Da die Konvergenz fast immer eine sehr gute ist, genügt meistens die Berechnung von drei Gliedern der Entwicklungen (15).

Für das Balkenwerk lauten die Randbedingungen

$$(17a) \quad X_2 = X_3 = 0 \text{ für } x = 0; x = L \\ (17b) \quad \xi_r = 0 \text{ für } x = 0; x = L \\ (17c) \quad M_r = 0 \text{ für } x = 0; x = L \\ (17d) \quad N_r = 0 \text{ für } x = 0; x = L$$

$$r = 1, 2, 3, 4, 5,$$

von denen (17a) infolge Gl. (15) sofort erfüllt ist. Nach Gl. (6) ergeben sich die τ' als sin-Reihen. Integriert man Gl. (7) zweimal nach x, so erhalten wir die M_r als sin-Reihen. Die dabei auftretenden Konstanten werden gleich Null, da für $x = 0$ und $x = L$ $\sin \frac{k\pi}{L} x = 0$ ist. Integriert man die M_r nochmals zweimal nach x, so ergeben sich endlich die ξ_n ebenfalls als sin-Reihen, wobei die dabei auftretenden Konstanten aus denselben Gründen wie oben gleich Null werden. Differenziert man hingegen Gl. (2b) einmal nach x, so ergeben sich die N_r'' ebenfalls als sin-Reihen. Integriert man diese N_r'' zweimal nach x, so erhalten wir die N_r selbst wieder als sin-Reihen, wobei die dabei auftretenden Konstanten so wie oben verschwinden. ξ , M und N sind also reine sin-Reihen, so daß auch die Gl. (17b), (17c) und (17d) erfüllt sind. Der Ansatz (15) entspricht somit sämtlichen Randbedingungen (17). Er stellt also das vollständige Integral der Differentialgleichungen (12) dar.

C. Das symmetrische Tragwerk.

Für dieses wird

$$(18) \begin{cases} \Theta_2 = \Theta_4 = \Theta; \Theta_1 = \Theta_5 = \bar{\Theta}; \\ h_{21} = h_{22} = h_{43} = h_{44} = \frac{H}{2}; h_1 = h_2 = H; \\ J_2 = J_4 = J; h_{11} = h_{54} = h; \\ e_{12} = e_{45} = \bar{e}; e_{22} = e_{34} = e; t_{32} = t_{34} = t; h_{12} = h_{33} = \frac{1}{2}; \\ \beta_{21} = \beta_{34} = \beta; \beta_{23} = \beta_{32} = \beta_2; \text{ (Abb. 4).} \end{cases}$$

Subtrahiert bzw. addiert man unter Bedachtnahme auf diese Beziehungen die beiden Gl. (11), so erhält man

$$(19a) \begin{cases} \frac{1}{3} (X_2 + X_3)^{IV} \left(\frac{H}{1} e t \beta + \beta_2 + \frac{1}{2} \beta_0 \right) = - \frac{E_3 J_3}{H} (\xi_1 - \xi_5)^{IV} - e t (\Omega_{21} + \Omega_{34})^{IV} - (\Omega_{23} + \Omega_{32})^{IV} \end{cases}$$

$$(19b) \left\{ \begin{aligned} \frac{1}{3} (X_2 - X_3)^{IV} \left(\frac{H}{1} \text{ct}\beta + \beta_3 - \frac{1}{2} \beta_0 \right) &= - \frac{E_3 J_3}{H} (\xi_1 + \xi_5)^{IV} + \\ &+ \frac{2 E_3 J_3}{1} (\xi_2 + \xi_4)^{IV} - \frac{2 E_3 J_3}{H} \xi_3^{IV} - \text{ct} (\Omega_{21} - \Omega_{34})^{IV} - \\ &- (\Omega_{23} - \Omega_{32})^{IV} \end{aligned} \right.$$

Infolge der Symmetrie des Tragwerkes sind die Koeffizienten der Gl. (4) außer um die von links nach rechts auch noch um die von rechts nach links fallende Diagonale symmetrisch, woraus folgt, daß die durch die Beiwerte α bzw. α der Gl. (5) gebildeten Matrizen um deren Mittelpunkte symmetrisch sind. Wendet man diese Vereinfachungen auch auf die Gl. (8) an, so erhalten wir die Gl. (19a) und (19b) in der Form

$$(20a) \left\{ \begin{aligned} \frac{\Theta H^2}{3 J_3} \left(\frac{H}{1} \text{ct}\beta + \beta_3 + \frac{1}{2} \beta_0 \right) (X_2 + X_3)^{IV} &= \frac{h}{1} \left[(a_{11} - a_{15}) - \frac{1}{h} \right] \\ (X_2 + X_3) - \frac{H h}{1} U - \frac{\Theta H^3}{J_3 1} \left[\text{ct} (\Omega_{21} + \Omega_{34}) + (\Omega_{23} + \Omega_{32}) \right]^{IV} \end{aligned} \right.$$

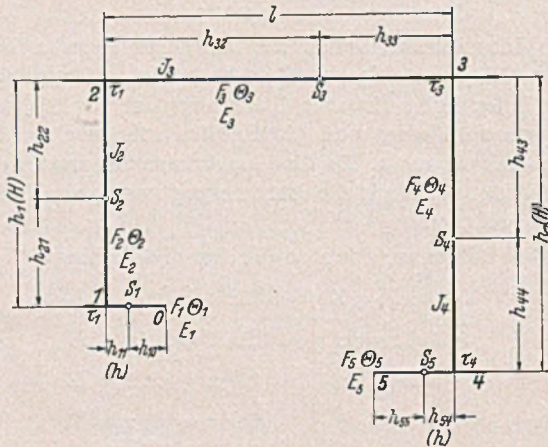


Abb. 4.

$$(20b) \left\{ \begin{aligned} \frac{\Theta H^2}{3 J_3} \left(\frac{H}{1} \text{ct}\beta + \beta_3 - \frac{1}{2} \beta_0 \right) (X_2 - X_3)^{IV} &= \left\{ \frac{h}{1} \frac{\Theta}{1} \left[(a_{11} + 2a_{13} + \right. \right. \\ &+ a_{15}) - 2(a_{12} + a_{14}) \frac{H}{1} - \frac{1}{h} \right] + \frac{H^2}{1^2} \left[2(a_{12} + a_{14} + a_{22} + \right. \\ &+ a_{24}) \frac{H}{1} - (a_{11} + 2a_{13} + a_{15} + a_{21} + 2a_{23} + a_{25}) - \frac{4}{1} \right] + \\ &+ \frac{\Theta}{\Theta_3} \left[(a_{21} + 2a_{23} + a_{25}) - 2(a_{22} + a_{24}) \frac{H}{1} - \frac{2}{1} \right] \left. \right\} (X_2 - X_3) - \\ &- H \frac{\Theta}{\Theta_3} \left[S - \frac{H_2 \Theta_3}{1^2 \Theta} T + R \frac{h \Theta_3}{1 \Theta} \right] - \frac{\Theta H^2}{J_3 1} \left[\text{ct} (\Omega_{21} - \Omega_{34}) + \right. \\ &+ (\Omega_{23} - \Omega_{32}) \left. \right]^{IV} \end{aligned} \right.$$

wobei die Belastungsglieder U, S, T und R der Reihe nach lauten

$$(21a) \left\{ \begin{aligned} U &= \left(a_{11} - a_{15} - \frac{1}{h} \right) U_0 + (a_{12} - a_{14}) (p_2 - p_4 - m'_2 + m'_1) + \\ &+ (\alpha_{11} - \alpha_{15}) (n'_1 - n'_5) + (\alpha_{12} - \alpha_{14}) (n'_2 - n'_4) \\ U_0 &= p_1 - p_5 - m'_1 + m'_5 \end{aligned} \right.$$

$$(21b) \left\{ \begin{aligned} S &= (a_{21} + a_{25}) R_0 + S_0 \\ S_0 &= (a_{22} + a_{24}) (p_2 + p_4 - m'_2 - m'_1) + 2 \left(a_{23} - \frac{1}{1} \right) \\ &+ (p_3 - m'_3) + (\alpha_{21} + \alpha_{25}) (n'_1 + n'_5) + \\ &+ (\alpha_{22} + \alpha_{24}) (n'_2 + n'_4) + 2 \alpha_{23} n'_3 \end{aligned} \right.$$

$$(21c) \left\{ \begin{aligned} T &= (a_{11} + a_{15} + a_{21} + a_{25}) R_0 + T_0 \\ T_0 &= \left(a_{12} + a_{14} + a_{22} + a_{24} - \frac{2}{H} \right) (p_2 + p_4 - m'_2 - m'_1) + \\ &+ 2(a_{13} + a_{23}) (p_3 - m'_3) + (\alpha_{11} + \alpha_{15} + \alpha_{21} + \alpha_{25}) \\ &+ (n'_1 + n'_5) + (\alpha_{12} + \alpha_{14} + \alpha_{22} + \alpha_{24}) (n'_2 + n'_4) + \\ &+ 2(\alpha_{13} + \alpha_{23}) n'_3 \end{aligned} \right.$$

$$(21d) \left\{ \begin{aligned} R &= \left(a_{11} + a_{15} - \frac{1}{h} \right) R_0 + (a_{12} + a_{14}) (p_2 + p_4 - m'_2 - m'_1) + \\ &+ 2 a_{13} (p_3 - m'_3) + (\alpha_{11} + \alpha_{15}) (n'_1 + n'_5) + \\ &+ (\alpha_{12} + \alpha_{14}) (n'_2 + n'_4) + 2 \alpha_{13} n'_3 \\ R_0 &= (p_1 + p_5 - m'_1 - m'_5) \end{aligned} \right.$$

Sind die beiden Hauptträgerwände in die beiden Randscheiben 1 und 5 symmetrisch eingebunden, das heißt, es ist $h_{11} = h_{51} = h = 0$, so verschwinden in den Gl. (4) die Beiwerte von p_1 und p_5 . Es wird also in Gl. (5) $a_{11} = a_{21} = a_{15} = a_{25} = 0$. Die Gl. (20) gehen somit über in

$$(22a) \quad X^{IV} + a_1 X = b_1 U_0 - c_1 \bar{\omega}^{IV}$$

$$(22b) \quad Y^{IV} + a_2 Y = b_2 V_0 - c_2 \omega^{IV},$$

wobei

$$(22c) \left\{ \begin{aligned} a_1 &= \frac{3 J_3}{H^2 1 \varrho \Theta}; \quad b_1 = a_1 H; \quad c_1 = \frac{3}{1 \varrho}; \quad a_2 = \frac{3 J_3}{\Theta_3 H^2} \frac{\sigma}{(\varrho - \beta_0)}; \\ b_2 &= H \frac{a_2}{\sigma}; \quad c_2 = \frac{3}{1(\varrho - \beta_0)}; \quad \varrho = \frac{H}{1} \text{ct}\beta + \beta_3 + \frac{1}{2} \beta_0; \\ \sigma &= 2 \left\{ \frac{H}{1} (a_{22} + a_{24}) - a_{23} + \frac{1}{1} \left(1 + \frac{\Theta_3}{2 \Theta} \right) - \frac{H^2 \Theta_3}{1^2 \Theta} \right. \\ &\left. \left[(a_{12} + a_{14} + a_{22} + a_{24}) \frac{H}{1} - (a_{13} + a_{23}) - \frac{2}{1} \right] \right\} \end{aligned} \right.$$

$$V_0 = -S_0 + \frac{\Theta_3}{1 \Theta} \left(\frac{H^2}{1} T_0 + \frac{\Theta}{\Theta} R_0 \right)$$

$$\bar{\omega} = \text{ct} (\Omega_{21} + \Omega_{34}) + (\Omega_{23} + \Omega_{32})$$

$$\omega = \text{ct} (\Omega_{21} - \Omega_{34}) + (\Omega_{23} - \Omega_{32})$$

$$X_2 + X_3 = X; \quad X_2 - X_3 = Y$$

bedeutet. Im Gegensatz zum unsymmetrischen Tragwerk sind die Bestimmungsgleichungen nicht mehr simultan, sondern wir erhalten zwei voneinander unabhängige Differentialgleichungen 4. Ordnung. Aber auch für diesen Fall wäre die geschlossene Integration unzuweckmäßig. Wir entwickeln also wie im vorigen Abschnitt die Funktionen in Fouriersche Reihen und setzen

$$(23a) \left\{ \begin{aligned} X &= \sum_1^{\infty} A_k \sin \frac{k\pi}{L} x; \quad U_0 = \sum_1^{\infty} u_{0k} \sin \frac{k\pi}{L} x; \\ \bar{\omega}^{IV} &= \sum_1^{\infty} \left(\frac{k\pi}{L} \right)^4 \cdot \bar{\omega}_k \sin \frac{k\pi}{L} x. \\ Y &= \sum_1^{\infty} B_k \sin \frac{k\pi}{L} x. \end{aligned} \right.$$

Daraus erhält man als Lösung für Gl. 22a)

$$(23b) \quad X = \sum_1^{\infty} k \frac{b_1 u_{0k} - \left(\frac{k\pi}{L} \right)^4 \cdot c_1 \bar{\omega}_k}{a_1 + \left(\frac{k\pi}{L} \right)^4} \sin \frac{k\pi}{L} x.$$

Analog ergibt sich als Lösung für Gl. (22b)

$$(23c) \quad Y = \sum_1^{\infty} k \frac{b_2 v_{0k} - \left(\frac{k\pi}{L} \right)^4 \cdot c_2 \omega_k}{a_2 + \left(\frac{k\pi}{L} \right)^4} \sin \frac{k\pi}{L} x,$$

wenn entsprechend

$$V_0 = \sum_1^{\infty} k v_{0k} \sin \frac{k\pi}{L} x \quad \text{und} \quad \omega^{IV} = \sum_1^{\infty} \left(\frac{k\pi}{L} \right)^4 \cdot \omega_k \sin \frac{k\pi}{L} x$$

ist.

D. Tragwerke mit Querscheiben.

Wie aus durchgeführten Rechenbeispielen hervorgeht, wird bei größeren Spannweiten L das System in seiner Querrichtung schon sehr nachgiebig. In solchen Fällen ist es notwendig, die 5 Einzelscheiben stellenweise durch Querscheiben zusammenzu-

halten. Wir bilden diese nicht vollwandig, sondern als Fachwerke aus, damit die Verformung des Fachwerkes in der Querrichtung und somit die Entstehung der Eckmomente X an den Orten der Querscheiben nicht gestört wird. Würde man letztere vollwandig ausführen und mit den einzelnen Fachwerksscheiben fest verbinden, so entstünden neue verwickelte Randbedingungen, welchen man nur unter Berücksichtigung des Plattencharakters der Fachwerksscheiben Genüge leisten könnte. Jede der Querscheiben soll vom Auflager $x = 0$ den Abstand s_ν ($\nu = 1, 2, 3 \dots \mu$) haben. Längs der Berührungskanten wirken nun Verbindungskräfte $P_n^{(\nu)}$ ($\nu = 1, 2, 3 \dots \mu$; $n = 1, 2, 3, 4, 5$). Nimmt man die Richtungen der von den Querscheiben auf die Fachwerksscheiben wirkenden Kräfte $P_n^{(\nu)}$ im Sinne der Abb. 1 als positiv an, so erhalten wir bei Vernachlässigung des Eigengewichtes der Querscheiben für jede derselben

$$\begin{aligned} (24a) \quad & P_1^{(\nu)} + P_5^{(\nu)} = P_n^{(\nu)} \\ (24b) \quad & P_2^{(\nu)} = P_4^{(\nu)} = P^{(\nu)} \\ (24c) \quad & P^{(\nu)} = -P_n^{(\nu)} \frac{H}{L}; \quad \nu = 1, 2, 3 \dots \mu. \end{aligned}$$

