

DER STAHLBAU

Schriftleitung:

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

Professor W. Rein, Breslau, Technische Hochschule. — Fernsprecher: Breslau 421 61

Beilage
zur Zeitschrift

DIE BAUTECHNIK

Fachschrift für das ge-
samte Bauingenieurwesen

Preis des Jahrganges 10 RM und Postgeld

5. Jahrgang

BERLIN, 2. September 1932

Heft 18

Allgemeine Methode zur Darstellung der Einflußlinien von Balken und Rahmentragwerken.

Alle Rechte vorbehalten.

Von Regierungsbaurat Dr.-Ing. O. Kirsten.

In Heft 13 der Zeitschrift „Der Stahlbau“, 1931, ist ein Aufsatz von Dr.-Ing. St. Szegö und Dr.-Ing. P. Nemenyi, Berlin, über das oben genannte Thema erschienen. In diesem wird dargelegt, wie man die Einflußlinien von Momenten und Querkräften in durchlaufenden Trägern in übersichtlicher, geschlossener Form entwickeln kann. Das Verfahren ist sehr elegant und besonders für die Berechnung der Einflußlinien hochgradig statisch unbestimmter Systeme geeignet, worüber Näheres weiter unten ausgeführt werden soll.

Die in dem genannten Aufsatz wiedergegebene Entwicklung entbehrt aber der allgemeinen Ableitung. Z. B. ist an Hand der Abhandlung die Berechnung der Einflußlinien der Normalkräfte und der Stützkkräfte für beliebige Rahmenträger nicht möglich.

Während seiner mehrjährigen praktischen Tätigkeit als Statiker hat der Verfasser für die Ermittlung der Einflußlinien hochgradig statisch unbestimmter Systeme einen ähnlichen Weg eingeschlagen, jedoch die Ableitung so durchgeführt, daß auch die Einflußlinien der Normal- und Stützkkräfte in geschlossener Form entwickelt werden können.

Wie hierbei im einzelnen vorzugehen ist, sollen die nachstehenden Zeilen darlegen.

Den Ausgangspunkt der nachstehenden Betrachtungen bildet das Prinzip der virtuellen Verrückungen, das durch die Gleichungen

$$\begin{aligned} \sum \bar{Q} \delta + \sum \bar{M} \tau &= 0, \\ \sum \bar{Q} \delta &= \sum \bar{S} \mathcal{J} s \end{aligned}$$

oder

$$\sum \bar{Q} \delta + \sum \bar{M} \tau = \int \bar{M} M \frac{ds}{EJ} + \int \bar{N} N \frac{ds}{EF} + \int \bar{Q} Q \frac{ds}{GF}$$

ausgedrückt wird. Diese Beziehungen gelten für jeden Träger, gleichgültig ob dieser statisch unterbestimmt (labil), statisch bestimmt oder statisch unbestimmt ist.

Allgemein ist das Prinzip der virtuellen Verrückungen in der Theorie der Einflußlinien statisch bestimmter Träger als sogenannte „Kinematische Methode“ bekannt. Die Einflußlinien der Schnittkräfte ergeben sich hierbei als Biegelinien einfach beweglicher Systeme. Auch bei statisch unbestimmten Trägern kann unter Einführung eines $(n-1)$ -fach statisch unbestimmten Systems in gleicher Weise vorgegangen werden (vgl. Vianello, „Der Eisenbau“, I. Aufl. 1905. S. 344). Jedoch ist gerade bei statisch unbestimmten Aufgaben die Ermittlung der Einflußlinien mitunter oft umständlich. Soll z. B. die Einflußlinie des Feldmomentes eines durchlaufenden Trägers ermittelt werden, so zeigen sich bei der Berechnung der Biegelinie infolge des eingefügten Gelenkes gewisse Erschwernisse. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei den Querkraft- und Normalkraft-Einflußlinien infolge der einzuschaltenden Nullfelder.

Vermindert man jedoch nicht den Freiheitsgrad um 1, sondern wendet das Prinzip der virtuellen Verrückungen unmittelbar auf das Tragwerk an, so vereinfacht sich das Verfahren. Die Verringerung der Rechenarbeit tritt besonders — wie schon oben bemerkt — bei hochgradig statisch unbestimmten Aufgaben hervor.

Die Ableitung des Verfahrens soll zunächst am einfachen Beispiel des Balkens auf zwei Stützen gezeigt werden. Hierauf folgt die eigentliche Anwendung auf statisch unbestimmte Träger.

Zur Ermittlung der Einflußlinie des Momentes eines Balkens auf zwei Stützen wird das Prinzip der virtuellen Verrückungen durch die Gleichung

$$1 \delta - \int M_i \bar{M} \frac{ds}{EJ} = 0$$

angesetzt. Dabei entsprechen die Kraftwirkungen 1 und M_i dem tatsächlichen Belastungszustand, während δ und $\bar{M} ds/EJ = \mathcal{J} \varphi$ durch einen virtuellen Formänderungszustand entstanden zu denken sind. Wählt man die Formänderung so, daß nur im Punkte m eine Formänderung $\mathcal{J} \varphi$ ausgelöst wird, dann kann die obige Gleichung folgendermaßen geschrieben werden:

$$1 \delta - M_i \mathcal{J} \varphi = 0$$

oder

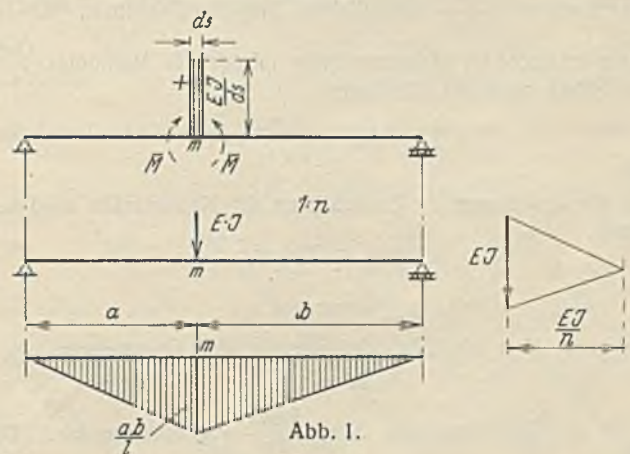
$$M_i = + \frac{1 \delta}{\mathcal{J} \varphi} = \frac{1 \delta}{M ds/EJ}$$

Wählt man $\bar{M} ds/EJ = \mathcal{J} \varphi = 1$, so erhält man das gesuchte Moment in der Form

$$M_i = 1 \bar{\delta},$$

d. h. die Einflußlinie des Momentes M_i ist identisch mit der Biegelinie eines Balkens auf zwei Stützen, hervorgerufen durch ein Spannungsmoment \bar{M} im Punkte m , dessen Größe wegen der Beziehung $\bar{M} ds/EJ = 1$ mit $\bar{M} = \frac{1 EJ}{ds}$ anzusetzen ist.

Werden im Punkte m eines Balkens auf zwei Stützen die Momente $\bar{M} = \frac{EJ}{ds}$, im Abstände ds wirkend, angebracht, so stellt die zu diesem Belastungszustand gehörige Biegelinie die Einflußlinie des Momentes für den Schnitt m dar. Diese kann entweder zeichnerisch als Moment der Momentenfläche oder analytisch mit Hilfe der bekannten Formänderungsgleichung $1 \delta = \int \bar{M} M ds/EJ$ ermittelt werden (vgl. hierzu die ohne weitere Erklärung verständliche Abb. 1).