Diese Verbindungskräfte $P_n^{(\nu)}$ wirken auf die einzelnen Fachwerksscheiben wie äußere Lasten. Entwickeln wir sie nach Gl. (13c) in Fouriersche Reihen, setzen diese in die Gl. (22) ein, so erhält man letztere in der Form

$$(25b) \quad \left\{ \begin{aligned} X^{IV} + a_1 X &= b_1 \frac{2}{L} \sum_1^\mu P_1^{(\nu)} - P_5^{(\nu)} \cdot \sum_1^\infty k \sin \frac{k\pi}{L} s_\nu \cdot \\ &\cdot \sin \frac{k\pi}{L} x + b_1 \sum_1^\infty k u_{0k} \sin \frac{k\pi}{L} x - \\ &- c_1 \cdot \sum_1^\infty k \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4 \cdot \bar{\omega}_k \sin \frac{k\pi}{L} x \end{aligned} \right.$$

$$(25b) \quad \left\{ \begin{aligned} Y^{IV} + a_2 Y &= b_2 \sigma \frac{2}{L} \sum_1^\mu P_3^{(\nu)} \cdot \sum_1^\infty k \sin \frac{k\pi}{L} s_\nu \cdot \sin \frac{k\pi}{L} x + \\ &+ b_2 \sum_1^\infty k v_{0k} \sin \frac{k\pi}{L} x - c_2 \sum_1^\infty k \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4 \cdot \omega_k \sin \frac{k\pi}{L} x \end{aligned} \right. \\ \nu = 1, 2, 3 \dots \mu.$$

V_0 und U_0 [siehe Gl. (23a) und (23c)] rühren hierbei nur von den äußeren Lasten p , m und n her. Unter Anwendung von Gl. (23b) und (23c) erhalten wir aus Gl. (25a) und (25b)

$$(26a) \quad \left\{ \begin{aligned} X &= b_1 \frac{2}{L} \sum_1^\mu P_1^{(\nu)} - P_5^{(\nu)} \cdot \sum_1^\infty k \frac{\sin \frac{k\pi}{L} s_\nu}{a_1 + \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4} \sin \frac{k\pi}{L} x + \\ &+ \sum_1^\infty k \frac{b_1 u_{0k} - c_1 \bar{\omega}_k \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4}{a_1 + \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4} \sin \frac{k\pi}{L} x \end{aligned} \right.$$

$$(26b) \quad \left\{ \begin{aligned} Y &= b_2 \sigma \frac{2}{L} \sum_1^\mu P_3^{(\nu)} \cdot \sum_1^\infty k \frac{\sin \frac{k\pi}{L} s_\nu}{a_2 + \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4} \sin \frac{k\pi}{L} x + \\ &+ \sum_1^\infty k \frac{b_2 v_{0k} - c_2 \omega_k \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4}{a_2 + \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4} \sin \frac{k\pi}{L} x; \quad \nu = 1, 2, 3 \dots \mu; \end{aligned} \right.$$

als weitere Zwischenlösung. Um die in diesen Ausdrücken noch unbekanntten Kräfte $P_n^{(\nu)}$ bestimmen zu können, benutzen wir die Tatsache, daß an den Orten der Querscheiben die Sehnen der Fachwerksscheiben aufeinander senkrecht stehen müssen. Es ist also

$$(27) \quad \left[\frac{\xi_1 + \xi_3}{H} = \frac{\xi_2 + \xi_4}{1}, \quad \frac{\xi_5 + \xi_3}{H} = \frac{\xi_2 + \xi_4}{1} \right]_{x=s_\nu} \quad \nu = 1, 2, 3 \dots \mu.$$

Subtrahiert man diese beiden Gleichungen, so ergibt sich

$$(27a) \quad \left[\xi_1 - \xi_5 \right]_{x=s_\nu} = 0 \quad \nu = 1, 2, 3 \dots \mu.$$

Die 4. Ableitung dieser Differenz kann nun für das symmetrische Tragwerk mit $h = 0$ mit Hilfe der Gl. (8) und Gl. (13c) auf die Form

$$(28) \quad \left\{ \begin{aligned} \varphi_1 (\xi_1 - \xi_5)^{IV} &= X - \frac{2H}{L} \sum_1^\mu P_1^{(\nu)} - P_5^{(\nu)} \cdot \sum_1^\infty k \sin \frac{k\pi}{L} s_\nu \cdot \\ &\cdot \sin \frac{k\pi}{L} x - H \sum_1^\infty k u_{0k} \sin \frac{k\pi}{L} x; \quad \nu = 1, 2, 3 \dots \mu \end{aligned} \right.$$

gebracht werden, wobei das 3. Glied der rechten Seite wieder nur von der äußeren Belastung herrührt. Setzt man in diesem Ausdruck für X den Wert der Gl. (26a) ein und integriert hernach 4mal nach x , so ergeben sich unter Berücksichtigung der Randbedingungen $M_1 = M_5 = 0$, $\xi_1 = \xi_5 = 0$, $\sin \frac{k\pi}{L} x = 0$ für $x = 0$ und $x = L$ sowie der Bedingungsgleichung (27a) die μ linearen Gleichungen

$$(29) \quad \left\{ \begin{aligned} \varphi_1 (\xi_1 - \xi_5)_{x=s_\nu} &= \frac{2}{L} \sum_1^\mu P_1^{(\nu)} - P_5^{(\nu)} \cdot \\ &\cdot \sum_1^\infty \left(\frac{L}{k\pi}\right)^4 \left[\frac{b_1}{a_1 + \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4} - H \right] \sin \frac{k\pi}{L} s_\nu \cdot \sin \frac{k\pi}{L} x + \\ &+ \sum_1^\infty k \left(\frac{L}{k\pi}\right)^4 \left[\frac{b_1 u_{0k} - c_1 \bar{\omega}_k \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4}{a_1 + \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4} - H u_{0k} \right] \sin \frac{k\pi}{L} x = 0 \end{aligned} \right. \\ \nu = 1, 2, 3 \dots \mu; \quad x = s_1, s_2, s_3 \dots s_\mu,$$

aus welchen die $P_1^{(\nu)} - P_5^{(\nu)}$ ($\nu = 1, 2, 3 \dots \mu$) bestimmt werden können. Addiert man hingegen die beiden Gl. (27), so folgt eine zweite Bedingungsgleichung von der Form

$$(30) \quad \left[\frac{\xi_1 + \xi_5}{H} + \frac{2\xi_3}{H} - 2 \frac{\xi_2 + \xi_4}{1} \right]_{x=s_\nu} = 0 \quad \nu = 1, 2, 3 \dots \mu.$$

Die 4. Ableitung dieser Beziehung ergibt sich für das symmetrische Tragwerk mit $h = 0$ zu

$$(31) \quad \left\{ \begin{aligned} \varphi_2 \left[\frac{\xi_1 + \xi_5 + 2\xi_3}{H} - 2 \frac{\xi_2 + \xi_4}{1} \right]^{IV} &= Y - 2 \frac{H}{L} \sum_1^\mu P_3^{(\nu)} \cdot \\ &\cdot \sum_1^\infty k \sin \frac{k\pi}{L} s_\nu \cdot \sin \frac{k\pi}{L} x - \frac{H}{\sigma} \sum_1^\infty k v_{0k} \sin \frac{k\pi}{L} x \end{aligned} \right. \\ \nu = 1, 2, 3 \dots \mu.$$

Setzen wir in diesem Ausdruck entsprechend dem vorhergehenden Rechnungsgang für Y die Lösung (26b) ein und integrieren wieder 4mal nach x , so erhalten wir unter Berücksichtigung der Randbedingungen $M_\nu = 0$, $\xi_\nu = 0$ ($\nu = 1, 2, 3, 4, 5$), $\sin \frac{k\pi}{L} x = 0$ für $x = 0$ und $x = L$

$$(32) \quad \left\{ \begin{aligned} \varphi_2 \left[\frac{\xi_1 + \xi_5 + 2\xi_3}{H} - 2 \frac{\xi_2 + \xi_4}{1} \right]_{x=s_\nu} &= \sigma \frac{2}{L} \sum_1^\mu P_3^{(\nu)} \cdot \\ &\cdot \sum_1^\infty k \left(\frac{L}{k\pi}\right)^4 \left[\frac{b_2}{a_2 + \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4} - \frac{H}{\sigma} \right] \sin \frac{k\pi}{L} s_\nu \cdot \sin \frac{k\pi}{L} x + \\ &+ \sum_1^\infty k \left(\frac{L}{k\pi}\right)^4 \left[\frac{b_2 v_{0k} - c_2 \omega_k \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4}{a_2 + \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4} - v_{0k} \frac{H}{\sigma} \right] \sin \frac{k\pi}{L} x = 0 \end{aligned} \right. \\ \nu = 1, 2, 3 \dots \mu; \quad x = s_1, s_2, s_3 \dots s_\mu,$$

also wieder μ lineare Gleichungen für die Bestimmung der $P_n^{(\nu)}$. Da nach Gl. (24a) $P_n^{(\nu)}$ die Summe der beiden Kräfte $P_1^{(\nu)}$ und $P_5^{(\nu)}$ darstellt, erhält man nun endgültig die Unbekannten $P_1^{(\nu)}$ und $P_5^{(\nu)}$, indem man die Lösungen der Gl. (29) und Gl. (32) halbiert und daran anschließend addiert bzw. subtrahiert. Die übrigen Kräfte $P_n^{(\nu)}$

ergeben sich aus Gl. (24c). In allen Fällen ist die Konvergenz der Summenausdrücke der Gl. (29) und Gl. (32) eine hervorragende, da die Produkte $\sin \frac{k\pi}{L} s_p \cdot \sin \frac{k\pi}{L} s_p < 1$ sind und im Nenner der einzelnen Glieder die 8. bzw. 4. Potenzen des laufenden Index k stehen.

Hat ein Balkenwerk in jedem Drittpunkt eine Querscheibe, das heißt es ist $s_1 = \frac{L}{3}$; $s_2 = \frac{2L}{3}$ und ist die Belastung in bezug auf die Tragwerksmitte symmetrisch, so werden die $P_n^{(1)} = P_n^{(2)}$ und die Gl. (32) und Gl. (29) nehmen die Form

$$(33a) \left\{ \begin{aligned} P_1 + P_5 = P_3 = & \frac{L}{2\sigma} \sum_1^{\infty} k \frac{1}{k^4} \left[\frac{b_2 v_{0k} - c_2 \omega_k \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4}{\left(\frac{k\pi}{L}\right)^4 + a_2} - v_{0k} \frac{H}{\sigma} \right] \sin \frac{k\pi}{3} \\ = & \frac{L}{2\sigma} \sum_1^{\infty} k \frac{1}{k^4} \left[\frac{b_2}{\left(\frac{k\pi}{L}\right)^4 + a_2} - \frac{H}{\sigma} \right] \left(1 + 2 \cos \frac{k\pi}{3}\right) \sin^2 \frac{k\pi}{3} \end{aligned} \right.$$

$$(33b) \left\{ \begin{aligned} P_1 - P_5 = & \frac{L}{2} \sum_1^{\infty} k \frac{1}{k^4} \left[\frac{b_1 u_{0k} - c_1 \bar{\omega}_k \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4}{\left(\frac{k\pi}{L}\right)^4 + a_1} - H u_{0k} \right] \sin \frac{k\pi}{3} \\ = & \frac{L}{2} \sum_1^{\infty} k \frac{1}{k^4} \left[\frac{b_1}{\left(\frac{k\pi}{L}\right)^4 + a_1} - H \right] \left(1 + 2 \cos \frac{k\pi}{3}\right) \sin^2 \frac{k\pi}{3} \end{aligned} \right.$$

an. Auch in diesen Gleichungen rühren die u_{0k} und die v_{0k} nur von den äußeren Belastungen p, m und n her. Da infolge der symmetrischen Lastanordnung die auftretenden Funktionen um $L/2$ spiegelgleich sein müssen, sind alle Glieder mit geradem k gleich Null. Für die in Abb. 1 dargestellte halbseitige gleichmäßig verteilte Belastung vereinfachen sich die Gl. (33a) und (33b). Da $p_1 = p_5 = 0$, wird nach Gl. (21a) $U_0 \equiv 0$. Die übrigen Belastungsglieder werden konstant. Sie lassen sich also durch $V_0 = v_{0p}$; $c_1 \bar{\omega} = \bar{\omega}_0 p$; $c_2 \omega = \omega_0 p$ ausdrücken. Entwickeln wir sie nach der

für beliebige Konstante gültigen Beziehung $R = R \frac{4}{\pi} \sum_1^{\infty} k \frac{1}{k} \sin \frac{k\pi}{L} x$ in sin-Reihen, so erhalten wir deren Koeffizienten in der Form

$$(34) \quad v_{0k} = \frac{4 v_0 p}{k\pi}; \quad c_1 \bar{\omega}_k = \frac{4 \bar{\omega}_0 p}{k\pi}; \quad c_2 \omega_k = \frac{4 \omega_0 p}{k\pi}.$$

Mit diesen Werten nehmen nun die Gl. (33a) und (33b) die vereinfachte Form

$$(35a) \left\{ \begin{aligned} P_1 + P_5 = & p \frac{2L}{\pi\sigma} \sum_1^{\infty} k \frac{1}{k^5} \left[\frac{b_2 v_0 - \omega_0 \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4}{a_2 + \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4} - \frac{v_0 H}{\sigma} \right] \sin \frac{k\pi}{3} \\ = & p \frac{2L}{\pi\sigma} \sum_1^{\infty} k \frac{1}{k^4} \left[\frac{b_2}{a_2 + \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4} - \frac{H}{\sigma} \right] \left(1 + 2 \cos \frac{k\pi}{3}\right) \sin^2 \frac{k\pi}{3} \end{aligned} \right.$$

$$(35b) \left\{ \begin{aligned} P_1 - P_5 = & 2 \left(\frac{\pi}{L}\right)^3 \bar{\omega}_0 p \sum_1^{\infty} k \frac{1}{k} \frac{\sin \frac{k\pi}{3}}{a_1 + \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4} \\ = & 2 \left(\frac{\pi}{L}\right)^3 \bar{\omega}_0 p \sum_1^{\infty} k \frac{1}{k^4} \left[\frac{b_1}{a_1 + \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4} - H \right] \left(1 + 2 \cos \frac{k\pi}{3}\right) \sin^2 \frac{k\pi}{3} \end{aligned} \right.$$

an. P_1, \dots, P_5 wirken nun auf das steifknotige Faltwerk wie äußere Lasten und erzeugen daher Eckmomente X_2 und X_3 , deren Summe bzw. Differenz durch die ersten Glieder der Gl. (26a) und (26b) gegeben ist. Benutzt man die Symmetrie der P_n um den Mittel-

querschnitt, so erhalten wir diese Glieder in der Gestalt

$$(36a) \quad X_p = b_1 \frac{2}{L} (P_1 - P_5) \sum_1^{\infty} k \frac{\left(1 + 2 \cos \frac{k\pi}{3}\right) \sin \frac{k\pi}{3}}{a_1 + \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4} \sin \frac{k\pi}{L} x$$

$$(36b) \quad Y_p = b_2 \sigma (P_1 + P_5) \frac{2}{L} \sum_1^{\infty} k \frac{\left(1 + 2 \cos \frac{k\pi}{3}\right) \sin \frac{k\pi}{3}}{a_2 + \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4} \sin \frac{k\pi}{L} x$$

$$(36c, d) \quad X_{2p} = \frac{X_p + Y_p}{2}; \quad X_{3p} = \frac{X_p - Y_p}{2},$$

wobei die in den Drittpunkten angreifenden gleichgroßen Einzel-lasten P_n nach der Formel

$$(37) \quad p_{r,p} = P_p \frac{2}{L} \sum_1^{\infty} k \left(1 + 2 \cos \frac{k\pi}{3}\right) \sin \frac{k\pi}{3} \cdot \sin \frac{k\pi}{L} x; \quad r = 1, 2, 3, 4, 5;$$

in Fouriersche Reihen entwickelt wurden.