Handelt es sich um die Ermittlung der Einflußlinie der Querkraftlinie, so wird das Prinzip der virtuellen Verrückungen in ähnlicher Weise angewandt. Aus

$$1 \delta - \int \bar{Q}_i \bar{Q} ds/GF = 0$$

oder

$$1 \delta - Q_i \mathcal{J} v = 0$$

wird erhalten:

$$Q_i = + \frac{1 \delta}{\mathcal{J} v} = + \frac{1 \delta}{\frac{Q ds}{GF}}$$

Wird $\int v = \times Q ds / GF = 1$ gewählt, so ist

$$Q_i = 1 \delta.$$

Die Einflußlinie der Querkraft Q_i im Schnitte m wird also dadurch gefunden, daß man im Punkte m die Kräfte $\bar{Q} = \frac{1 GF}{\times ds}$ im Abstände ds wirkend denkt und hierzu die Biegelinie zeichnet. Durch die Kräfte entsteht das in Abb. 2 dargestellte Querkraftdiagramm. Die elastischen Kräfte werden entsprechend der Beziehung

$$dW = -\frac{1}{G} d\left(\times \frac{Q}{F}\right)$$

dadurch gefunden, daß man die dieses Querkraftdiagramm erzeugenden Kräfte ermittelt und mit diesen die Seillinie zeichnet, deren Ordinaten mit $\frac{\times}{GF}$ multipliziert die Einflußlinie Q_i darstellen. Da die Seillinie für zwei gleichgroße und entgegengesetzt gerichtete Kräfte, deren Abstand un-

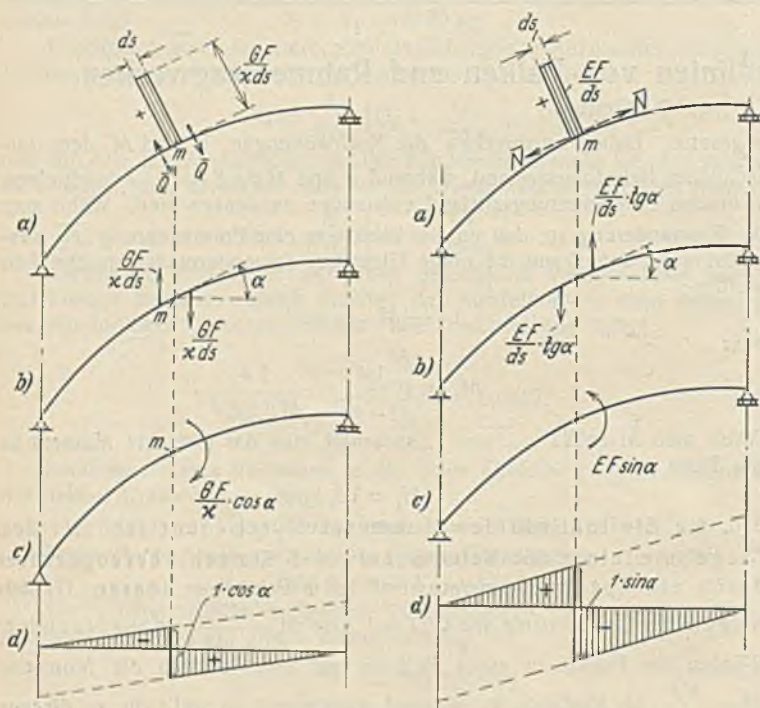


Abb. 2.

Abb. 3.

endlich klein (ds) ist, nicht gezeichnet werden kann, wird die angreifende Kräftegruppe $\frac{GF}{\times ds}$ als Moment von der Größe $\frac{GF}{\times} \cos \alpha$ gedeutet und zu diesem die mit $\frac{\times}{GF}$ multiplizierte Biegelinie ermittelt. Diese wird wiederum entweder als Momentenfläche infolge des Momentes $\frac{GF}{\times} \cos \alpha$ oder analytisch nach der Gleichung

$$1 \delta = \int \bar{Q} \times \left[\frac{GF}{\times ds} \right] ds / GF$$

erhalten.

Bei der Ermittlung der Einflußlinien der Normalkräfte wird von der Gleichung

$$1 \delta - \int N_i \bar{N} ds / EF = 0$$

oder

$$1 \delta - N_i \int s = 0$$

ausgegangen. Man erhält aus den vorstehenden Gleichungen

$$N_i = 1 \delta,$$

wenn $\int s = \frac{N ds}{EF} = 1$ oder $\bar{N} = \frac{1 EF}{ds}$ angenommen wird. Die virtuelle Verschiebung wird demnach durch eine Normalkraft $\bar{N} = \frac{1 EF}{ds}$ im Schnitte m eingeleitet. Die Einflußlinie der Normalkraft N_i im Schnitte m erhält man also dadurch, daß man in m die Normalkräfte $\bar{N} = \frac{1 EF}{ds}$ im Abstände ds wirkend denkt und zu diesem virtuellen Spannungszustand die Biegelinie zeichnet. Wie dabei im einzelnen vorzugehen ist, zeigen die nachstehenden Abbildungen. Die elastischen Gewichte sind nach der Beziehung

$$dW = + \frac{1}{E} d\left(\frac{N}{F} \lg \alpha\right)$$

zu ermitteln und in Abb. 3 eingetragen. Auch hier ist wie bei der Querkrafteinflußlinie die Belastung der W -Gewichte einer Momentenbelastung $M = EF \sin \alpha$ gleichzusetzen. Die infolge dieser Belastung sich ergebenden Momentenordinaten stellen, durch EF dividiert, die Einflußlinie von N im Punkte m dar.

Zur Ermittlung der Einflußlinie von Stützkraften ist der Angriffspunkt in Richtung der gesuchten Stützkraft um $\int = 1$ zu verschieben. Die hierdurch bedingte Verformung des Tragwerkes stellt dann die gesuchte Einflußlinie dar.

Zur weiteren Erläuterung des Verfahrens werden nachstehend die Einflußlinien von M , N und Q im Punkte m eines Dreigelenkbogens ermittelt. Es ist dabei zu beachten, daß nicht nur die W -Gewichte infolge der virtuellen Spannungen $\frac{EJ}{ds}$, $\frac{GF}{\times ds}$ und $\frac{EF}{ds}$ anzusetzen sind, sondern daß auch elastische Gewichte im Scheitelgelenk des Dreigelenkbogens auftreten. Für diese gilt die allgemeine Formel

$$W_m = \int M \bar{M} \frac{ds}{EJ} + \int \times Q \bar{Q} \frac{ds}{GF} + \int N \bar{N} \frac{ds}{EF}$$

Die Integration läßt sich ohne weiteres im Kopfe ausführen. Das Ergebnis ist in Abb. 4 an den Gelenkpunkten eingetragen.

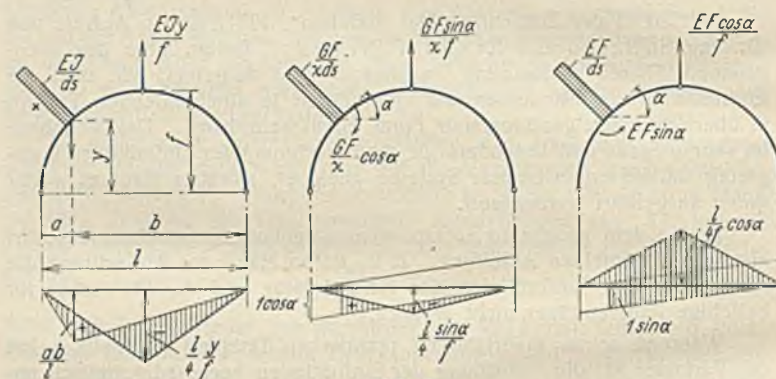


Abb. 4.

Bei der Bestimmung der Einflußlinien der inneren Kräfte von statisch unbestimmten Trägern ist die Wirkung der gedachten inneren Spannungsergebenden $\frac{EJ}{ds}$, $\frac{GF}{\times ds}$ oder $\frac{EF}{ds}$ auf die überzähligen Größen zu berücksichtigen. Um die statisch unbestimmten Größen zu erhalten, werden zunächst die Belastungsglieder nach der Gleichung

$$N_r = \int M_r \bar{M} \frac{ds}{EJ} + \int N_r \bar{N} \frac{ds}{EF} + \int \times Q_r \bar{Q} \frac{ds}{GF} - \sum C_r \int c$$

$$= \int M_r \left[\frac{EJ}{ds} \right] \frac{ds}{EJ} + \int N_r \left[\frac{EF}{ds} \right] \frac{ds}{EF} + \int \times Q_r \left[\frac{GF}{\times ds} \right] \frac{ds}{GF} - \sum C_r \int c$$

bestimmt und in die Elastizitätsgleichungen einsetzt. Die auf diese Weise ermittelten überzähligen Größen rufen ihrerseits Momente, Normalkräfte und Längskräfte hervor.

Für das Tragwerk sind also folgende Wirkungen zu berücksichtigen:

1. die gedachten Formänderungen

$$\int \varphi = 1, \int s = 1, \int v = 1 \text{ oder } \int c = 1,$$

wobei die ersten drei Formänderungen aus den Spannungsergebenden

$$M = \frac{EJ}{ds}, Q = \frac{GF}{\times ds} \text{ und } \bar{N} = \frac{EF}{ds}$$

entstanden zu denken sind:

2. die Momente, Querkräfte und Normalkräfte infolge der überzähligen Größen. Mit genügender Genauigkeit kann man bei der Ermittlung der Überzähligen die Wirkung der Querkräfte und der Normalkräfte vernachlässigen und sich auf den Einfluß der Momente beschränken.

Die beiden Belastungen zugeordneten Momentenflächen stellen die gesuchte Einflußlinie dar.

Zur Erläuterung des Verfahrens sollen folgende Beispiele behandelt werden.

a) Für den nebenstehenden Träger (Abb. 5) ist die Einflußlinie des Momentes und der Querkraft für die Mitte des mittleren Feldes zu zeichnen. Aus den Elastizitätsgleichungen

$$\frac{5+10}{3} X_1 + \frac{10}{6} X_2 = N_1$$

$$\frac{10}{6} X_1 + \frac{10+10}{3} X_2 = N_2$$

ergibt sich

$$X_1 = 0,2181818 N_1 - 0,05454 N_2$$

$$X_2 = -0,05454 N_1 + 0,163636 N_2$$

Infolge des gedachten Belastungszustandes $\frac{EJ}{ds}$ werden die Belastungsglieder zu

$$N_1 = +0,5 EJ \quad \text{und} \quad N_2 = +0,5 EJ$$

und damit die Überzähligen zu

$$X_1 = 0,081818 EJ \quad \text{und} \quad X_2 = 0,054545 EJ$$

erhalten. Die hierzu gehörige Momentenfläche ist in Abb. 5a wieder-

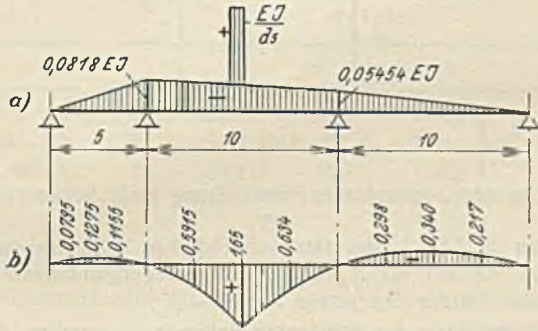


Abb. 5.

gegeben, ebenso wurde in Abb. 5b die sich hieraus ergebende Biegelinie, die zugleich die gesuchte Einflußlinie darstellt, aufgetragen.

Bei der Bestimmung der Querkrafteinflußlinie sind die Belastungsglieder

$$N_1 = -0,1 EJ, \quad N_2 = +0,1 EJ.$$

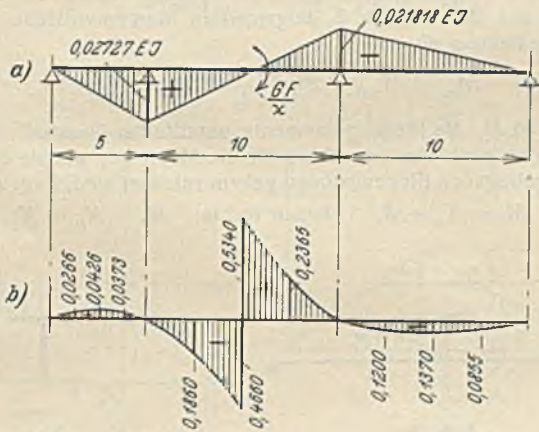


Abb. 6.

Damit werden aus den Elastizitätsgleichungen für die Überzähligen folgende Werte erhalten:

$$X_1 = -0,0272726 EJ, \quad X_2 = +0,0218181 EJ.$$

Das hierzu gehörige Momentenbild ist in Abb. 6a wiedergegeben. Außerdem

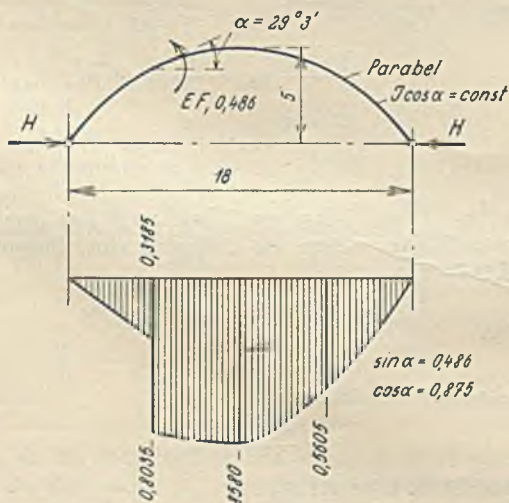


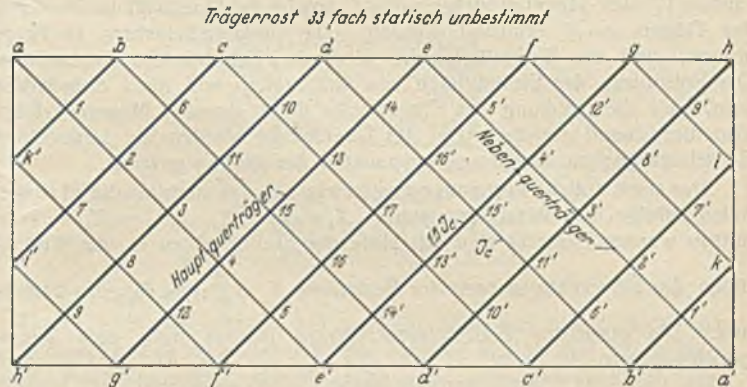
Abb. 7.

dem ist die Momentenbelastung $M = \frac{GF}{x}$ zu beachten. Für diese Belastungen ist die in Abb. 6b dargestellte Biegelinie bzw. Einflußlinie der Querkraft berechnet worden.

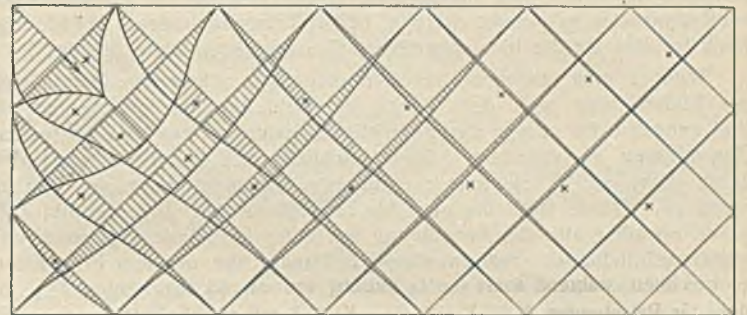
b) Als zweites Beispiel soll die Ermittlung der Einflußlinie der Normalkraft für den Viertelpunkt in einem Zweigelenkbogen gezeigt werden, dessen Achse nach einer Parabel gekrümmt ist und dessen Querschnittsabwandlung dem Gesetze $J \cos \alpha = \text{const.}$ folgt.

Die Elastizitätsgleichung für die Horizontalkraft des Zweigelenkbogens lautet:

$$H = + \frac{N}{\delta_{HH}} = + \frac{N}{\frac{8}{15} f^2 I} = + \frac{N}{240}.$$



Einflußlinien für das Mittenmoment des Eckhauptquerträgers



Einflußlinien für das Mittenmoment des mittleren Hauptquerträgers



Einflußlinien der Querkraft des Hauptquerträgers g'-e im Punkte e'

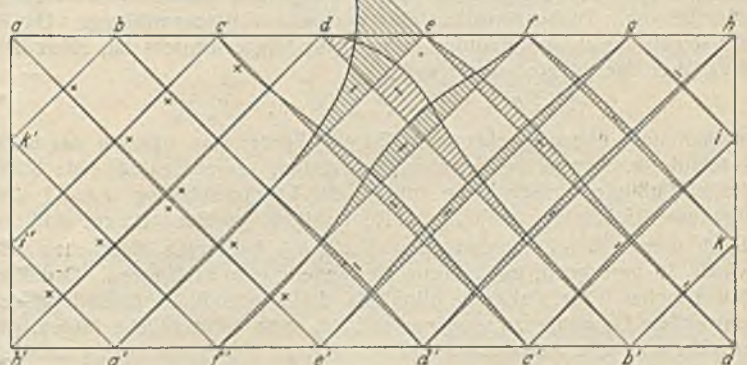


Abb. 8.

Im vorliegenden Falle wird das Belastungsglied: $N = -0,875 EJ$. Damit wird $H = -0,003645 EJ$ und das Moment im Scheitelpunkt $c M_c = -0,018225 EJ$. Zeichnet man hierzu die Momentenlinie und beachtet außerdem die Momentenbelastung $EF \sin \alpha = EF \cdot 0,486$, so erhält man die in Abb. 7 wiedergegebene Einflußlinie der Normalkraft im Punkte m .

Selbstverständlich lassen sich die vorstehenden Rechenverfahren auch auf die Ermittlung der Einflußlinien von Schnittkräften in Fachwerkstäben, Scheiben, Platten usw. anwenden.