E. Ermittlung der Spannungen.

Differenzieren wir Gl. (2a) und (2b) nach x , setzen in die erste dieser Beziehungen Gl. (2c) ein und ersetzen dann in beiden die τ'_n durch Gl. (6), so ergibt sich für den symmetrischen Querschnitt nach (Abb. 1)

$$(38a) \quad M''_i = -\kappa_m \frac{H}{2} Y - \frac{H}{2} \left[(a_{12} + a_{22} - \frac{2}{H}) \bar{p}_2 + (a_{13} + a_{23}) \bar{p}_3 + (a_{14} + a_{24}) \bar{p}_4 \right]$$

$$(38b) \quad N''_i = \pm \kappa_n Y \pm (a_{12} - a_{22}) \bar{p}_2 + (a_{13} - a_{23}) \bar{p}_3 + (a_{14} - a_{24}) \bar{p}_4$$

$$(38c) \quad \kappa_m = \left(a_{12} + a_{22} - \frac{2}{H} \right) \frac{1}{1} - \frac{a_{13} + a_{23}}{H} + \frac{a_{14} + a_{24}}{1}; \quad Y = Y_p + Y_p$$

$$(38d) \quad \kappa_n = \frac{a_{12} - a_{22}}{1} - \frac{a_{13} - a_{23}}{H} + \frac{a_{14} - a_{24}}{1}; \quad \bar{p}_r = p_r + p_{r,p} \quad (r = 1, 2, 3, 4, 5),$$

wobei die p_r die äußere Belastung darstellen. Setzt man für Y_p bzw. Y_p die Ergebnisse der Gl. (23c) bzw. Gl. (36b) und für die $p_{r,p}$ die Entwicklung der Gl. (37) ein, so ergibt sich unter Rücksichtnahme auf die Gl. (24a), (24b) und (24c) sowie auf die Randbedingungen $N = M = 0$ für $x = 0, x = L$ nach zmaliger Integration

$$(39a) \quad M_2 = \frac{H}{4} x (L - x) \left[(a_{12} + a_{22} - \frac{2}{H}) p_2 + (a_{13} + a_{23}) p_3 + (a_{14} + a_{24}) p_4 \right] + \frac{HL^2}{2\pi^2} \kappa_m \phi(x)$$

$$(39b) \quad N_2 = \mp \frac{x}{2} (L - x) \left[(a_{12} - a_{22}) p_2 + (a_{13} - a_{23}) p_3 + (a_{14} - a_{24}) p_4 \right] \mp \frac{L^2}{\pi^2} \kappa_n \phi(x),$$

wobei

$$(39c) \quad \phi(x) = \sum_1^{\infty} k \frac{b_2 v_{0k} - \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4 c_2 \omega_k}{k^2 \left[a_2 + \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4 \right]} \sin \frac{k\pi}{L} x - \frac{2HP_3}{L} \sum_1^{\infty} k \frac{\left(1 + 2 \cos \frac{k\pi}{3}\right) \sin \frac{k\pi}{3}}{k^2} \sin \frac{k\pi}{L} x + \frac{2b_2\sigma P_3}{L} \sum_1^{\infty} k \frac{\left(1 + 2 \cos \frac{k\pi}{3}\right) \sin \frac{k\pi}{3}}{k^2 \left[a_2 + \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4 \right]} \sin \frac{k\pi}{L} x$$

ist.

In den Gl. (39a) und (39b) stellen die ersten Glieder die Momente und Normalkräfte dar, die im gelenkig verbundenen Faltwerk ohne Querscheiben durch die äußeren Lasten p auftreten. Die zweiten Glieder geben den Einfluß der steifen Ecken und der

Querscheiben wieder. Im besonderen stellt der erste Teil der Funktion Φ die durch die steifen Ecken allein und der zweite und dritte Teil die durch die Querscheiben verursachte Wirkung dar. Diese letztere Wirkung setzt sich wieder aus zwei Einflüssen zusammen. Einerseits greifen die den P_i entsprechenden p_i an dem steifknotigen querscheibenlosen Faltwerk als äußere Belastung an und verursachen die im zweiten Teil von Φ dargestellten Anteile der M und N . Andererseits erzeugen die p_i wieder Eckmomente, deren Auswirkung der dritte Teil von Φ wiedergibt. Diese beiden letzten Einflüsse sind immer entgegengesetzter Art, so daß die lastverteilende Wirkung der Querscheiben oft nicht allzu groß wird.

Durch die Eckmomente X_2 und X_3 sowie durch die Verbindungskräfte P_1 und P_5 werden in den Scheiben 01 und 45 Querbelastungen p_1 und p_5 ausgelöst, welche mitunter sehr erhebliche Biegemomente hervorrufen. Es ist

$$(39d) \quad p_i = \frac{2}{L} P_i \sum_1^{\infty} k \left(1 + 2 \cos \frac{k\pi}{3} \right) \sin \frac{k\pi}{3} \cdot \sin \frac{k\pi}{L} x \cdot \frac{\bar{X}_2}{H}$$

wobei

$$\bar{X}_2 = X_2 + X_{2P}$$

ist.

Integriert man Gl. (39d) zweimal nach x und benutzt wieder die Randbedingungen $M_1 = 0$ für $x = 0$; $x = L$, so erhalten wir die Momente

$$(39e) \quad \left\{ \begin{aligned} M_1 &= - \left(\frac{L}{\pi} \right)^2 \frac{2}{L} P_i \sum_1^{\infty} k \frac{\left(1 + 2 \cos \frac{k\pi}{3} \right) \sin \frac{k\pi}{3}}{k^2} \sin \frac{k\pi}{L} x \mp \\ &\mp \frac{1}{H} \sum_1^{\infty} k \frac{X_{2k} + X_{2Pk}}{3k} \frac{\sin \frac{k\pi}{L} x}{k^2} \end{aligned} \right.$$

woraus die zusätzlichen Spannungen ermittelt werden können.

F. Praktische Anwendung.

In diesem Abschnitt wird die Berechnung einer 50,0 m weitgespannten Balkenbrücke mit dem in Abb. 1 dargestellten Querschnitt für halbseitige Vollast und für eine unmittelbar über einem Hauptträger stehende Linearlast durchgeführt. Hierzu bestimmen wir zuerst die Abstände s_1, s_5 bzw. s_3 der Schwerpunkte S_1, S_5 bzw. S_3 von den Außenrändern ihrer Scheiben. Sie ergeben sich zu $s_1 = s_5 = 0,287$ m bzw. $s_3 = 0,207$ m. Der Abstand der beiden waagrechten Schwerlinien S_1, S_5 und S_3 ist die statische Höhe $H = 5,00$ m. Führen wir die Schnitte $n-n$ und $m-m$, so zerfällt der Querschnitt in 5 in Abb. 1 durch Schraffen gekennzeichnete Scheiben, deren Flächen $F_1 = F_5 = 1,096$ m², $F_2 = F_4 = 1,686$ m², $F_3 = 4,590$ m² und deren Trägheitsmomente $\Theta_1 = \Theta_5 = \bar{\Theta} = 0,30197$ m⁴, $\Theta_2 = \Theta_4 = \Theta = 2,50149$ m⁴, $\Theta_3 = 33,71431$ m⁴ betragen. Aus den Abständen s_1, s_5 und s_3 ergeben sich nun die Entfernungen der Schwerpunkte S_1, S_5 bzw. S_3 von den Schnittstellen $m-m$ bzw. $n-n$ zu je 0,393 m, so daß auch die Schwerpunkte S_2 und S_4 der Scheiben 12 und 34 von diesen Schnitten die gleichen Abstände von je 2,107 m haben, das heißt, sie liegen in der Mitte der Höhe H . Es sind somit sämtliche Kennzeichen des symmetrischen Querschnittes vorhanden. Ferner sollen alle Scheiben aus demselben Baustoff bestehen, so daß $e_{1,2} = e_{2,3} = e_{3,4} = e_{4,5} = 1$ wird. Berücksichtigt man, daß die Anteile m und n der äußeren Lasten gleich Null sind, so ergeben sich die Gl. (4) in der Form

$$(40) \quad \left\{ \begin{aligned} 4,00361 \tau'_1 + 1,90580 \tau'_2 &= 0,99940 (p_2 + \pi_2) \\ 1,90580 \tau'_1 + 3,49550 \tau'_2 - 0,03143 \tau'_3 &= 0,99940 (p_2 + \pi_2) + 0,07457 (p_3 + \pi_3) \\ - 0,03143 \tau'_2 + 3,49550 \tau'_3 + 1,90580 \tau'_4 &= 0,07457 (p_3 + \pi_3) + 0,99940 (p_4 + \pi_4) \\ &+ 1,90580 \tau'_5 + 4,00361 \tau'_1 = 0,99940 (p_4 + \pi_4). \end{aligned} \right.$$

Entsprechend den Ausführungen des Abschnittes C sind die Beiwerte der linken Seite um beide Diagonalen der linken und die Beiwerte der rechten Seite um den Mittelpunkt der rechten Matrix symmetrisch. Außerdem entfallen rechts die Koeffizienten von $(p_1 + \pi_1)$ und $(p_5 + \pi_5)$. Die Lösung von Gl. (40) lautet:

$$(41) \quad \left\{ \begin{aligned} \tau'_1 &= 0,15330 (p_2 + \pi_2) - 0,01388 (p_3 + \pi_3) - \\ &- 0,00117 (p_4 + \pi_4) & a_{12} \ a_{13} \ a_{14} \\ \tau'_2 &= 0,20236 (p_2 + \pi_2) + 0,02917 \quad \text{,,} \quad + \\ &+ 0,00246 (p_4 + \pi_4) & a_{22} \ a_{23} \ a_{24} \\ \tau'_3 &= 0,00246 (p_2 + \pi_2) + 0,02917 \quad \text{,,} \quad + \\ &+ 0,20236 (p_4 + \pi_4) & a_{31} \ a_{33} \ a_{34} \\ \tau'_4 &= - 0,00117 (p_2 + \pi_2) - 0,01388 \quad \text{,,} \quad + \\ &+ 0,15330 (p_4 + \pi_4) & a_{41} \ a_{43} \ a_{44} \end{aligned} \right.$$

woraus man wieder die Symmetrie der Koeffizientenmatrix erkennt.

Da die Trägheitsmomente je Längenmeter um die Längsachse der Scheiben (J) für die Scheiben 12 und 34 konstant sind und außerdem die Dicken der Scheiben 12, 34 und 23 einander gleich sind, ergeben sich die Werte α und β der Gl. (10) sowie die t der Gl. (18) zu

$$\beta_{21} = \beta_{31} = \beta = 1; \quad \beta_{23} = \beta_{32} = \beta_3 = 0,703493; \quad \beta_0 = 0,889790; \\ t = 1,$$

woraus man nach Gl. (22c) mit Hilfe der Beiwerte der Gl. (41) $q = 2,148388$, $q - \beta_0 = 1,258598$ und $\sigma = 24,65358$ erhält. Mit diesen Ergebnissen finden wir die Koeffizienten der Gl. (22a) zu $a_1 = 0,000197304$, $b_1 = 0,000986520$, $c_1 = 0,27928$ und die der Gl. (22b) zu $a_2 = 0,000371850$, $b_2 = 0,000075761$, $c_2 = 0,47672$.

Teilt man entsprechend den Erläuterungen des Abschnittes B die zwischenknotliche Last p statisch bestimmt auf die beiden Scheiben 12 und 34 auf, so ergibt sich $p_1 = p_5 = p_3 = 0$, $p_2 = -0,60 p$, $p_4 = +2,40 p$, woraus sich nach den Gl. (21a), (21b), (21c) und (21d) unter Benützung der Beiwerte der Gl. (41) die Belastungsglieder ergeben. Es ist $U_0 = R_0 = 0$; $S_0 = 0,36866 p$; $T_0 = -0,0775044 p$. Daraus folgt $V_0 = -1,41324 p = v_0 p$. Die von der zwischenknotlichen Belastung herrührenden Ω -Glieder lauten $\Omega_{21} = \Omega_{31} = 0$; $\Omega_{23} = 1,99282 p$; $\Omega_{32} = 2,40220 p$, womit man $\bar{\omega} = 4,39502 p$ und $\omega = -0,40938 p$ erhält, so daß sich die zweiten Glieder der rechten Seiten der Gl. (22a) und (22b) zu $c_1 \bar{\omega}^{IV} = +1,22744 p^{IV} = \bar{\omega}_0 p^{IV}$ und $c_2 \omega^{IV} = -0,195160 p^{IV} = -\omega_0 p^{IV}$ ergeben. Wir erhalten somit die Gl. (22) in der Form

$$X^{IV} + 0,000197304 X = -1,22744 p^{IV} \\ Y^{IV} + 0,000371850 Y = -0,000107069 p + 0,195160 p^{IV}.$$

Mit den für p und dessen 4. Ableitung geltenden Entwicklungen

$$(42) \quad p = p \frac{4}{\pi} \sum_1^{\infty} k \frac{1}{k} \sin \frac{k\pi}{L} x; \quad p^{IV} = p \frac{4}{\pi} \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \sum_1^{\infty} k^3 \sin \frac{k\pi}{L} x$$

ergeben sich nach Gl. (23b) und (23c) für die Beiwerte A und B der für X und Y geltenden Fourierschen Reihen die beiden Rekursionsformeln

$$(43a) \quad A_k = - \frac{4 p}{\pi} \cdot \frac{19,1304 k^3}{197,3040 + 15,5855 k^4};$$

$$(43b) \quad B_k = \frac{4 p}{\pi k} \cdot \frac{-107,0690 + 3,0410 k^4}{371,8501 + 15,5855 k^4},$$

welche für große Werte von k , in diesem Falle, wenn $k > 11$, mit genügender Genauigkeit übergehen in

$$(44a, 44b) \quad A_k = - \frac{4 p}{\pi k} 1,22744; \quad B_k = \frac{4 p}{\pi k} 0,19516.$$

Daraus folgen nach $X_{2k} = \frac{A_k \pm B_k}{2}$ die Beiwerte der Entwicklungen für die Eckmomente X_2 und X_3 selbst, die aus der 1. und 2. Spalte der Zahlentafel 1 zu entnehmen sind.

Um den Einfluß der in den Drittelpunkten angeordneten Querscheiben zu ermitteln, werten wir die Gl. (35a) und (35b) aus. Wir erhalten

$$(45a) \begin{cases} P_1 + P_5 = \frac{4 \cdot 50,000 p \sqrt{3}}{6 \pi 12,3268} \\ \quad - \frac{0,027622 - 0,000081 + 0,000016 - \dots}{+ 0,007272 + 0,000313 + 0,000084 + 0,000014 + \dots} = \\ = -5,3726 p \\ P_1 - P_5 = 1,22744 p \sqrt{3} \frac{4}{3} \left(\frac{\pi}{50}\right)^3 \\ \quad - \frac{2348,64 - 10,06 - 0,20 - \dots}{- 0,36607 - 0,00784 - 0,00207 - 0,00034 - \dots} = \\ = -4,3727 p, \end{cases}$$

woraus sich $P_1 = -4,8726 p$; $P_5 = -0,5000 p$; $P_3 = -5,3726 p$; $P_2 = P_4 = +5,3726 p$ ergibt. Die durch diese Verbindungskräfte bedingten zusätzlichen Eckmomente X_{2p} und X_{3p} folgen aus den Gl. (36a), (36b), (36c) und (36d). Die Koeffizienten der dazu gehörigen Reihenentwicklungen sind in der 3. und 4. Spalte der Zahlentafel 1 zusammengestellt. Damit sind alle Überzähligen der Aufgabe errechnet.

$$M_1 = -\left(\frac{50}{\pi}\right)^2 \left[-\frac{2}{50} 4,8726 \cdot 0,9479 \sqrt{3} + \frac{1}{5} 1,80537 \right] = -10,406 \text{ tm}$$

$$M_5 = -\left(\frac{50}{\pi}\right)^2 \left[-\frac{2}{50} 0,5000 \cdot 0,9479 \sqrt{3} + \frac{1}{5} 0,33124 \right] = -8,465 \text{ tm},$$

woraus für die Spannungen die Werte $\sigma_1 = \pm \frac{10,406}{0,302} \cdot 1,00 = \pm 34,46 \text{ t/m}^2$; $\sigma_5 = \pm \frac{8,465}{0,302} \cdot 1,00 = \pm 28,03 \text{ t/m}^2$ folgen. Sie sind zu den oben errechneten Mittelpunktspannungen der Untergurte algebraisch zu addieren. Das so errechnete Spannungsspiel ist in (Abb. 5a) dargestellt.

Ist die gleichmäßig verteilte Halblast p in der unmittelbar über der Scheibe 34 sitzenden Linearlast $P = 3 \text{ t/m}$ (Abb. 1) konzentriert, so ändern sich zunächst einige der Belastungsglieder. Es wird gegenüber dem vorigen Beispiel $p_2 = 0$, $p_4 = 3,000 \text{ t/m}$ und $b_2 V_0 = -0,00017866$. Die anderen Koeffizienten bleiben, da sie nur vom System abhängig sind, unverändert. Den neuen Belastungen entsprechend, nehmen auch die Berührungskräfte $P_n^{(p)}$ andere Werte

Zahlentafel 1.