Was die praktische Wertbarkeit des geschilderten Verfahrens bei statisch unbestimmten Trägern anbelangt, so ist zu sagen, daß der Vorteil dieser Methode besonders bei hochgradig statisch unbestimmten Systemen hervortritt. Zum Beweise diene der in Abb. 8 dargestellte 33fach statisch unbestimmte Trägerrost. Für die Beurteilung der Sicherheit des Tragwerkes sollen die Momente im Punkt 1 des Trägers $k'-b$ und im Punkte 17 des Hauptquerträgers $f'-f$, sowie die Querkraft im Punkte e des Trägers $e-g'$ ermittelt werden. Da Verkehrsbelastung in Frage kommt, sind die Einflußlinien für diese drei Schnittkräfte darzustellen. Die Ermittlung der Einflußlinien von Stützkraften soll nicht erforderlich sein, weil die Stützung des Trägerrostes durch massive Mauern erfolgt, also hinreichend gesichert ist. Als Überzählige werden die senkrechten Zwischenkräfte an den Kreuzungspunkten der Balken gewählt.

Der sonst übliche Rechnungsgang ist nun der, daß zunächst die 33 Biegelinien infolge der Belastungszustände $X_1 = X_2 = X_3 = \dots = X_{33} = 1$ ermittelt werden. Darauf sind mit Hilfe der Einflußzahlen β_{ik} die Einflußlinien der Überzähligen nach der Beziehung $X_i = \sum_k \beta_{ik} \delta_{mk}$ zu berechnen. Die gesuchten Einflußlinien können hieraus nach dem Superpositionsgesetz

$$M = M_0 + M_1 X_1 + M_2 X_2 + \dots + M_{33} X_{33}$$

$$Q = Q_0 + Q_1 X_1 + Q_2 X_2 + \dots + Q_{33} X_{33}$$

gefunden werden. Daß hierbei die polarsymmetrischen Eigenschaften des Trägerrostes ausgenutzt werden, bedarf keiner besonderen Erwähnung. Auch ist dies für die hier angestellten Betrachtungen ohne Belang.

Wendet man dagegen die oben dargelegte allgemeine Darstellung der Einflußlinien nach dem Prinzip der virtuellen Verrückungen an, so sind zunächst die infolge des gedachten Belastungszustandes auftretenden Überzähligen zu ermitteln. Hieran schließt sich die Berechnung des durch diese Kräfte entstehenden Formänderungszustandes des Trägerrostes an. Dieser stellt die gesuchte Einflußlinie dar. Jede der drei Aufgaben erfordert also die Berechnung nur eines Formänderungszustandes; insgesamt sind also für die vorliegende Bauaufgabe nur drei Biegelinien zu berechnen, während sonst die Ermittlung von 33 Biegelinien δ_{mk} infolge der Belastungen $X_1 = X_2 = \dots = X_{33} = 1$ mit anschließender, umständlicher Auswertung $X_i = \sum_k \beta_{ik} \delta_{mk}$ durchzuführen wäre. Allerdings

erfordert die Berechnung der Biegelinien nach dem neuen Verfahren etwas mehr Arbeit, weil eben sämtliche infolge des virtuellen Formänderungszustandes entstehenden Überzähligen (also nicht nur je eine Last $X_i = 1$) anzusetzen sind. Die Vereinfachung durch diese Methode und die Verminderung der reinen Rechenarbeit ist also bedeutend. Man kann daher folgenden Schluß ziehen: Die Berechnung hochgradig statisch unbestimmter Systeme, bei denen die Einflußlinien der Schnittkräfte nur weniger, ausgezeichneter Punkte (in der Regel wird es sich um drei bis vier Einflußlinien handeln) zu ermitteln sind, erfolgt am einfachsten mittels Anwendung des Prinzips der virtuellen Verrückungen am unveränderten Tragwerk.

Ähnlich kann man auch bei der Ermittlung der Einflußlinien von Stabkräften in Fachwerkträgern vorgehen, allerdings aber nur, wenn es sich um die Berechnung der Einflußlinien einzelner, weniger Stabkräfte handelt, z. B. bei Nachprüfung einer vorliegenden statischen Berechnung oder bei einer Berechnung für eine generelle Kostenermittlung. Da in der Regel jedoch die Kenntnis aller Stabkräfte erwünscht ist, führt der Weg über das Superpositionsgesetz

$$S = S_0 + S_1 X_1 + S_2 X_2 + \dots + S_n X_n$$

rascher und übersichtlicher zum Ziele. Würde man nämlich das oben geschilderte, allgemeine Verfahren anwenden, so müssen für jede Stabkräfteinflußlinie zunächst die infolge der Längenänderung $\Delta s = 1$ entstehenden Überzähligen X_1, X_2, \dots, X_n ermittelt werden. Darauf sind die durch diesen Belastungszustand und $\Delta s = 1$ bedingten elastischen Gewichte zu berechnen, um hiermit die Biegelinie zu bestimmen. Dadurch, daß also bei jeder Stabkräfteinflußlinie die umständliche Ermittlung der elastischen Gewichte zu erfolgen hat, ist eine beträchtliche Mehrarbeit erforderlich. Die Anwendung des allgemeinen Verfahrens zur Darstellung von Einflußlinien ist also in diesem Falle nicht zweckmäßig.

Zuschrift an die Schriftleitung.

Der Aufsatz von Herrn O. Kirsten gibt das Verfahren von Neményi-Szegö zur Darstellung von Einflußlinien dankenswerterweise in einer Form wieder, welche wahrscheinlich vielen Ingenieuren das Wesen der Sache besser erkennbar macht als die Originalabhandlung der Verfasser.

Jedoch darf die Behauptung nicht unwidersprochen bleiben, daß dieses Verfahren gegenüber den bekannten schneller zum Ziele führt, vielmehr soll im nachstehenden Beispiel gezeigt werden, daß das übliche Lastflächenverfahren, zweckmäßig angewendet, genau denselben Rechnungsgang benutzt wie das Verfahren von Neményi-Szegö, welches hier-

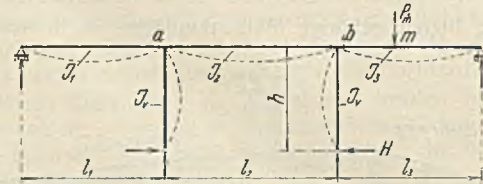


Abb. 1.

nach nur eine neue, interessante Formulierung einer bekannten Operation darstellt.

Um das in Abb. 1 dargestellte zweiastige Rahmentragwerk zu berechnen, wählen wir als X_a und X_b die Biegemomente im Balken außerhalb der Stützen und setzen $-Hh = X_c$.

Nach Berechnung der konstanten Beiwerte δ_{ik} ergeben sich für die drei statisch unbestimmten Größen die Lösungen

$$X_a = \beta_{aa} \delta_{ma} + \beta_{ab} \delta_{mb} + \beta_{ac} \delta_{mc}$$

$$X_b = \beta_{ba} \delta_{ma} + \beta_{bb} \delta_{mb} + \beta_{bc} \delta_{mc}$$

$$X_c = \beta_{ca} \delta_{ma} + \beta_{cb} \delta_{mb} + \beta_{cc} \delta_{mc}$$

1. Um die Einflußlinie für das Biegemoment in einem beliebigen Querschnitt m der Mittelöffnung im Abstände x von a zu bestimmen, leiten wir aus der in Abb. 2 dargestellten Momentenfläche für $P = 1$ in m die Beziehung ab:

$$M_m = M_{m0} + M_1 \frac{(l_2 - x)}{l_2} + M_2 \frac{x}{l_2}$$

worin M_1 und M_2 die Biegemomente unmittelbar innerhalb der Stützen sind. Mit den positiven Vorzeichen für die Momente, wie sie durch die in Abb. 1 eingetragenen Biegelinien gekennzeichnet sind, folgt aus Abb. 3:

$$M_1 = X_a + X_c, \text{ ebenso rechts: } M_2 = X_b + X_c.$$

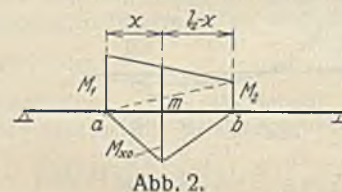


Abb. 2.

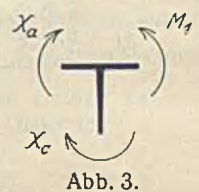


Abb. 3.