Längen in m Kräfte in t k	Eckmomente im Tragwerk ohne Querscheiben		Einfluß der Querscheiben auf die Eckmomente		$\Phi : p$			$\sin \frac{k\pi}{L} x$
	$X_{2p} : p$	$X_{3p} : p$	$X_{2p} : p$	$X_{3p} : p$	1. Glied	2. Glied	3. Glied	
1	-0,22814	+0,11372	-1,59927	+0,19745	-0,341867	+1,861122	-1,795011	$\sin \frac{\pi}{L} x$
3	-0,20715	-0,24335	0	0	+0,004018	0	0	$\sin \frac{3\pi}{L} x$
5	-0,11653	-0,16170	+0,04942	-0,01935	+0,001807	-0,074445	+0,002751	$\sin \frac{5\pi}{L} x$
7	-0,09337	-0,12799	-0,01317	+0,00523	+0,000700	+0,037982	-0,000376	$\sin \frac{7\pi}{L} x$
9	-0,07319	-0,10013	0	0	+0,000332	0	0	$\sin \frac{9\pi}{L} x$
11	-0,05973	-0,08232	+0,00218	-0,00087	+0,000186	-0,015381	+0,000251	$\sin \frac{11\pi}{L} x$

Bestimmt man nun nach Gl. (39c) die in der 5., 6. und 7. Spalte der Zahlentafel 1 eingetragenen Koeffizienten der \sin -Entwicklung Φ und errechnet man nach Gl. (38c) und (38d) die Konstanten $\kappa_m = -0,011668$ und $\kappa_n = -0,001928$, so ergeben sich mit Hilfe der a der Gl. (41) die M und N der Scheiben 12 und 34 als Funktion von x. Da wir uns auf die Spannungsermittlung in Brückenmitte beschränken wollen, benötigen wir die Werte der Funktionen Φ , M und N auch nur für $x = \frac{L}{2}$. Es wird $\Phi_{\frac{L}{2}} = -0,344632 p + 1,76408 p - 1,79439 p$, wobei die drei Summanden den drei Gliedern von Φ entsprechen. Daraus folgt nach Gl. (39a) und (39b) M_2 , N_2 und M_4 , N_4 . Die Werte hierfür sind getrennt nach

Zahlentafel 2.

Kräfte in t Längen in m	$M_2 : p$	$N_2 : p$	$M_4 : p$	$N_4 : p$
Gelenkwerk	+23,203	-6,4761	-83,697	-36,0872
Steifknotiges Tragwerk ohne Querscheiben	+2,547	-0,1683	+2,547	+0,1683
Einfluß der Querscheiben	+0,225	-0,0147	+0,225	+0,0147

den drei Einflüssen in Zahlentafel 2 zusammengestellt. Daraus ergeben sich aus $\sigma = \pm \frac{M}{\Theta} \cdot \frac{H}{2} + \frac{N}{F}$ die Spannungen in der Brückenmitte. Werten wir Gl. (39e) aus, so erhalten wir

an, und zwar ergibt sich nach Gl. (35a) und (35b) $P_1 = P_5 = -5,2852 \text{ t}$, $P_3 = -10,5704 \text{ t}$, $P_2 = P_4 = +10,5704 \text{ t}$. Die Entwicklungen für X_2 , X_3 , Φ , X_{2p} , X_{3p} , M_2 , N_2 , M_4 und N_4 werden genau so bestimmt wie vorher. Die seitlichen Biegemomente der Untergurte folgen nach Gl. (39e) zu

$$M_1 = M_5 = -\left(\frac{50}{\pi}\right)^2 \left[-\frac{2}{50} \cdot 5,2852 \cdot 0,9479 \sqrt{3} + \frac{1}{5} \cdot 2,0538 \right] = -15,922 \text{ tm}.$$

Die dazugehörigen Randspannungen nehmen die Werte $\sigma_1 = \sigma_5 = \pm \frac{15,922}{0,302} \cdot 1,00 = \pm 52,727 \text{ t/m}^2$ an. Sämtliche Ergebnisse sind in den Zahlentafeln 3 und 4 sowie in (Abb. 5b) zusammengestellt.

Zahlentafel 3.

Läng. in m Kräfte in t k	Eckmomente im Tragwerk ohne Querscheiben $X_{2p} = -X_{3p}$ X_{2p}	Einfluß der Querscheiben auf die Eckmomente $X_{2p} = -X_{3p}$ X_{2p}	Φ		$\sin \frac{k\pi}{L} x$
			1. Glied	2. und 3. Glied	
1	-0,29354	-1,76579	-0,587078	2. u. 3. Glied	$\sin \frac{\pi}{L} x$
3	-0,02320	0	-0,005154	wie Zahlentafel 1	$\sin \frac{3\pi}{L} x$
5	-0,00225	+0,06765	-0,000181	jedoch \times	$\sin \frac{5\pi}{L} x$
7	-0,00043	-0,01810	-0,000017	$10,5704$	$\sin \frac{7\pi}{L} x$
9	-0,00012	0	-0,000003	$5,3726$	$\sin \frac{9\pi}{L} x$
11	-0,00005	+0,00299	-0,000001	$= 1,96746$	$\sin \frac{11\pi}{L} x$

Zahlentafel 4.

Längen in m Kräfte in t	M ₂	N ₂	M ₄	N ₄
Gelenkwerk	+ 3,0234	+ 3,4050	- 103,9218	- 45,9930
Steifknotiges Tragwerk ohne Quer- scheiben	+ 4,3009	- 0,2843	+ 4,3009	+ 0,2843
Einfluß der Querscheiben	+ 0,4406	- 0,0291	+ 0,4406	+ 0,0291

Untergurte durch Anordnung von Querscheiben bzw. von Querriegeln R (Abb. 1). c) $\frac{H}{I}$ und $\frac{J_3}{J}$ < 1 bei unveränderlichem J. d) Eckverstärkung durch Vouten.

3. Einfluß der steifen Querscheiben. Diese lösen wieder zwei getrennte Wirkungen aus. a) Tritt z. B. in der nach links fallenden Diagonale Zug und in der nach rechts fallenden Diagonale Druck auf, so sind die dadurch hervorgerufenen Berührungskräfte (Gl. (24)) für die belastete Seite belastend und für die lastfreie Seite entlastend. b) Diese Verteilung erzeugt auf der Lastseite positive und auf der Gegenseite negative Eckmomente, welche entsprechend den Ausführungen unter Punkt 2 im Gegensatz zu a) auf der belasteten Seite entlastend und auf der lastfreien Seite belastend wirken.

Mit einem Vorzeichenwechsel der Diagonalkräfte ist auch eine Umkehrung der Be- und Entlastungswirkung verbunden. a und b beeinflussen also die Lastverteilung immer im entgegengesetzten Sinne. Es ist jedoch fast immer der für die Lastverteilung günstige Einfluß auch der absolut größere, so daß eine lastverteilende Wirkung der Querrahmen immer vorhanden ist. Es können aber, wie es bei den durchgerechneten Zahlenbeispielen eingetreten ist, beide Einflüsse nahezu gleich groß werden, so daß der lastverteilende Effekt der Querrahmen nicht allzu groß wird. Wie schon unter Punkt 2 erwähnt wurde, erhöht der durch die Querscheiben erzielte untere Zusammenschluß des Tragwerkes die Seitensteifigkeit der Untergurte, wodurch die lastverteilende Wirkung erhöht wird. Gewöhnlich sind die in die Trägermitte gelegten Querscheiben günstiger als die in den Drittel- und Viertelpunkten angeordneten.

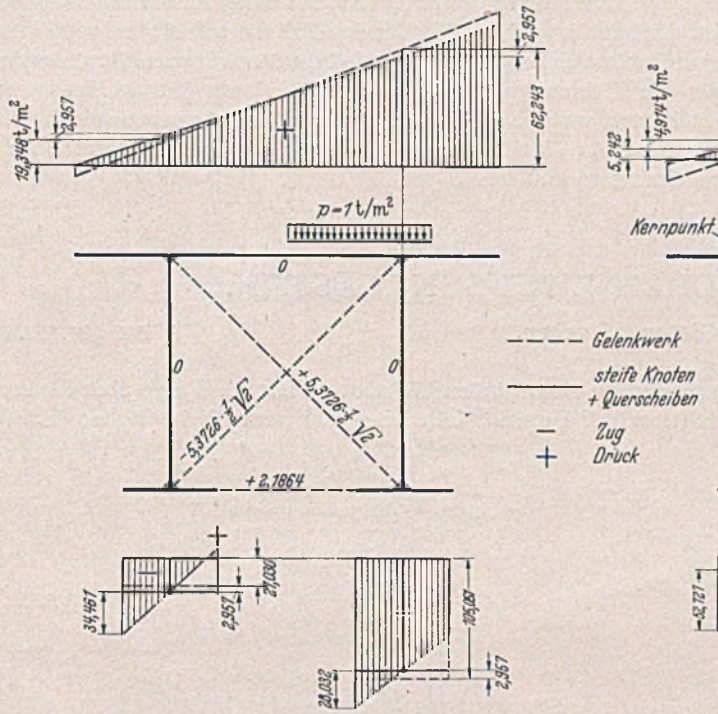


Abb. 5 a.

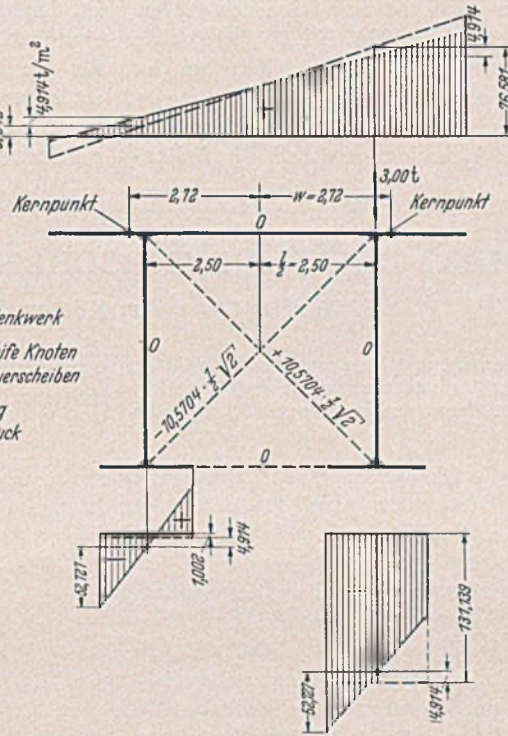


Abb. 5 b.

G. Schlußbetrachtung.

Die lastverteilende Wirkung setzt sich aus drei Einflüssen zusammen.

1. Die Faltwerkswirkung selbst. Trennen wir durch die Schnitte n — n und n' — n' (Abb. 1) die Scheibe 23 vom übrigen Tragwerk los, so wird die durch die Linienlast P erzeugte Schubkraft τ_3 die Scheibe 23 längs der Kante 3 zusammendrücken. Liegen die Kernpunkte der Scheibe 23 außerhalb der Tragwandanläufe 2 und 3, so wird τ_3 auch eine Zusammendrückung der Erzeugenden 2 von 23 zur Folge haben, welche sich auf die Oberkante der Scheibe 12 teilweise überträgt. Dadurch entsteht in der Scheibengruppe [01, 12] unten Zug, das heißt die linke Tragwerkshälfte übernimmt einen Teil der Last P. Ein Mittragen der zweiten Tragwand, also eine Lastverteilung in der Querrichtung findet also nur dann statt, wenn die Kernpunkte der Fahrbahnplatte außerhalb der Anschlußpunkte 2 und 3 liegen. Je größer nun das Verhältnis $\frac{2w}{l}$ wird, um so mehr wird die zweite Tragwand zur Mitwirkung herangezogen (siehe Abb. 5b).

2. Die Wirkung der steifen Ecken. Wie sich aus den im vorigen Abschnitt durchgeführten Rechenbeispielen ergibt, entsteht bei einseitiger Belastung auf der Lastseite ein positives und auf der Gegenseite ein negatives Eckmoment. Beide entlasten die belastete und belasten die lastfreie Seite. Sie wirken also lastverteilend. Alle Umstände, welche große Eckmomente hervorrufen, beeinflussen also die Lastverteilung im günstigen Sinne. Solche Umstände sind: a) Großes seitliches Trägheitsmoment $\bar{\theta}$ der Querscheiben. b) Vergrößern der seitlichen Steifigkeit dieser

Unterstützung erhöht wird. Gewöhnlich sind die in die Trägermitte gelegten Querscheiben günstiger als die in den Drittel- und Viertelpunkten angeordneten.

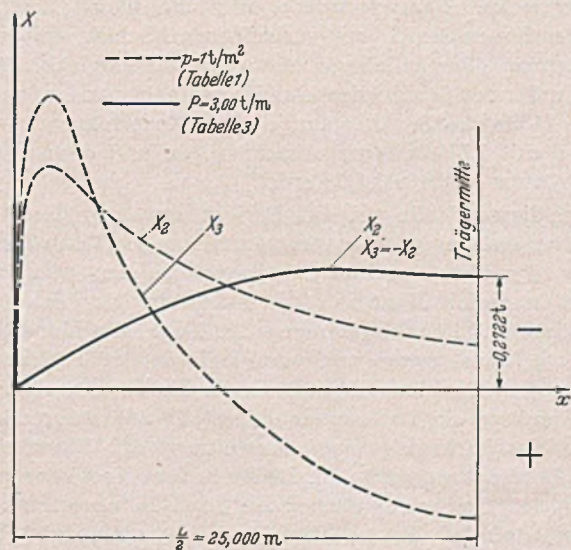


Abb. 5c. Eckmomente des querscheibenlosen Tragwerkes.

Das Vorzeichen der Strebenkräfte dieser Querverbände hängt von den Verformungen des querscheibenlosen Faltwerkes ab. Diese setzen sich hauptsächlich aus zwei Teilen zusammen. a) Im gelenkigen Faltwerk biegt sich infolge der einseitigen Belastung die

Scheibe 34 stärker durch als die Scheibe 12, was in der Strebe 24 Zug- und in 13 Druckspannungen zur Folge hat. b) Durch die Steifknotigkeit bei 2 und 3 entstehen entsprechend Punkt 2 gerichtete Eckmomente, welche die Kanten 1 und 4 nach links und die Scheibe 23 nach rechts drücken, wodurch sich die Diagonale 24 verkürzt und 13 verlängert. Diese Verformung erzeugt also im Gegensatz zu a) in 24 Druck und in 13 Zug. Ob nun die Wirkung a) oder b) überwiegt, hängt von den gegenseitigen Steifigkeits- und Maßverhältnissen ab. Fast immer ist jedoch b) absolut größer, so daß, wie auch in unserem besonderen Beispiel, die Diagonale 24 Druck bekommt. Außer diesen beiden Verformungen a) und b) verschiebt sich infolge der stärkeren Verkürzung der Faser 3 der Fahrbahnplatte der ganze Brückenquerschnitt nach links, was eine Vergrößerung der Eckmomente X_2 und X_3 und somit eine Verstärkung der Wirkung b) zur Folge hat. Infolge des großen seitlichen Trägheitsmoment Θ_3 der Fahrbahnscheibe ist diese dritte Art der Verformungen nicht groß und spielt besonders bei der Entstehung der Querrahmenkräfte keine besondere Rolle.

Wird beim Fehlen von Querscheiben, aber sonst gleichen Verhältnissen, die Gesamtstützweite L kleiner, so wird die Seiten-

steifigkeit der Untergurte größer, das heißt, die Lastverteilung wird günstiger. Da andererseits mit abnehmendem L wieder bei sonst gleichen Umständen die die Berührungskräfte P_n bedingenden Durchbiegungen ξ kleiner werden, sinken dementsprechend die P_n gegenüber der gleichbleibenden äußeren Belastung. Die lastverteilende Wirkung der Querrahmen nimmt also bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen mit der Gesamtstützweite L ab. Eine zwischenknotliche Belastung schwächt im allgemeinen jede lastverteilende Wirkung. Wie aus der Abb. 5c ersichtlich ist, sind bei einem querscheibenlosen steifknotigen Tragwerk die Eckmomente in der Nähe des Auflagers größer als in Tragwerksmitte, da die Untergurte am Auflager einer seitlichen Kraft weniger nachgeben als in der Mitte.

Die Konvergenz sämtlicher auftretenden Fourierschen Reihen ist eine hervorragende. Nur für den Fall der schon oben erwähnten zwischenknotlichen Belastung wird die Konvergenz allerdings nur für die Eckmomente des querscheibenlosen Tragwerkes etwas schlechter, was jedoch für die praktische Rechnung wenig Bedeutung hat, da diese Eckmomente nur als Zwischenresultat in Erscheinung treten.