Damit wird

$$M_m = M_{m0} + \frac{(l_2 - x)}{l_2} X_a + \frac{x}{l_2} X_b + X_c.$$

Setzt man für die X die allgemeinen Lösungen ein und ordnet die Glieder nach den Biegekoordinaten, so ist

$$M_m = M_{m0} + \left[\frac{(l_2 - x)}{l_2} \beta_{aa} + \frac{x}{l_2} \beta_{ab} + \beta_{ac} \right] \delta_{ma}$$

$$\left[\frac{(l_2 - x)}{l_2} \beta_{ba} + \frac{x}{l_2} \beta_{bb} + \beta_{bc} \right] \delta_{mb}$$

$$\left[\frac{(l_2 - x)}{l_2} \beta_{ca} + \frac{x}{l_2} \beta_{cb} + \beta_{cc} \right] \delta_{mc}$$

oder kürzer

$$M_m = M_{m0} + \gamma_{ma} \delta_{ma} + \gamma_{mb} \delta_{mb} + \gamma_{mc} \delta_{mc}$$

die drei letzten Glieder stellen die Ordinaten einer Biegelinie dar, die zu der „Lastfläche“

$$z = \gamma_{ma} M_a + \gamma_{mb} M_b + \gamma_{mc} M_c$$

berechnet wird.

2. Beispiel.

Mit der üblichen Bezeichnung

$$l \frac{J_c}{J} = l'$$

erhält man nach Abb. 4 für die δ_{ik}

$$EJ_c \delta_{aa} = \frac{l_1' + l_2'}{3}, \quad EJ_c \delta_{ab} = \frac{l_2'}{6},$$

$$EJ_c \delta_{bb} = \frac{l_2' + l_3'}{3}, \quad EJ_c \delta_{ac} = \frac{l_2'}{2},$$

$$EJ_c \delta_{cc} = l_2' + \frac{2}{3} h', \quad EJ_c \delta_{bc} = \frac{l_2'}{2}.$$

Es sei:

$$\begin{aligned}
 l_1 &= 12, & l_2 &= 24, & l_3 &= 18, & h &= 7,5 \text{ m,} \\
 J &= 12, & & 18, & & 15, & & 9 \text{ Einheiten,} \\
 J_c: J &= 3/2, & & 1, & & 6/5, & & 2 \\
 l' &= 18, & & 24, & & 21,6, & & 15 \text{ m.}
 \end{aligned}$$

Damit erhält man nachstehende Matrix und hieraus die Tafel der Werte D_{ik} ; die Zahlen β_{ik} sind dann

δ -Tafel.			β -Tafel.				
	a	b	c		a	b	c
a	14	4	12	a	372,8	8	-134,4
b	4	15,2	12	b	8	332	-120
c	12	12	34	c	-134,4	-120	196,8

$D = 3638,4$

$$\beta_{ik} = \frac{D_{ik}}{D}$$

Der zu untersuchende Querschnitt m liege im Abstände $x = 10$ m. Dann ist

$$\begin{aligned}
 l_2 - x &= 14 \text{ m,} & \frac{x}{l_2} &= \frac{5}{12}, & \frac{l_2 - x}{l_2} &= \frac{7}{12}. \\
 \gamma_{ma} &= \frac{7}{12} \cdot 372,8 + \frac{5}{12} \cdot 8 - 134,4 = 86,4, \\
 \gamma_{mb} &= \frac{7}{12} \cdot 8 + \frac{5}{12} \cdot 332 - 120 = 23,0, \\
 \gamma_{mc} &= -\frac{7}{12} \cdot 134,4 - \frac{5}{12} \cdot 120 + 196,8 = 68,4.
 \end{aligned}$$

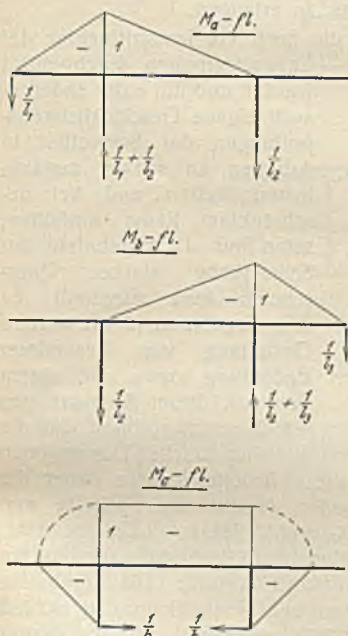


Abb. 4.

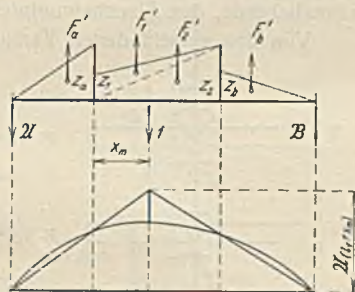


Abb. 5.

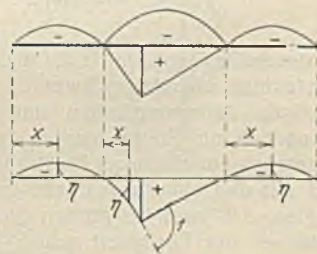


Abb. 6.

$$\begin{aligned}
 F'_a &= -86,4 \cdot \frac{18}{2} = -777,6, \\
 F'_1 &= -154,8 \cdot \frac{24}{2} = -1857,6, \\
 F'_2 &= -91,4 \cdot \frac{24}{2} = -1096,8, \\
 F'_b &= -23,0 \cdot \frac{21,6}{2} = -248,4. \\
 \mathfrak{A} &= -777,6 \cdot 46 = -35769,2 \\
 &\quad -1857,6 \cdot 34 = -63158,4 \\
 &\quad -1096,8 \cdot 26 = -28516,8 \\
 &\quad -248,4 \cdot 12 = -2980,8 \\
 &\quad -3638,4 \cdot 32 = +116428,8 \\
 \Sigma &= -342,0 \quad -13996,8 : 54 = -259,2, \\
 \mathfrak{B} &= -342,0 + 259,2 = -82,8, \\
 \eta_a &= -259,2 \cdot 12 + 777,6 \cdot 4 = 0, \\
 \eta_b &= -82,8 \cdot 18 + 248,4 \cdot 6 = 0,
 \end{aligned}$$

was zu beweisen war.

Damit ist nachgewiesen, daß man die M_m -Linie erhält, wenn man die Einzelbalken mit der z -Fläche belastet und in der Mittelöffnung die M_0 -Fläche hinzufügt, Abb. 6. Mißt man x stets von links, so lautet die Gleichung für die Ordinaten η der M_m -Linie:

1. Öffnung: $\eta = -\frac{12 \cdot 18}{6 \cdot 3638,4} \cdot 86,4 \omega_D$;
2. Öffnung: $\eta = M_{m0} - \frac{24 \cdot 24}{6 \cdot 3638,4} (154,8 \omega'_D + 91,4 \omega_D)$;
3. Öffnung: $\eta = -\frac{18 \cdot 21,6}{6 \cdot 3638,4} \cdot 23,0 \omega'_D$.

Nach dem Verfahren Neményi-Szegő in der Darstellung des Herrn Kirsten wird die M_m -Linie folgendermaßen bestimmt, nachdem die Zahlen β_{ik} bekannt sind.

Im Punkte m wird an den Enden der Strecke dx das ∞ große Lastmoment

$$M = \frac{EJ_2}{dx}$$

angebracht (Abb. 7), durch das im Balken eine Biegelinie entsteht, deren Tangenten in m den endlichen Winkel (Knick)

$$\omega = \frac{M dx}{EJ_2} = 1$$

miteinander bilden. Diese Biegelinie ist dann die Einflußlinie für M_m .

Die Belastungsglieder δ_{a0} , δ_{b0} , δ_{c0} beziehen sich ebenfalls nur auf die Stablänge dx , und es wird nach Abb. 7

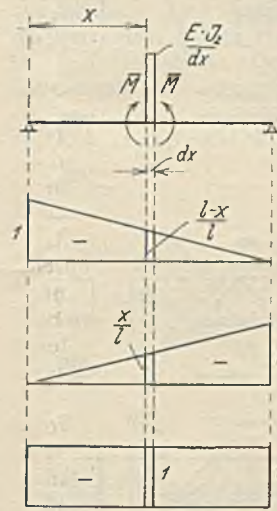


Abb. 7.

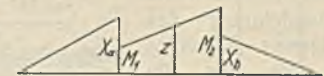


Abb. 8.

Hierbei sind einstweilen an Stelle der Zahlen β_{ik} die bequemereren D_{ik} benutzt worden.

Die Lastfläche z (Abb. 5) ist gegeben durch $\Sigma = \Sigma \gamma M$,

$$\begin{aligned}
 z_a &= -1 \cdot 86,4 & &= -86,4, \\
 z_1 &= -1 \cdot 86,4 - 1 \cdot 68,4 & &= -154,8, \\
 z_2 &= -1 \cdot 23,0 - 1 \cdot 68,4 & &= -91,4, \\
 z_b &= -1 \cdot 23,0 & &= -23,0.
 \end{aligned}$$

Will man in

$$M_m = M_{m0} + \Sigma \gamma \delta$$

das Glied M_{m0} in die Biegelinie mit einbeziehen, so muß man sich erinnern, daß die Einflußlinie M_{m0} identisch ist mit der Momentenfläche infolge $P_m = 1$. Wir fügen unserer z -Lastfläche in m noch die Einzelast 1 hinzu, wofür wir mit Rücksicht auf die noch ausstehende Division durch $D = 3638,4$ setzen müssen. Berechnen wir nun für diese Belastung die Auflagerkräfte \mathfrak{A} und \mathfrak{B} , so müssen sich die Momentenordinaten an den Stützen als Durchbiegungen gleich Null ergeben (Abb. 5). Da die Biegungsordinaten δ_{ma} , δ_{mb} , δ_{mc} noch mit EJ_c zu multiplizieren waren, so müssen die reduzierten Lastflächen F' benutzt werden:

$$\begin{aligned}
 \delta_{a0} &= \frac{EJ_2}{dx} \left[-\frac{(l_2 - x)}{l_2} \right] \frac{dx}{EJ_2} = -\frac{(l_2 - x)}{l_2}, \\
 \delta_{b0} &= \frac{EJ_2}{dx} \left(-\frac{x}{l_2} \right) \frac{dx}{EJ_2} = -\frac{x}{l_2}, \\
 \delta_{c0} &= \frac{EJ_2}{dx} (-1) \frac{dx}{EJ_2} = -1.
 \end{aligned}$$

Die statisch unbestimmten Größen sind dann:

$$\begin{aligned}
 X_a &= -\frac{(l_2 - x)}{l_2} \beta_{aa} - \frac{x}{l_2} \beta_{ab} - 1 \cdot \beta_{ac} = -\gamma_{ma}, & \text{entspricht der Lastordinate } z_a, \\
 X_b &= -\frac{(l_2 - x)}{l_2} \beta_{ba} - \frac{x}{l_2} \beta_{bb} - 1 \cdot \beta_{bc} = -\gamma_{mb}, & \text{entspricht der Lastordinate } z_b, \\
 X_c &= -\frac{(l_2 - x)}{l_2} \beta_{ca} - \frac{x}{l_2} \beta_{cb} - 1 \cdot \beta_{cc} = -\gamma_{mc}. & \text{Weiter folgt:} \\
 M_1 &= X_a + X_c = -\gamma_{ma} - \gamma_{mc}, & \text{entspricht der Lastordinate } z_1, \\
 M_2 &= X_b + X_c = -\gamma_{mb} - \gamma_{mc}, & \text{entspricht der Lastordinate } z_2.
 \end{aligned}$$

Die M_m -Linie ist dann die Biegelinie zur Momenten-, Lastfläche* z (Abb. 8), ergänzt durch die Biegelinie infolge der M_0 -Fläche über dx ,

die als Momentenfläche zum Einzelgewicht $M dx : EJ_2 = 1$ gedeutet werden kann. Man ersieht hieraus die vollkommene Übereinstimmung des Rechnungsganges mit dem ersten Verfahren.

Es wäre natürlich nicht zu empfehlen, in der beschriebenen Art zu rechnen, wenn eine größere Anzahl von M_m -Linien zu bestimmen wäre. Vielmehr wird man dann zuerst aus $X = \sum \beta \delta$ die Lastflächen z für die statisch unbestimmten Größen bilden, weil diese selbst bei der Dimensionierung gebraucht werden. Hierauf berechnet man die Lastflächen z für M_1 und M_2 aus

$$M_1 = X_a + X_c = \sum \gamma \delta, \text{ entsprechend } M_2,$$

und erhält dann die Einflußlinien für die Feldmomente aus folgenden Beziehungen:

1. Öffnung: $M_m = M_{m0} + X_a \frac{x}{l_1}$,
2. Öffnung: $M_m = M_{m0} + M_1 \frac{(l_2 - x)}{l_2} + M_2 \frac{x}{l_2}$,
3. Öffnung: $M_m = M_{m0} + X_b \frac{(l_3 - x)}{l_3}$;

hierbei können in bekannter Weise die „Spitzenkurven“ verwendet werden.

Die „resultierenden Lastflächen“ zur Darstellung von Einflußlinien werden in den Übungen in Statik des Herrn Geheimrats Professor

Dr. Hertwig an der Technischen Hochschule zu Berlin seit Jahren benutzt, die Methode ist im wesentlichen schon im Jahre 1897 von Müller-Breslau in dem Aufsatz „Über die Berechnung statisch unbestimmter Auslegerbrücken“ im Ztbl. d. Bauv. durch Einführung der α - (β -) Belastungen entwickelt worden. Pohl.

Erwiderung.

Zu obigen Ausführungen bemerke ich folgendes:

Die Darlegungen von Prof. Pohl begrüße ich außerordentlich. Beleuchten sie doch die von mir gebrachten Zusammenhänge auch von der rein mathematischen Seite aus. Die bei der Auflösung der Elastizitätsgleichungen sich ergebenden Beziehungen wurden, wie Prof. Pohl mitteilt, schon vor Jahren von Müller-Breslau entsprechend gedeutet. Mir lag jedoch vor allem daran, die von Dr.-Ing. P. Neményi und Dr.-Ing. St. Szegö im „Stahlbau“ 1931, Heft 13, gebrachten speziellen Ausführungen durch eine allgemeine theoretische Erörterung zu klären und für alle Möglichkeiten brauchbar zu gestalten. Schon vor Jahren habe ich übrigens in meiner Doktorarbeit, Dresden 1924: „Die Berechnung quadratischer Platten mit beliebigen Randbedingungen“ die Anwendung des Prinzips der virtuellen Verrückungen auf die Plattenberechnung, und zwar auf die Ermittlung der Einflußflächen von Schnittkräften gezeigt. Kirsten.

Alle Rechte vorbehalten

Eine vollständig geschweißte Straßenbrücke in Pilsen.

Von Dr.-Ing. Franz Faltus, Pilsen.

Die Zahl vollständig geschweißter Brücken ist nicht nur in Europa, sondern auch in Amerika noch verhältnismäßig gering¹⁾, besonders wenn man größere Spannweiten in Betracht zieht. Abb. 1 gibt eine Zusammenstellung vollständig geschweißter Fachwerkbrücken wieder.

Nachstehend soll über die erste vollständig geschweißte Brücke in der Tschechoslowakei berichtet werden, die im Herbst vorigen Jahres dem Verkehr übergeben wurde. Sie ist mit 49,2 m Stützweite derzeit die größte geschweißte Brücke der Welt.

Die neue Brücke liegt im westlichen Teil der Škodawerke in Pilsen und kreuzt als Straßenbrücke erster Klasse drei Gleisstränge in verschiedenen Höhenlagen, zwei Schnellzugslinien und eine Werksbahn, welche das Gelände des Werkes in zwei Teile trennen.

Aus dem schiefen Schnitt der Brückenachse mit den Gleisachsen und der Ausdehnung des bahneigenen Gebietes ergab sich für die Brücke eine Stützweite von 49,2 m.

Die Anordnung der Stahlkonstruktion entspricht der einer normalen genieteten Brücke. Die Hauptträger sind Trapezträger mit Dreiecksaufschaffung und einer Systemhöhe von 6400 mm. Der Hauptträgerabstand beträgt 8350 mm. Die Querträger sind vollwandig, 800 mm hoch, die Längsträger sind Walzträger I 40 von 6350 mm Stützweite. Die Fahrbahn ist als Eisenbetondecke, die über die Längsträger durchläuft, ausgebildet. Die 6,25 m breite Fahrbahn ist mit kleinen Granitwürfeln gepflastert, die zwischen den Hauptträgern liegenden Gehwege von 0,5 bzw. 1,0 m Breite sind mit abnehmbaren Eisenbetondecken abgedeckt, um die darunterliegenden Kabelkanäle zugänglich zu halten. Der östliche Hauptträger ist noch mit kurzen Konsolen zur späteren Überführung einer Rohrleitung versehen.

Der ursprüngliche Entwurf sah eine genietete Konstruktion vor. Die guten Erfahrungen, die die Škodawerke mit der Lichtbogenschweißung bei der praktischen Ausführung namhafter Konstruktionen des Hoch- und

Kranbaues zu sammeln Gelegenheit hatten²⁾, und die ermunternden Ergebnisse groß angelegter Versuche in der eigenen Versuchsanstalt führten dazu, auch für dieses wichtige Bauwerk die Lichtbogenschweißung vorzuschlagen. Es gelang, für diesen Gedanken die Zustimmung der Aufsichtsbehörde, des Eisenbahnministeriums, zu erlangen.