DICHTUNG DER FUGE ZWISCHEN ZWEI SENKKÄSTEN.

Von Dipl.-Ing. Fr. Kötter, München.

DK 624.157.385

Übersicht: Kritische Betrachtung über verschiedene Arten der Herstellung des Aushubs und der Ausbetonierung der Fuge zwischen zwei Senkkästen. Tabelle über den Arbeitsaufwand nach Erfahrungswerten.

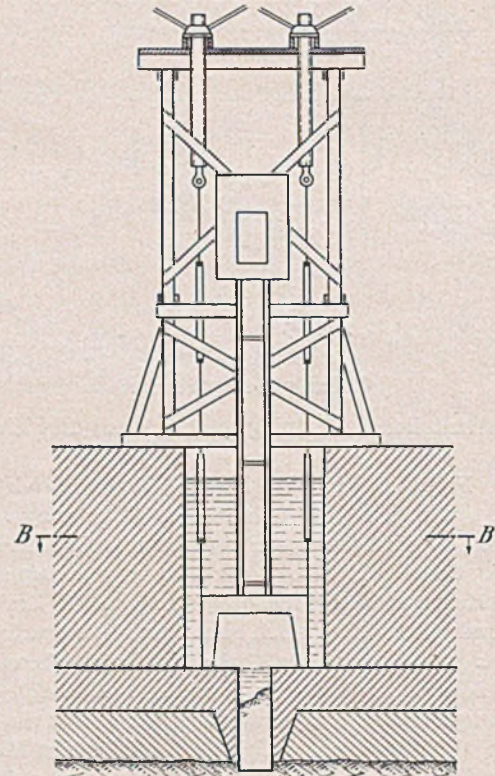
Bei der Anwendung von Senkkästen zur Gründung von Wehren, Talsperren, teils auch Ufermauern spielt die Frage, in welcher Weise die zwischen zwei Senkkästen entstehende Fuge sich abdichten läßt, stets eine wesentliche Rolle. Brennecke gibt in seinem „Grundbau“ eine Zusammenstellung der vielfach angewendeten, durchaus verschiedenen Lösungen. Wenn Brennecke zum Schluß zu der Feststellung kommt, „daß die Ausführung mit der Taucherglocke als ultima ratio anzusehen ist“, wird heute nicht jeder Ingenieur, der solche Fugen selbst ausgeführt hat, bedingungslos zustimmen. Ich glaube im Gegenteil, daß diejenigen, welche überhaupt in solchen Fällen mit der Taucherglocke gearbeitet haben, die dabei auftretenden Schwierigkeiten als Grundbedingung betrachten, nach einer einfacheren und sicheren Ausführung der Fugenausfüllung zu suchen. Ich bringe in Abb. 1 die Skizze für eine Ausfüllung der Fuge mit dem Verfahren der Taucherglocke. Der wesentliche Einwand bleibt, den zwischen den eigentlichen Senkkästen verbleibenden Schlitz sauber reinigen und auch ausfüllen zu können; denn die Taucherglocke kann nicht bis zur untersten Senkkastenschneide gebracht werden, und es muß auf die Höhe des Senkkastens je nach Konstruktion 2—3 m das Material mit Löffelschaufeln hochgezogen und dann der Schlitz unter Wasser ausbetoniert werden.

An dieser Stelle sei ein Bericht erwähnt, den Dipl.-Ing. Burkas auf der 35. Hauptversammlung des Deutschen Betonvereins 1932 über Druckluftgründungen gegeben hat. In diesem Bericht beschrieb Burkas die Ausfüllung der Fuge zwischen 2 Senkkästen. Zur Abdämmung der Fuge, die eine Breite von rd. 80 cm hatte, waren von vornherein in der Senkkastenstirnwand Anschlußbohlen vorgesehen. In die Fuge wurde während des Absenkens ein Larsenpaar eingestellt und während des Absenkens nachgerammt. Nach Ausführung der Rammung dieser beiden Bohlenpaare wurde der Boden in dem geschlossenen Fugenraum mittels Greifer ausgehoben und durch Beton ersetzt. Burkas erwähnt, daß bei diesem Verfahren schon die tatsächlich eingetretenen Hindernisse bei dem Nachtreiben der einzelnen Bohlen vorausgesehen wurden. Die Bohlen sprangen aus den Schlössern. Trotzdem sei es aber vollauf gelungen, durch zusätzliche Dichtungsarbeiten sämtliche Fugen ordnungsgemäß abzuschließen. Angaben über Kosten oder Zeitaufwand wurden nicht gemacht.

Der Verfasser übernahm im Jahr 1929 die Ausführungs-

arbeiten an einer großen Wehrbaustelle. Die Frage über die Ausführung der Fugen spielte eine sehr wesentliche Rolle; denn es

Aufriß und Schnitt A-A



Grundriß und Schnitt B-B

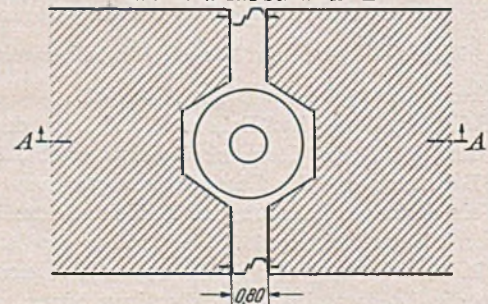


Abb. 1. Räumen der Fuge mit Taucherglocke. Fugenbreite 80 cm. Abdichtung durch ein Larsenpaar zwischen den Senkkästen.

handelte sich bei insgesamt 38 Senkkästen — 4 aus Eisen, die übrigen aus Stahlbeton — um die Ausbetonierung von 28 Fugen. Hierbei konnte der Verfasser auf die bei einem im Jahre 1921/22 ausgeführten Wehr gemachten Erfahrungen zurückgreifen.

An dieser Ausführung 1921/22 waren 3 Fugen auszufüllen. Bei der 1. Fuge wurde die Taucherglocke angewendet. Aber es zeigten sich zahlreiche Schwierigkeiten. Abgesehen davon, daß die Abrammung der Fugen nicht genügend dicht war und durch die ausführende Druckluft immer wieder gelockert wurde, bestand

abzudichten (siehe Abb. 2). Es gelang, die Fugen bis zur Senkkastenschneide zu reinigen; aber die Aufwendungen waren außerordentlich hoch. Der Hauptgrund lag darin, daß die Senkkästen nicht genau gerade standen. Infolgedessen war die Abdichtung, besonders im untersten Teil, äußerst schwierig. Die Wasserhaltung erforderte einen hohen Aufwand. Verständlicherweise ging der Vortrieb sehr langsam wegen der Enge des Schlitzes, der viel zu wenig Bewegungsmöglichkeit bot, um Dichtungs- und Aushebarbeiten durchzuführen.

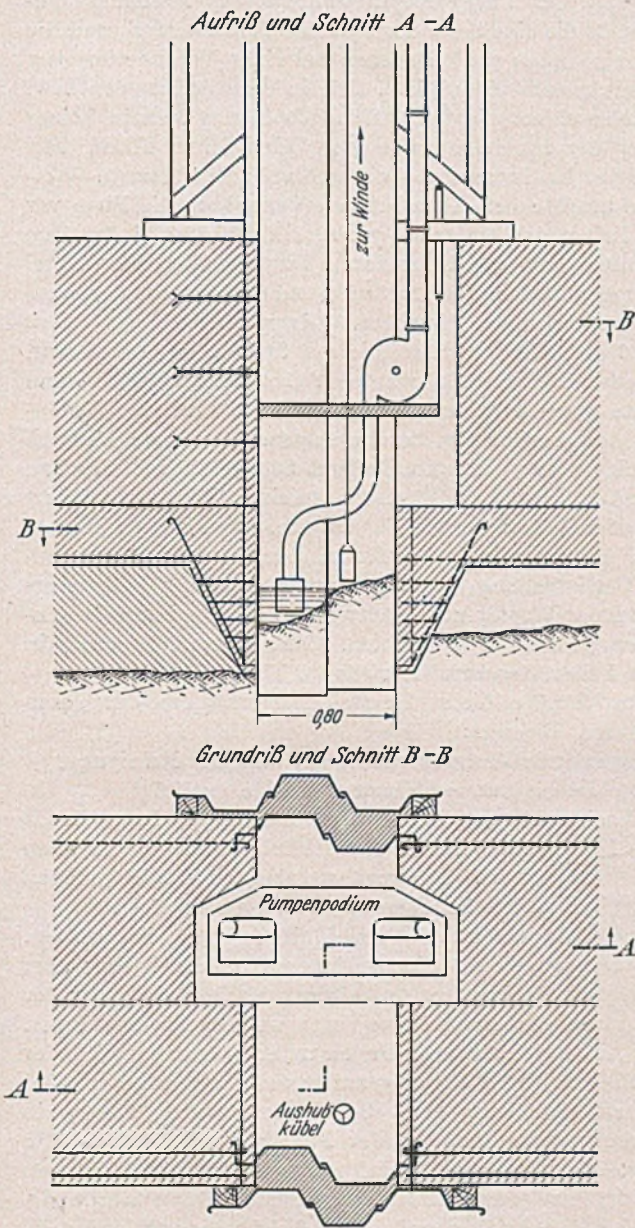


Abb. 2. Räumen der Fuge unter Wasserhaltung, Fugenbreite 80 cm. Abdichtung durch ein Larsenpaar. Zwischen den Senkkästen eine zusätzliche Larsenwand. Zwischenraum mit Holz und Beton abgedichtet.

die Hauptschwierigkeit in dem Absenken der Glocke; denn die Senkkästen hatten sich in ihrer Lage etwas verändert, so daß der im Aufbau vorgesehene trapezförmige Schlitz nicht genau für das Einfahren der Taucherglocke stimmte. Es waren kleinere Nacharbeiten erforderlich. Sowohl die Dauer der Arbeiten als auch der Verbrauch an Arbeitsstunden, wie aus der am Schluß der Darlegungen beigegebenen Zahlentafel ersichtlich ist, waren so außerordentlich, daß für die 2. Fuge eine weitere Verwendung der Taucherglocke nicht in Frage kam, sondern sich die Auffassung durchsetzte, daß eine Ausführung mit offener Baugrube unter Wasserhaltung rascher zum Ziele führen könnte. Bei den beiden weiteren Fugen wurde nun versucht, von vornherein außer dem Spundbohlenpaar zwischen den beiden Senkkästen eine zweite Larsenwand vor die Fuge zu stellen und so gut wie irgend möglich

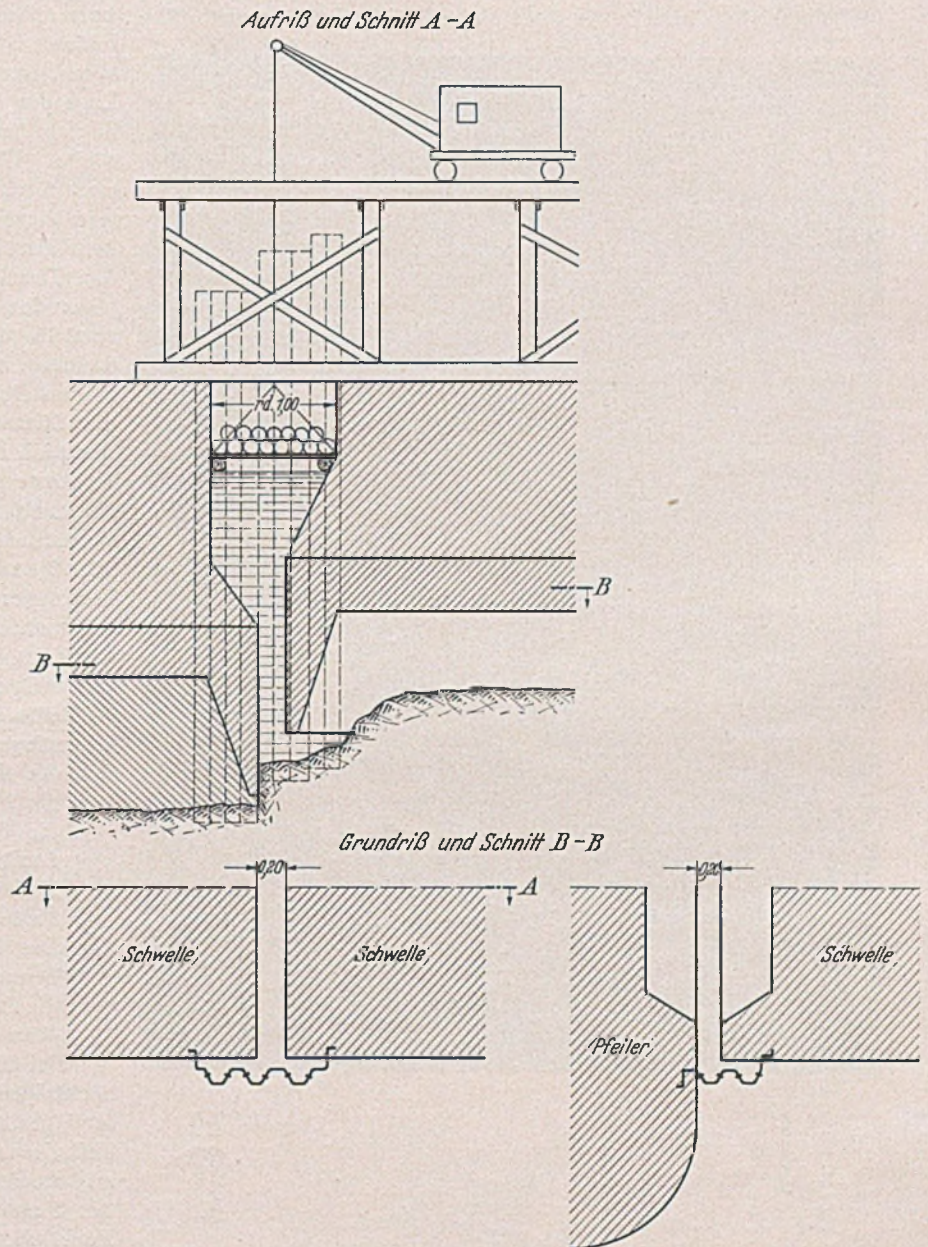


Abb. 3. Räumen der Fuge während des Absenkens eines Kastens. Fugenbreite 20 cm. Abdichtung durch Spundbohlen an der Außenwand des Senkkastens.