Von den verschiedenen Versuchen, die noch vor Inangriffnahme der Entwurfsarbeiten durchgeführt wurden und die unter anderem auch eigene Geschicklichkeitsprüfungen der Schweißer in Arbeiten an schwer zugänglichen Stellen und bei beschränktem Raum umfaßten, seien nur die Ergebnisse der Schweißung starker Querschnitte kurz mitgeteilt, da diese Ergebnisse für die weitere Gestaltung von besonderer Bedeutung waren. Bei einem Bauwerk dieser Abmessungen war damit zu rechnen, daß die

zu stoßenden Querschnitte die in der Werkstatt bisher üblichen Dimensionen beträchtlich übersteigen werden. Für diese Arbeiten waren daher die richtigen Arbeitsmethoden und Elektroden festzulegen. Bleche von 25 und 40 mm Stärke wurden durch V-X- und V-Nähte mit Einlage unter Benutzung verschiedener Elektroden verschweißt, in Probestäbe zerschnitten und mit und ohne abgearbeiteter Naht geprüft (Abb. 2). Die Ergebnisse zeigten, daß auch bei starken Querschnitten kein wesentlicher Unterschied zwischen der Festigkeit von V- und X-Nähten besteht und daß ferner wenig streuende und gute Ergebnisse nur mit Elektroden zu erzielen sind, auf welche die Schweißer eingearbeitet sind.

Da in der Tschechoslowakei derzeit noch keine Vorschriften für geschweißte Brücken bestehen, wurde nach einem vorläufigen, vom Eisenbahnministerium genehmigten Entwurf gearbeitet. Die zulässigen Inanspruchnahmen der Schweißung wurden entsprechend den tschechoslowakischen Brückenbauvorschriften, die die Stoßzuschläge implizite durch Abstufung der zulässigen Inanspruchnahmen der einzelnen Brückenteile berücksichtigen, auch in ähnlicher Weise abgestuft. Von einer weiteren Abminderung unter Berücksichtigung der maximalen und minimalen Stabkräfte wurde jedoch bei Straßenbrücken abgesehen. Nachstehende Zusammenstellung (S. 143) enthält die verwendeten Werte.

Die Bemessung der Querschnitte und die Durchbildung der Einzelheiten mußte gut erwogen werden, um schweißgerechte Profile und Verbindungen zu erhalten. Hierbei mußte meist aus den eigenen Erfahrungen geschöpft werden, da für diese Verhältnisse wohl kaum Vorbilder zu finden sind. Beim Entwurf mußte insbesondere auf gute Zugänglichkeit der zu schweißenden Bauteile gesehen werden, was oft nicht allzu leicht war. Überkopfschweißungen wurden gänzlich vermieden, mit Ausnahme einiger Nähte, die als Dichtungsnähte aufgebracht wurden. Sämtliche Schweiß-

²⁾ Stahlbau 1932, Heft 3, Neuere vollständig geschweißte Stahlkonstruktionen.

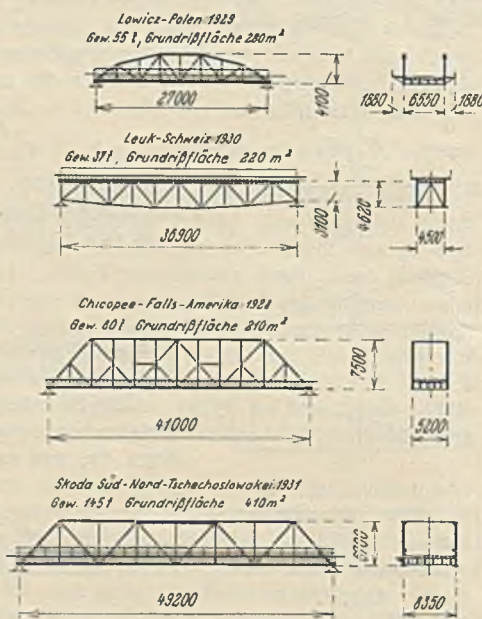


Abb. 1. Zusammenstellung vollständig geschweißter Fachwerkbrücken.

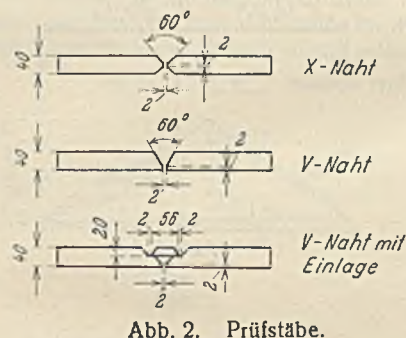


Abb. 2. Prüfstäbe.

¹⁾ Mc. Kibben zählt in der Zeitschrift Welding 1931, Nr. 9, auf, daß bis jetzt in Amerika 183 Gebäude und 46 Brücken geschweißt wurden, davon jedoch nur sieben Brücken vollständig.

Zulässige Inanspruchnahmen bei Straßenbrücken in kg/cm².

	Grundmaterial	Schweiße Zug	Schweiße Druck	Ab-scherung
Fahrbahngerippe . . .	850	550	800	500
Hauptträger bis 10 m	900	600	850	550
Hauptträger von L m				
Stützweite	870 + 3 L	580 + 2 L	820 + 3 L	530 + 2 L
Jedoch nicht mehr als	1250	750	1100	700
Alle Einflüsse einschl.				
Wind	1350	900	1250	800

nähte sind durchlaufend ausgeführt, obwohl in vielen Fällen unterbrochene Nähte ausgereicht hätten.

Bei der Bemessung der Schweißverbindungen wurde die Starrheit der Verbindung und die daraus entspringende Kontinuität beachtet, wenn dies auch bei der Bemessung der Querschnitte selbst nicht beachtet wurde oder werden konnte. So wurden z. B. die Längsträger als Zwei-

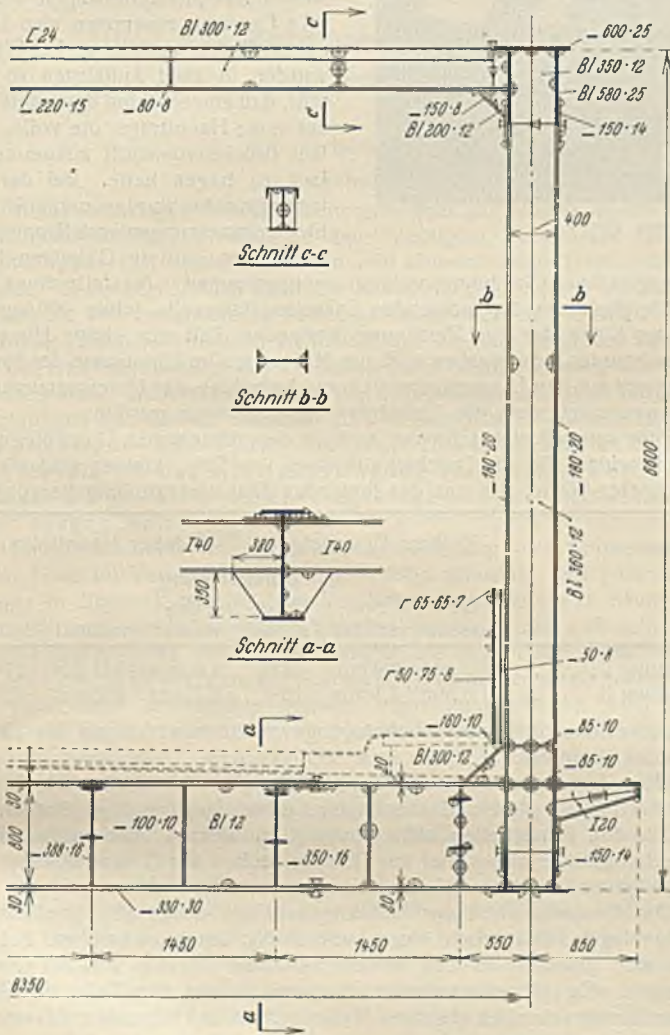


Abb. 3. Querschnitt der Brücke.

stützträger bemessen³⁾, bei der Verbindung mit den Querträgern jedoch wurden die möglichen Stützmomente berücksichtigt. Trotzdem sind die Einzelheiten wesentlich einfacher als bei genieteteter Ausführung (s. Abb. 3). Die Anpassung des Querträgerquerschnittes an den Momentenverlauf wird durch Abstufung des Querschnittes der beiden Gurtplatten erreicht. Die inneren Gurtplatten in Querträgermitte sind 330 · 30 mm, die äußeren 330 · 20 mm stark.