Bei den im Jahre 1929—33 durchgeführten Druckluftarbeiten waren bei Übernahme der Bauleitung durch den Verfasser bereits Fugen begonnen, wobei folgender Bauvorgang vorgesehen war: Abrammen des Fugenschlitzes, Wasserhaltung mit Aushub unter freier Luft (siehe Abb. 2). Wie bei den im Jahre 1921/22 ausgeführten Arbeiten zeigte sich die Schwierigkeit, den unteren Teil des Fugenschlitzes zu reinigen. Bei den weiteren Fugen wurde ein Verfahren angewendet, welches sich auf die Erfahrung gründete, daß außerhalb des Senkkastens oder unter der Schneide liegende Hindernisse, wie z. B. kleinere Felsblöcke, Eisenteile, Holzstrünke usw., am leichtesten beseitigt werden, wenn man sie in den Arbeitsraum des Senkkastens hereinzieht. Mithin war der Versuch naheliegend, Material außerhalb der Senkkastenschneide, wenn es durch Abrammung abgeschlossen ist, dadurch zu be-

seitigen, daß es in den Arbeitsraum des Senkkastens herein-gezogen und normal durch die Materialschleuse gefördert wird. Hierbei wurde vorausgesehen, daß diese Art der Räumung der Fuge nur von Zeit zu Zeit erfolgen könnte, da während solcher Arbeiten sehr große Druckluftverluste entstehen. Wenn der erste Versuch nicht wunschgemäß gelang, so lag der Fehler nur an der Form der Abrammung. Das zwischen die beiden Senkkästen ein- gestellte Spundbohlenpaar erschwerte die Absenkung außerordent- lich. Wie schon beschrieben, riß das Spundbohlenpaar aus und viel Material strömte in die Fuge ein. Somit erforderte auch hier

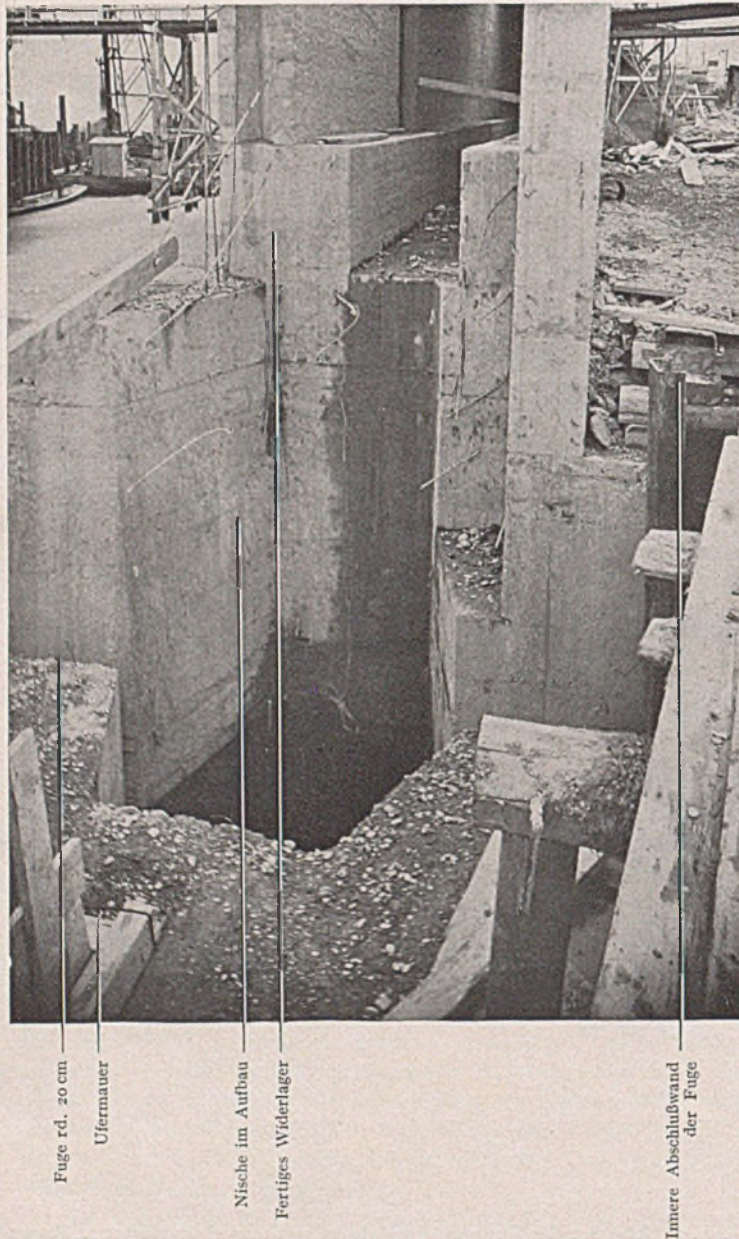


Abb. 4. Fuge zwischen Widerlager und Ufermauer.

die Reinigung einen erheblichen Aufwand. Es handelte sich dabei um die in der Zahlentafel unter Nr. 5—6 aufgeführten Fugen.

Für die weiteren Ausführungen diene nun die Überlegung, daß das Hereinziehen des Materials der Fuge in den Arbeitsraum des Senkkastens zweifellos die richtige Lösung war; denn nur durch diese Bauausführung wurde unter allen Umständen die voll- kommene Leerung der Fuge erreicht und auch die Kontrolle er- möglicht, daß in der Fuge auf die gesamte Fugenbreite die gleiche Gründungstiefe wie für die Senkkästen besteht. Allerdings war es notwendig, eine andere Form der Schutzwand zur Verhinderung des Einströmens weiteren Materials in die Senkkastenfuge zu finden. Die Fugenabdämmung soll keine große Einschränkung der freien Bewegungsmöglichkeit des absinkenden Senkkastens herbei- führen und, wenn möglich, eine Verkleinerung der großen Breite von etwa 80 cm zulassen. Gleichzeitig mußte der anfänglich auf-

tretende sehr hohe Druckluftverlust beim Öffnen der Stirnseite zum Leeren und Hereinziehen des Fugenmaterials herabgesetzt werden.

In der Abb. 3 ist das Ergebnis dieser Versuche darge- stellt. Die Art des Fugenaushubes hat sich am besten bewährt und ist dabei auch als am wirtschaftlichsten festgestellt wor- den. Es werden dabei 3 Spundbohlenpaare verwendet zum Abschluß der Fuge gegen das einströmende Material. Diese 3 Spundbohlenpaare wirken, fast kann man sagen, wie eine Zieh- harmonika. Da der Fugenaushub während des Absenkens ge- schieht, ist stets die eine Seite der Spundbohlenwand frei, und die Wand kann sich auch nach Belieben bei einer Veränderung der Lage des Senkkastens eindrücken. Die in dem Senkkasten bzw. in dem Aufbau einbetonierten Führungsbohlen stören in keiner Weise. Über der Fugenbaugrube steht ein kleiner Kran. Mit diesem wird das Nachrammen der Abschlußbohlen besorgt. Wei- tere Vorteile brachte der Kran bei den Versuchen, die Fuge vor dem Hereinziehen des Materials provisorisch abzuschließen, um den Druckluftverlust zu vermindern. Das naheliegende Mittel gegen den großen Druckluftverlust während der Leerung der Fuge war das Aufsetzen eines Pfropfens. Dieses geschah anfänglich dadurch, daß eine alte Matratze, die mit Steinen beschwert war, in den Fugenschlitz versenkt wurde. Anschließend wurde dann die Stirnseite vom Arbeitsraum aus geöffnet und das Fugen- material in den Senkkasten hereingezogen. Der erste Versuch bewährte sich so gut, daß anschließend Säcke, die mit Seegras, Sägemehl und Holzwolle gefüllt waren, zu einem Pfropfen geformt wurden, der ziemlich gut in die Fuge paßte. Dieser Pfropfen ver- schloß dann jedesmal die Fuge während der Leerung. Nach voll- kommener Fertigstellung des Fugenaushubs erfolgte die Aus- betonierung unter Wasser und später das Ziehen der zum Fugen- abschluß verwendeten Spundbohlen. Hierzu genügte auch in den meisten Fällen der bereits erwähnte kleine Kran.

Besondere Vorzüge dieses Herstellungsverfahrens der Senk- kastenfugen sind folgende:

1. die einwandfreie Feststellbarkeit der völligen Reinigung,
2. die Fuge ist bis zur Senkkastenschneide gereinigt,
3. die Schneide des anschließenden Senkkastens kann durch Sonden festgestellt werden. Tatsächlich wurde dies in allen Fällen durchgeführt. Es wurden dabei auch die genauen Maße zwischen den Senkkastenschneiden festgelegt.
4. Die Fuge braucht nur 20 cm breit angelegt zu werden. Theoretisch wäre auch eine geringere Breite möglich; aber die Breite des Rohres zur Ausführung der Betonierung unter Wasser verhindert eine weitere Verengung des Fugenschlitzes.

Bei der Ausbetonierung der Fugen unter Wasser hat sich der nachfolgend beschriebene Vorgang am besten bewährt. Nach der fertiggestellten Absenkung eines Senkkastens wurde zuerst ein Teil des Arbeitsraumes auf der der Fuge abgewendeten Hälfte ausbetoniert. Meist lag zum Schluß noch ein Gang frei, der von der Fugenstirnwand zur Luftschleuse führte. Dann wurde die Fuge, wie oben beschrieben, möglichst dicht verstopft und rest- los gereinigt. Anschließend erfolgte die Abstellung der Luft. So blieb der Senkkasten einige Tage stehen. Nach Herausnehmen des Pfropfens wurde der Fugenraum unter Wasser, meistens mit hochwertigem Zement, ausbetoniert. Beim Wiedereinblasen der Luft in den Senkkasten — dies erfolgte nach etwa 14 Tagen, sehr langsam — wurde der letzte Rest des Arbeitsraumes im Senk- kasten mit Beton gefüllt. Vor dieser Ausbetonierung wurde noch die ordnungsgemäße Füllung der Fuge und der Zustand des Fugen- betons nachgeprüft.

Bei dieser Zahlentafel kann eingewendet werden, daß für die Fugenausführung mit Taucherglocke oder Wasserhaltung die Auf- wendungen an Arbeitsstunden und Material sich ziemlich genau feststellen lassen. Wenn die Reinigung der Fugen mit dem Ab- senken des Senkkastens erfolgt, dann sind die Rammarbeiten für die Abdämmung der Fuge, Transporte und Rüstungen sowie das Ausbetonieren der Fuge unter Wasser einwandfrei in den Rap- porten zu erfassen. Dagegen müssen alle übrigen Aufwendungen, hauptsächlich der vergrößerte Verbrauch an Druckluft während

Zahlentafel über Arbeitsaufwand bei Ausführung des Aushubs und der Betonierung der Fugenschlitze zwischen zwei Senkkästen.

Lfd. Nr.	Jahr	Art der Ausführung	Fugenbreite etwam	mittl. Tiefe der Fuge m	Arbeitsstunden rd.	
1	1921/22	Taucher- glocke	0,80	12,5	11 000	
2	1921/22	Wasser- haltung	0,80	12,5	7 800	
3	1921/22	„	0,80	12,5	6 200	
4	1929/32	„	0,80	15,0	10 300	
5—6	1929/32	mit Senk- kasten- aushub	0,50	15,0	2 600	Mittel von 2 Fugen
7	1929/32	„	0,30	15,0	2 100	
8	1929/32	„	0,25	15,0	1 800	
9	1929/32	„	0,20	14,0	1 600	
10—25	1929/32	„	0,20	14,0	1 300	Mittel von 16 Fugen
26—31	1929/32	„	0,20	12,0	1 000	Mittel von 6 Fugen

des Hereinziehens des Materials in den Arbeitsraum, der Aufwand für das Öffnen und Schließen an der Stirnseite, der normalerweise mit den Aushubarbeiten im Senkkasten selbst zusammenfällt, als Schätzung angesehen werden. In zwei Fällen hat der Verfasser für den Aushub einer Fuge einschl. Wasserhaltung folgende Aufwendungen festgestellt: Der Senkkasten hatte eine Grundfläche von 58,96 m² und wurde im Kies 5,50 m und im wasserhaltigen Letten 8,80 m tief abgesenkt. Die Aufwendungen für das Abdichten der Fuge einschl. Wiederentfernen waren 1396 Stunden. Der Aushub in der 80 cm breiten Fuge einschl. Wasserhaltung erforderte einen Aufwand von 5761 Stunden. Die Betonierung des unteren Teiles in freier Luft und der darüberliegenden Fuge selbst

unter Wasser erforderte 1164 Stunden, also insgesamt 8321 Stunden. Hierzu kommen noch die anteiligen Kosten für die allgemeine Einrichtung. Im Gegensatz dazu betrug für 5 Senkkästen mit einer Grundfläche von 120—130 m² der Stundenaufwand für Transporte und Abstellen der in diesem Falle nur 20 cm breiten Fuge 314 Stunden. Das Betonieren unter Wasser erforderte einen Stundenaufwand von rd. 460 Stunden im Durchschnitt. Aus diesen Zahlen ist zu entnehmen, daß keinesfalls die Aufwendungen erreicht werden, welche für die Herstellung einer Fuge mit der Taucherglocke oder Wasserhaltung notwendig sind. Leider kann auf die eingangs erwähnte Ausführung des Fugenaushubs mittels Greifer nicht eingegangen werden, weil hierzu die erforderlichen Zahlen fehlen. Es muß aber auch bei dieser Ausführung mittels Greifer beachtet werden, daß vorerst nicht klar ist, in welcher Weise die Grundbedingung der Leerung der Fuge bis auf die Senkkastensohle erfüllt worden ist. Die Möglichkeit ist naheliegend, daß nur ein Teil der Fuge in der Mitte bis auf die Tiefe der Senkkastensohle aufgehoben wurde und somit die Fuge nicht auf die gesamte Breite mit Beton ausgefüllt ist. Diese Ausführung kann in entsprechend gelagerten Fällen als nicht genügend sicher angesehen werden, so daß vorläufig auf die nähere Betrachtung dieser Ausführungsart absichtlich verzichtet wird.

Die als Abb. 4 gezeigte Aufnahme stellt die Fuge zwischen einem Widerlager und anschließender Ufermauer dar. Auf dem Bild ist der etwa 20 cm breite Schlitz zwischen den Senkkastenaufbauten erkenntlich und die innere Abschlußspundwand der Fugen. Die trapezförmige Aussparung im Widerlager und Uferaufbau hat eine Tiefe von etwa 80 cm. Das Bild ist in einem Bauzustand aufgenommen, in welchem das Widerlager fertig und der anschließende Ufersenkkasten die Sohlentiefe erreicht hat. Die Fuge selbst ist freigemacht zur Einbringung des Betons unter Wasser.

Schlussbemerkung: Es wäre erwünscht, wenn noch weitere Erfahrungen und Versuche über die Abdichtung von Fugen zwischen Mauerkörpern unter Wasser veröffentlicht würden, da mit der zunehmenden Anwendung von Druckluftgründungen diese Frage besondere Bedeutung gewinnt.

KURZE TECHNISCHE BERICHTE.

Die Talsperre von Pannesière-Chaumard (Nièvre).

Die Staumauer von Pannesière-Chaumard (Nièvre) liegt an der Yonne am Anfang des Zuführungsgrabens zum Kanal von Nivernais (Abb. 1). Sie soll einen Wasservorrat von 82,5 Mio m³ schaffen:

1. zur Regulierung der Yonne und damit auch der Seine,
2. zur besseren Speisung des Kanals von Nivernais, und
3. zur Erzeugung von elektrischer Kraft.

Der Gedanke, die Wassermenge der Seine mit Hilfe von Staubecken zu regulieren, ist entstanden aus der Sorge, das Pariser Gebiet gegen die Überflutungen des Flusses zu schützen. Nach dem Hochwasser von 1910 ist schon verschiedentlich auf die Schaffung künstlicher Seen von einigen hundert Millionen Kubikmeter Inhalt hingewiesen worden. Aber die geologischen Verhältnisse des Seinebeckens, die die Anlage der Staubecken nur sehr weit oberhalb des zu schützenden Gebietes erlaubten, hätten eine sehr fühlbare Schwächung dieser Wasservorräte nach sich gezogen. Wegen dieser beträchtlichen Schwierigkeiten lief das große Bauprogramm Gefahr, nicht verwirklicht werden zu können, wenn nicht noch ein günstiger Umstand hinzugekommen wäre.

Zur Zeit des tiefsten Wasserstandes fällt die Wassermenge der Seine auf 35 m³/s. Zu dieser Wassermenge kommen für das Pariser Gebiet noch ungefähr 17—18 m³ gepumptes Wasser, der Rest reicht kaum für die Schifffahrt aus. Darüber hinaus wären für die Kühlgefäße der Wasserwerke des Pariser Gebietes weitere Pumpstationen nötig. Das Wasser ist in der Nähe des Entnahmeortes zwar leicht ersetzbar, hat aber eine etwas höhere Temperatur, wodurch eine übermäßige Gärung in der warmen Jahreszeit hervorgerufen wird, ein Zustand, der vom hygienischen Standpunkt aus untragbar ist. Um diesen mangelhaften Verhältnissen abzuhelfen, hat man sich dazu entschlossen, den Fluß während der trockenen Jahreszeit zu speisen, um auf der Stromstrecke bei Paris eine weit höhere Wassermenge zu erhalten, als für die Wasserversorgung und die Schifffahrt nötig ist. Daher spielen die in den Hochtälern des Seinebeckens zu erbauenden Staumauern eine doppelte Rolle: sie sollen einmal das Hochwasser der Seine günstig beeinflussen und zum anderen die Wassermenge des Flusses während der Trockenzeit erhöhen. Beide Wirkungen sind gleich wichtig. Das große Fassungsvermögen der Wasserbecken würde die Aufspeicherung eines erheblichen Teils der

Hochwasser gestatten, ferner würden die Stauwassermengen ohne fühlbare Veränderung des Spiegels der Wasserläufe abfließen und demzufolge fast ausschließlich den Flüssen zugute kommen können, vorausgesetzt, daß die Flüsse oberhalb von Paris möglichst auf ihrem ganzen Lauf durch durchlässiges Gelände kanalisiert würden.

Nach eingehenden Studien und Prüfungen des Programms der im Jahre 1925 durch den Minister der öffentlichen Arbeiten gegründeten

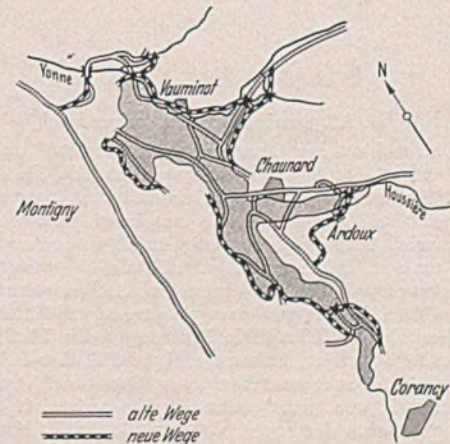


Abb. 1. Kartenplan des Staubeckens von Pannesière-Chaumard.

Sonderkommission entschloß sich das Département der Seine, zunächst folgende vier Staumauern zu bauen:

die beiden Staubecken von Crescent und von Bois de Chaumeçon, die seit 6 Jahren bereits im Dienst stehen und die zusammen eine Reserve von 24 Mio m³ darstellen, sowohl zur Verminderung des Hochwassers als auch zur Verbesserung der Wasserhältnisse während des Niedrigwassers;

das seit 3 Jahren im Dienst stehende Staubecken von Champaubert-aux-Bois mit einem Fassungsvermögen von 23 Mio m³ und das Staubecken von Pannesière-Chaumard, das im vorliegenden Aufsatz behandelt wird.

Das im Bau befindliche Staubecken von Pannesière-Chaumard (Abb. 2) wird durch die Staumauer des Yonne-Tales gebildet, die in der Mitte eines Mauerdammes in den Gebieten der Gemeinde Montigny-en-Morvan und Chaumard ungefähr 700 m oberhalb der Brücke von Pannesière errichtet wird und ungefähr 15 km von Château-Chinon entfernt liegt. Der Stausee erstreckt sich über das Gebiet der Gemeinden Montigny-en-Morvan, Chaumard, Ouroux und Corancy im Département Nièvre.

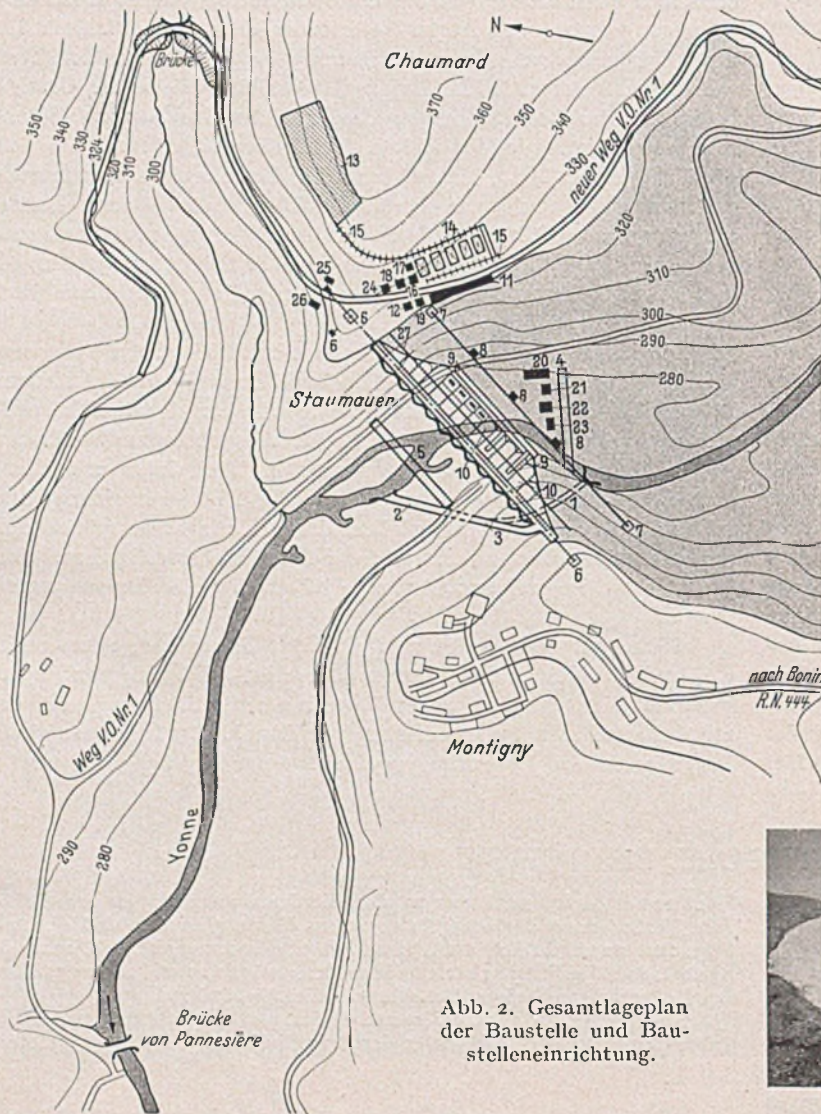


Abb. 2. Gesamtanlageplan der Baustelle und Baustelleneinrichtung.

Allgemeine Betrachtungen.

Das Staubecken hat eine Oberfläche von 225 km² und umfaßt die höchsten Erhebungen des Morvan, auf welchen die Flußablagerungen sehr stark sind. Es besteht aus Granit, so daß es vollkommen undurchlässig ist und sehr reißende Flußläufe zur Folge hat.

Der Damm wird auf feinkörnigem Granit von sehr schöner Farbe gegründet, der an den Talseiten jäh abfallende Felswände bildet. Die angestellten Bohrversuche haben einen festen und gesunden Fels ergeben mit einer Mächtigkeit von nur 3—4 m, sowohl auf dem rechten als auch auf dem linken Ufer. Die Bohrungen im Flußbett, das aus alluvialen Schichten besteht, haben gezeigt, daß der Felsgrund unter einer Decke von Geröll und wasserhaltigem Sand leicht zu erreichen ist und eine Mächtigkeit von nicht mehr als 6 m aufweist.

Der Morvan ist eine der regenreichsten Gegenden Frankreichs, die jährliche Regenmenge beträgt etwa das 2- bis 3fache derjenigen des Pariser Gebietes. Diese hohe Niederschlagsmenge fällt im Winter als Schnee in der gleichen Menge wie im Sommer als Regen. Nach Belgrand „La Seine“ kommen den Flußläufen allerdings nur die Winterregen zugute, da die Verdunstung, die noch durch die Vegetation erhöht wird, im Sommer sehr groß ist. Im Winter fließt das Wasser sehr schnell über die Abhänge und verursacht kurze aber heftige Hochwasser, deren Strömung auf den Ebenen mit den torfhaltigen Wiesen nur wenig gemildert wird. Das Wasser ist aber sehr rein und enthält keinerlei Abfall- oder erdige Bestandteile, die ein Staubecken verschlammten könnten.

Die Prüfung der Regenverhältnisse und der Wassermengen der Flüsse hat ergeben, daß eine ständige Füllung des Staubeckens gewährleistet ist.

Das Staubecken ist 7,5 km lang und erreicht bis auf 1 km das große Dorf Corancy. Bei einem Stauziel auf Ordinate 324,00 wird die Wasseroberfläche 520 ha betragen, die mittlere Breite ungefähr 800 m, also mehr als die Hälfte der Länge. Das Staubecken hat drei Buchten: auf dem rechten Ufer das Tal des Mignage und des Anzin mit 1,7 km und das Tal des Houssière mit 2 km Länge, auf dem linken Ufer als dritte Bucht ein 1 km langes Tal. Durch den Stau werden mehrere im Talgrund gelegene Wege überflutet oder auch unterbrochen werden.

Das Gesamtprogramm der Wiederherstellung der Verkehrswege, das auch den Neubau von fünf bis zu 100 m langen Brücken verlangt, sieht folgende Straßenbauten vor:

- 1,7 km große Verkehrswege,
- 11,1 km Gemeindegewege,
- 2,0 km Landwege und die Verbesserung von
- 1,8 km Gemeindegeweg, die in große Verkehrswege umgebaut werden sollen,
- 0,9 km sonstige Wege.

Die Staumauer wird ungefähr 225 m oberhalb des Zusammenflusses der Yonne mit dem Graben von Vauchisson oder dem Sturzbach von Chêne-du-Pre-Bertin errichtet, einem kleinen Zufluß des rechten Ufers, der sich ungefähr 500 m oberhalb der Brücke von Pannesière in die Yonne ergießt. Das Tal der Yonne hat am Ort der Staumauer einen trapezförmigen Querschnitt von 140 m Breite mit fast horizontalem Gelände. Da die Entfernung der Ufer eine Bogenstaumauer ausschloß, kam nur eine Schwergewichtsmauer oder eine aufgelöste Staumauer in Frage.

Zunächst entschloß man sich wegen der Einfachheit der Ausführung zu einer Gewichtsmauer. Bei weiterer Prüfung erkannte man jedoch, daß der Bau einer aufgelösten Staumauer erhebliche Vorteile bietet, denn trotz der größeren Ausführungsschwierigkeiten und des Mehrbedarfs an Schalung wirkten sich die wesentlich geringeren Betonmengen so günstig aus, daß sich eine Ersparnis für den Gesamtbau erreichen ließ. Der Talquerschnitt an der Baustelle erlaubte die Ausführung von neun Gewölben gleicher Höhe für den Mittelteil der Mauer und von nur zwei ungleicher Höhe auf jeder Hangseite, so daß durch die oftmalige Wiederholung einiger Bauteile die Ausführungskosten vermindert werden konnten.

Der zur Ausführung bestimmte Entwurf sieht eine Staumauer vor (Abb. 3), deren Mittelteil aus Gewölben zwischen Pfeilern besteht. Die Verbindung mit den Ufern erfolgt durch einen massiven Damm aus Beton, dessen Profil sich dem



Abb. 3. Ansicht der Unterwasserseite der Staumauer.

übrigen Bauwerk anpaßt. Gewölbe und Pfeiler erhalten schwache Bewehrung, der Damm wird in der Hauptsache ohne Bewehrung ausgeführt. Die Gesamthöhe der Mauer beträgt ungefähr 48 m über dem Bett der Yonne, die Kronenlänge rd. 340 m. Die Mauer ist geradlinig und umfaßt im mittleren Teil des Tales neun fast gleiche Gewölbe, die sich annähernd 47 m über das Gelände erheben (49 m über Fundamentabsatz) und eine Spannweite von 17,50 m haben. Das rechte Ufer trägt zwei verschieden hohe Gewölbe gleicher Spannweite, die durch einen ungefähr 30 m langen Massivdamm mit dem Ufer verankert sind. Die linke Seite ist ebenso ausgebildet, nur ist der Damm zur Aufnahme des Hochwasserentlastungskanals hier 75 m lang.

Als Hauptteile der Staumauer sind die Pfeiler, die Gewölbe, die Herdmauer, die Krone, die Uferverankerungen (Dämme), die Regulierungs- und Einlaufbauwerke anzusehen, die im folgenden beschrieben werden.

Die Pfeiler sind in einem Achsabstand von 17,5 m errichtet. Ihre Seitenansicht ist dreieckförmig, die Oberkante liegt auf Ordinate 324,00 (Abb. 4). Die Neigung der Stirnflächen beträgt für die Oberwasserseite 87,5 und für die Unterwasserseite 25,0 v. H. Seitlich sind die Pfeiler durch parallele Flächen begrenzt. Die Pfeilerstärken betragen an der Oberwasserseite 3,0 m, im Mittelteil 2,50 m und in der Unterwasserzone 2,0 m. Jede Veränderung der Dicke erfolgt parallel zur Unterwasserstirnmauer. An diesen Stellen sind zur Abminderung der Temperatur- und Schwindeneinflüsse mit Bitumen ausgefüllte Dehnungsfugen

angeordnet. Die erheblichen Dicken, die durch die großen Pfeilerabstände bedingt sind, verbürgen schon durch sich selbst eine gewisse Stabilität in der Längsrichtung der Talsperre und erlauben, die längslaufenden Windverbände auf ein Kleinmaß herabzusetzen. Kräftige Rippen dienen einer größeren Steifigkeit, besonders an der Unterwasserseite. Dort werden die mit leichtem Anlauf versehenen Pfeiler durch schwach überhöhte elliptische Bogen miteinander verbunden. Durch diese Anordnung, geschützt durch Werksteinverblendung, wird dem Gesamtbauwerk eine befriedigende Ansicht verliehen und das charakteristische Aussehen eines großen Viaduktes erreicht.

Die Pfeilerdrücke werden auf Fundamentsockel von etwa 4 m Breite übertragen, deren Oberfläche auf Ordinate 276,00 durchschnittlich 2 m unter dem Gelände des Talbettes liegt. Der Beton der Pfeiler setzt sich aus 300 kg Portlandzement je m³ feste Masse und den Zuschlägen mit einer Korngröße bis zu 6 cm zusammen. An den Stirnseiten der Pfeiler ist eine doppelte Flächenbewehrung aus Stahl eingelegt.

Die Gewölbe spannen sich jeweils zwischen zwei Pfeilerrücken und übertragen durch die Pfeiler den gesamten Wasserdruck auf den Fundamentkörper. Der Querschnitt der Gewölbe normal zur Längsrichtung ist halbkreisförmig und von gleicher Wandstärke. In

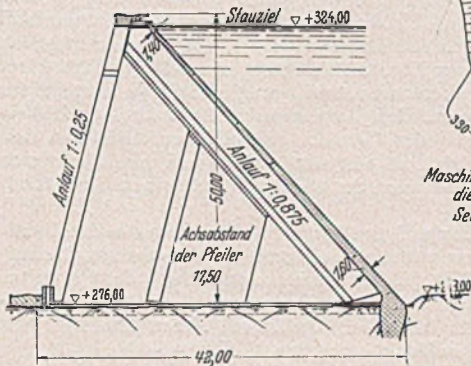


Abb. 4. Querschnitt durch die Staumauer (Mittelteil).

der Richtung der Gewölbelängsachse ändert sich die Gewölbstärke linear als Funktion der Tiefe und beträgt 0,40 m am oberen Abschluß und 1,60 m am Grunde. Die Oberfläche des Gewölberückens zeigt also die Form eines Kegelausschnittes, während die Zylinderleibung durch eine Zylinderfläche gleicher Spannweite und gleichen Krümmungshalbmessers gebildet wird. Auch für die Gewölbe wird ein Grob beton bis zu 6 cm Korngröße verwendet, die Zementmenge beträgt 400 kg je m³ Fertigbeton. Um eine möglichst große Festigkeit und damit auch eine entsprechende Dichte zu erreichen, wurde die Kornzusammensetzung durch genaue Siebanalysen vorgenommen. Durch Rütteln des Betons will man die Dichte verbessern. In der Nähe der Gewölbeleibung und des Gewölberückens ist eine doppelte Flächenbewehrung vorgesehen.

Die Herdmauer ist entsprechend der Linienführung des Bauwerkes geradlinig. Sie erstreckt sich über die ganze Länge des Oberwasserfußes und ist im mittleren Teil der Gewölbeanordnung am Gründungssockel 3,50 m dick, nimmt aber nach dem unteren Rande hin, etwa 8 m unter Gelände, auf 1,50 m Dicke ab. Um nach dem Betonieren das Dichten und Schließen von Fugen im tieferliegenden Gründungsfels zu ermöglichen, wurden für Zementeinspritzungen Röhren eingelassen.

Die Krone der Staumauer liegt auf + 326,0 und dient gleichzeitig zur Aufnahme einer 3 m breiten Landstraße mit beiderseitigen Gehwegen von 1,50 m Breite. Ein Stahlbetonbalken, der sich auf die obere Angleichungsfläche der Gewölbe stützt, vermittelt die Lastübertragung von der Landstraße.

Die Uferverankerungen werden, wie bereits erwähnt, durch massive Betondämme gebildet, deren Querschnitt sich der Pfeilerform anpaßt. Dadurch ist eine sehr einfache Überführung der Straße über die Mauer und auch die gerade Fortsetzung der oberwasserseitigen Herdmauer gegeben.

Die Regulierungs- und Einlaufbauwerke bestehen aus dem Hochwasserentlastungskanal, den Grundentleerungen und den Einläufen zur Speisung eines vielleicht zu errichtenden hydroelektrischen Krafthauses.

Für den Hochwasserentlastungskanal sind besonders zwei Zugschieber von 5 m Höhe und 4,8 m Breite von Bedeutung. Sie sind in dem Massivdamm eingebaut und leisten bei Einhaltung des normalen Stauspiegels 150 m³/s. Einer der beiden soll eine automatische Bedienungseinrichtung erhalten. Der sich an die Schieber anschließende Kanal hat eine Grundbreite von rd. 8 m. Um die Geschwindigkeit des Wassers zu erhöhen, wird man den Anfang des Kanals mit einer allmählichen Abdachung ausbilden. Damit das herabstürzende Wasser an den steilen Talseiten keine Beschädigungen hervorrufen kann, soll es durch Einbau einer Kehlleiste, einem sog. Skisprung, abgelenkt werden.

Die Form der Pfeiler, der Schwelle und der Kehlleiste an der Sohle

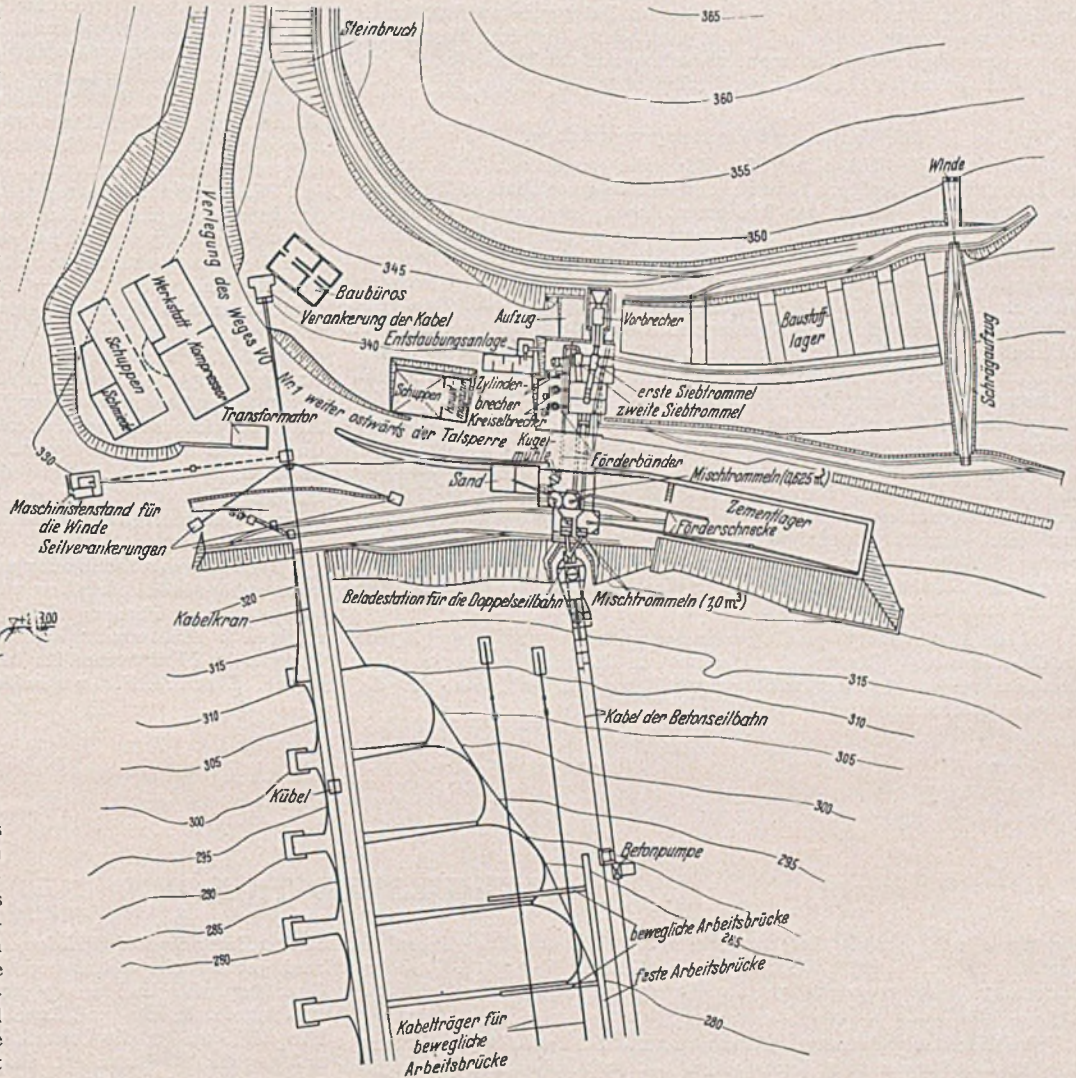


Abb. 5. Baustelleneinrichtung (linkes Ufer).

wird zur Erreichung bester Strömungsbedingungen auf Grund von Modellversuchen festgelegt. Auch auf die Kanalförmern erstrecken sich die Untersuchungen, besonders für den Unterwasserauslauf, um dem strömenden Wasser eine genügende Geschwindigkeit und eine günstige Richtung aufzuzwingen, ohne Gefahr zu laufen, dafür gefährliche Unterwaschungen in Kauf nehmen zu müssen.

Das Entleerungsbauwerk besteht aus zwei Grundablässen von je 1,30 m Durchmesser, deren Achse ungefähr auf Ordinate 278,0 vorgesehen ist. Sie durchdringen die Gewölbe, die sich in der Nähe des kleineren Flußbettes befinden. Infolge dieser Schwächung werden die Füße der betreffenden Gewölbe entsprechend verstärkt. Beide Leitungen ziehen sich bis 10 m jenseits des Unterwasserfußes der Sperre hin. Bei normalem Stauspiegel auf + 324,0 leisten sie etwas über 60 m³/s.

Die beiden Wassereinfläufe für die Speisung des in Aussicht genommenen Kraftwerkes sind ebenso wie die Grundablässe untergebracht und unterliegen auch den gleichen Bedingungen. Ihre Achse liegt jedoch auf Ordinate 279,0 und der Durchmesser ist mit 2,20 m vorgesehen. Die Leitungen sind gleich unterhalb des Gewölbes vorübergehend beendet und durch einen verkleideten Scheibenhahn verschlossen.

Hochwasserentlastungskanal und Grundentleerungen zeitigen so unter der Belastung des normalen Stauspiegels eine Gesamtleistung von 150 + 60 = 210 m³/s, was ungefähr das 3/2-fache des Hochwassers der Yonne im Jahre 1910 darstellt.

Schilderung der Baustelle.

Die Bauarbeiten der Staumauer von Pannesière-Chaumard wurden im Wettbewerb vergeben. Bei Eröffnung der Feindseligkeiten waren die Arbeiten in vollem Gange. Der Mangel an Handwerkern infolge der Mobilmachung und die Schwierigkeiten, die nötigen Lebensmittel zu erhalten, zwangen dazu, die Baustelle im September 1939 stillzulegen. Ende des Jahres 1940 wurden die Arbeiten dann wieder aufgenommen.

Das Hauptbestreben war bis zum Zeitpunkt der Baustillegung in erster Linie auf die Vorarbeiten gerichtet (Abb. 2 und 5). Sie waren sehr umfangreich und bestanden besonders in dem Bau eines Stollens zur Ableitung des Flusses, dem Bau des Oberwasser- und Unterwasserfangdammes, um die Baustelleneinrichtung vor dem Wasser zu schützen, der Verlegung eines Gemeindegeweges, der im Talgrunde an der für die Sperre vorgesehenen Stelle lag — er geht jetzt über das Wasser hinweg —, dem Bau von Arbeiterunterkünften und der Baustelleneinrichtung, über die nachstehend einiges berichtet wird.

Die Brech- und Zerkleinerungsanlage.

Der bis in die Umgebung der Baustelle anstehende Fels besteht aus festem feinkörnigem Granit, der ein ausgezeichnetes Zuschlagmaterial abgibt. Wegen der leichteren Ausbeutung wurde daher ein Steinbruch in möglichster Nähe der Sperrmauer angelegt. Man entschloß sich für das rechte Ufer, etwas über dem Wasserspiegel des zukünftigen Stausees. Die Vorderseite des Steinbruchs ist dem Tal von Ravin du Chêne zugewandt, so daß kein Steinrutsch in Richtung der Baugrube erfolgen kann. Zunächst wird das gewonnene Gestein mit Greifern zum Vorbrecher gebracht und dort ausgeschüttet. Nach dieser ersten Zerkleinerung gelangt das Material auf Laufbändern in eine Sortiertrommel, die es nach Korngrößen in die einzelnen Silos verteilt. Diejenigen Silos mit der Korngröße 30/60 und 60/120 mm speisen durch Schwerkraft zwei Kreiselbrecher, die das Material weiter zerkleinern und mittels Laufband einem Eimeraufzug zuführen, der es durch eine zweite Sortiertrommel in die Silos schickt. Die dritte Stufe der Zerkleinerung erfolgt durch zwei Zylinderbrecher, die aus dem Silo mit 10/30 mm Korn ebenfalls durch Schwerkraft gespeist werden. Sie beschicken wie die Kreiselbrecher das gleiche zur zweiten Trommel führende Förderband. Um auch feinen Sand zu gewinnen, mußte die Brecheranlage durch Kugelmöhlen vervollständigt werden.

Die drei Zerkleinerungsanlagen sind voneinander unabhängig. Jede von ihnen kann als Ersatz für die andere in Tätigkeit gesetzt werden, wenn eine bestimmte Korngröße aufgefüllt werden muß, ohne daß die gesamte Anlage zu laufen braucht.

Herstellung und Verteilung des Betons.

Unter den Silos sind zwei Meßvorrichtungen angebracht, die jedem Band die einer gegebenen Betonzusammensetzung entsprechende Baustoffmenge zuführen. Die Bänder entleeren in die Trichter der Betonmischer, die unter den Silos für Zement und feinen Sand aufgestellt sind. Die Zement- und Sandzugabe erfolgt mit Hilfe automatischer Waagen.

Auch die Betonverteilungsanlage ist vorbildlich und verdient deshalb besondere Erwähnung. Bei einer aufgelösten Talsperre ist die Betonverteilung sehr schwierig. Dies hängt mit den verhältnismäßig kleinen Betonmengen zusammen, die an den einzelnen Stellen zu verarbeiten sind. Vergleicht man unter diesem Gesichtspunkt eine Schwerkraftstaumauer mit einer gleichwertigen aufgelösten Mauer, so stellt man fest, daß der Betonverbrauch für die aufgelöste Mauer nur ein Drittel oder ein Viertel von dem der Schwerkraftstaumauer beträgt, daß aber trotzdem dieser Betonmenge eine Oberfläche zukommt, die diejenige der äquivalenten Schwerkraftstaumauer noch um 25 v. H. übersteigt. Bildet man das Verhältnis zwischen der zu verteilenden Betonmenge und der vorhandenen Oberfläche, so ergibt sich dafür 1 : 5 zugunsten der aufgelösten Staumauer.

Nach diesen Erwägungen würde man in erster Linie an eine Betoneinbringung mittels Pumpen denken. Die großen Abmessungen des Bauwerkes von 300 m Länge und 50 m Höhe erfordern aber ganz besondere Verteilungseinrichtungen. Um die beim Pumpbetrieb unzugängliche Betonierungszone möglichst klein zu halten, hat man längs der Staumauer drei Betonpumpen ungefähr 10 m hoch über dem Talgrund aufgestellt. Die Speisung der Pumpen erfolgt durch Kabelkrane, deren Kübel unmittelbar durch die Mischmaschinen gefüllt werden. An die Pumpen schließt sich das Rohrsystem an, das über einen gleich hohen festen Steg parallel zur Längsachse der Sperrmauer geführt wird. Außerdem sind noch nach oben und unten bewegliche Stege vorgesehen, die an zwei das Tal überquerenden Kabeln aufgehängt die Möglichkeit schaffen, jeden Pfeiler und jedes Gewölbe zu bedienen. Die von den Pumpen nicht erfaßte Restzone ist also sehr schmal und beschränkt sich nur auf den Oberteil der Staumauer, der aber leicht mit einem Kabelkran zu erreichen ist.

Der Bau der Staumauer und des Staubeckens sowie die damit zusammenhängenden Arbeiten wurden übernommen vom Service technique du Port de Paris der Seinepräfektur. Die Aufstellung des Projektes erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Beauftragten des Talsperrendienstes im Ministerium für öffentliche Arbeiten, Herrn Chefingenieur Coyne. [Nach M. F. C u q in Travaux 25 (1941) S. 263.]

Dr.-Ing. Kurt Hirschfeld, Berlin.

BUCHBESPRECHUNGEN.

Abhandlungen der Internationalen Vereinigung für Brückenbau und Hochbau. 6. Bd. Mit zahlr. Abb. Zürich: Verlag A.-G. Gebr. Leemann & Co. 1940/41. 306 S. Gr. 17 × 24 cm. Preis geh. RM 15,—, für Mitgl. RM. 6.—.

Von diesen Abhandlungen¹ erschien nunmehr der 6. Band. Er enthält Aufsätze (davon 10 in deutscher, 2 in französischer und 4 in englischer Sprache) über die Theorie des Seilpolygons, die Berechnung von Seilen und Hängebrücken, die Knickung von Stäben und Stegblechen sowie über die Kippstabilität. Weitere Arbeiten behandeln die Theorie der Bogentragwerke, der Plastizitätstheorie sowie weitere Fragen der Baustatik und Elastizitätstheorie.

Der neue Band enthält somit wertvollste Fortschritte des Ingenieurbaus, er stellt sich ebenbürtig neben seine Vorgänger.

Schleicher, Berlin.

Heeb, A. u. A. Kölmel: Straßenbau. 2. Aufl. Mit 203 Abb. Leipzig u. Berlin: B. G. Teubner 1942. 247 S. Gr. DIN C 5. Preis kart. RM 5.60.

Die in 2. Auflage von Baurat Heeb allein bearbeitete Schrift soll nach dem Vorwort eine Unterlage für den Unterricht im Straßenbau

¹ Besprechung des 4. Bandes s. Bauing. 18 (1937) S. 149, die des 5. Bandes s. Bauing. 20 (1939) S. 243.

an den Baufachschulen bilden und dem in der Praxis stehenden Straßenbauingenieur ein Helfer und Berater sein. Im einzelnen werden die Grundlagen für die Planung von Straßen, die Planung und bauliche Gestaltung der Reichs- und Landstraßen sowie der Reichsautobahnen, der Bau der Straßen, die Unterhaltung und Kosten und die bauliche Gestaltung der Stadtstraßen behandelt. Das Buch ist mit klaren Bildern und guten graphischen Darstellungen ausgestattet. In einem besonderen Abschnitt sind alle einschlägigen Gesetze und Verordnungen zusammengefaßt wiedergegeben. Da das Buch für Lehrzwecke verwendet werden soll, möchte man in der nächsten Auflage gern die verschiedenen Druckfehler sowie falschen Angaben in den Dimensionen vermieden wissen. Bei der Behandlung der Fahrt in der Krümmung muß unbedingt die führende Reibungskraft als actio, die Fliehkraft als reactio eingeführt werden. In den schematischen Querschnittsdarstellungen für den Aufbau der Straßendecken ist es zweckmäßig, die Korngröße maßstabsgerecht einzutragen. Um eine praktische Verwendung der Querschnitte für die Absteckung und Abrechnung zu ermöglichen, ist es erforderlich, daß auf Tafel 3 wenigstens ein Querschnitt vollständig, d. h. mit Angabe der Abszissen, bezogen auf die Straßenmitte, und der Ordinaten dargestellt wird.

Das Buch wird bei dem Leserkreis, an den es sich wendet, gute Aufnahme finden. Darüber hinaus kann es aber auch den Studierenden an den Technischen Hochschulen empfohlen werden.

Schlums, Berlin.

INHALT: Die Querverteilung der Lasten bei Brücken mit zwei Hauptträgern. Von Regierungsbaurat Dr.-Ing. Ernst Gruber, Hannover. S. 323. — Dichtung der Fuge zwischen zwei Senkkästen. Von Dipl.-Ing. Fr. Kötter, München. S. 332. — Kurze technische Berichte. S. 335. — Die Talsperre von Pannesière-Chaumard (Nièvre). — Buchbesprechungen. S. 338.