Bei der Bemessung der Stabquerschnitte der Hauptträger wurde die Anwendung starker Einheiten nicht gescheut, da die Versuche die gute Schweißbarkeit auch starker Profile erwiesen hatten. Die Vereinfachungen, die daraus entspringen, zeigen deutlich die Abb. 4 u. 5, die zwei Knotenpunkte des Fachwerkes in geschweißter und genieteteter Ausführung einander gegenüberstellen. Der mittlere Obergurtstab des Fachwerkes (Abb. 4) (größte Gurtstabskraft 368 t) besteht in geschweißter Ausführung aus zwei Stehblechen 450 · 25, einer Gurtplatte 600 · 40 und aussteifenden Flachstählen

³⁾ Eine genauere Berechnung der Längsträger als Durchlaufbalken auf elastischen Stützen ergibt für die mittleren Längsträger infolge der verhältnismäßig niedrigen Querträger nur wenig kleinere Mittelmomente, die eine Verkleinerung des Trägerprofils nicht rechtfertigen würden.

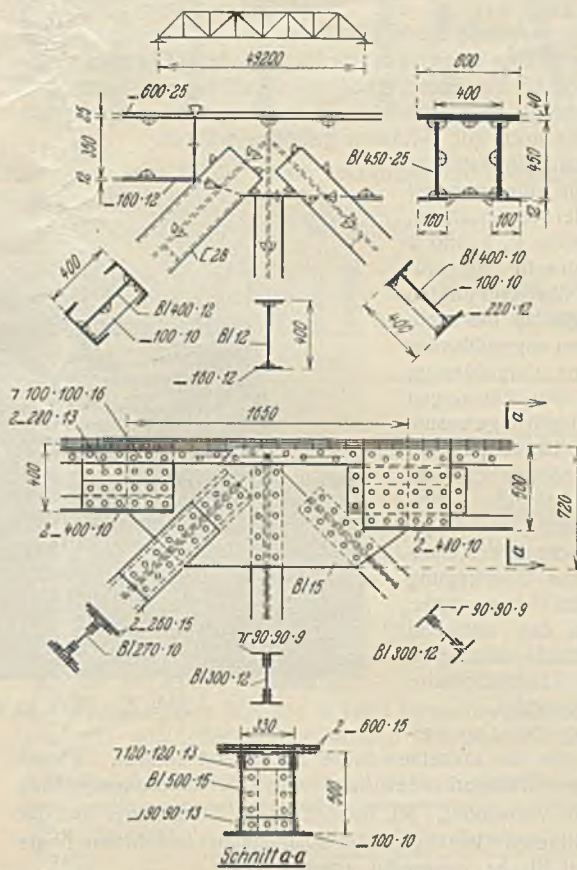


Abb. 4. Vergleich eines geschweißten und eines genieteten Obergurtknotenpunktes.

querschnitten sind Stumpfnähte durch aufgeschweißte Laschen von mindestens der halben Fläche des zu stoßenden Teiles verstärkt, so daß in dem verstärkten Querschnitt die zulässige Beanspruchung der Schweißnaht auf Zug nicht überschritten wird. Damit ist auch der

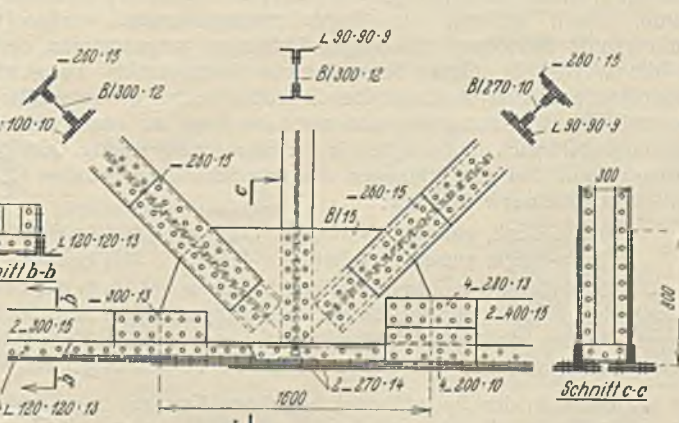
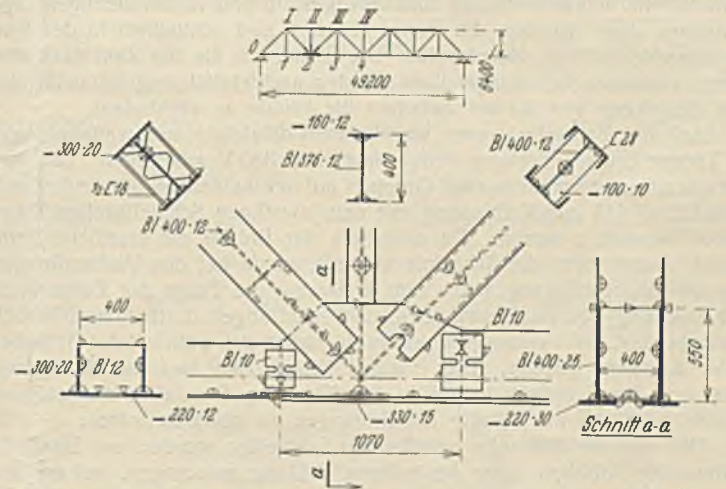


Abb. 5. Vergleich eines geschweißten und eines genieteten Untergurtknotenpunktes.

160 · 12, während in genieteteter Ausführung zehn Querschnittsteile nötig wären. Um die Höhenlage der Gurtschwerachsen zu wahren, sind die Stehblechhöhen der Gurte abgestuft. Die Diagonalen sind ebenso wie die Gurtungen aus Breitstählen zusammengesetzt, da mit einer Verwendung von Breitflanschträgern nicht zu rechnen war. Die Stöße der auf Druck beanspruchten Obergurte sind als einfache Stumpfstöße durchgebildet, da infolge der Knickabminderung der Stäbe die reine Druckbeanspruchung der Schweißnähte die zulässigen Werte nicht überschreitet. In Zug-

querschnitten sind Stumpfnähte durch aufgeschweißte Laschen von mindestens der halben Fläche des zu stoßenden Teiles verstärkt, so daß in dem verstärkten Querschnitt die zulässige Beanspruchung der Schweißnaht auf Zug nicht überschritten wird. Damit ist auch der

Grundsatz eingehalten, daß in den Hauptgliedern keine Zugkraftübertragung durch Stumpfstoße allein stattfindet, sondern immer ein Teil der Kräfte durch Kehlnähte übertragen wird⁴⁾. Bei der gewählten Querschnittsausbildung und der Forderung, Überkopfschweißungen zu vermeiden, konnte auf der Montage allerdings nicht vermieden werden, daß auch 30 mm starke Platten noch mit V-Nähten gestoßen wurden.

Der Anschluß der Diagonalen an die Gurtungen erfolgt unter genauer Zusammenführung der Schwerachsen. In den Knotenpunkten 0, 1 und 2 sind kleine Knotenbleche angeordnet, während in den übrigen Punkten die Diagonalen direkt an die Stehbleche der Gurtungen angeschlossen sind. Es wäre ohne Vergrößerung der Stehblechhöhe der Gurtungen und ohne Zwang möglich gewesen, auch in den äußeren Knotenpunkten die für den Anschluß nötigen Schweißnähtlängen unterzubringen. Eine überschlägige Rechnung zeigt jedoch, daß der Querschnitt des Gurtstehbleches nicht zur Übertragung der Querkkräfte hinreichen würde. Um wenigstens in den mittleren Knoten ohne Stehblech auszukommen, wurden die Gurtstehbleche entsprechend stark gewählt.

Die Ausbildung der Querverbände und Bindebleche der einzelnen Stäbe ist äußerst einfach. Winkel wurden nur bei den Windverbänden, und dort als zusammengesetzte Γ - und \perp -Profile verwendet. Mit Ausnahme der Längsträger und der aus \square -Profilen gebildeten Gurtungen der Diagonalen im dritten Felde sind nur Platten und Bleche verwendet worden.

Die Werkstattarbeiten gingen ohne Störung glatt vonstatten, dank der Erfahrungen, die bei früheren Arbeiten gesammelt werden konnten.

Auch die Montage der Konstruktion und die Baustellenschweißungen bereiteten keine wesentlichen Schwierigkeiten. Der vorher aufgestellte Arbeitsplan legte genau die Reihenfolge der einzelnen Arbeiten fest und konnte ohne Änderung eingehalten werden. Die Montage wurde auf festem Gerüst durchgeführt. Die einzelnen Teile der Konstruktion wurden zunächst mit Schraubenbolzen zusammengestellt und in der richtigen Lage gehalten, dann wurden die Teile gehaftet und schließlich in der festgelegten Reihenfolge verschweißt. Die Löcher für die der Zahl nach sehr knapp bemessenen Montagebolzen wurden nachträglich zugeschweißt, um das Eindringen von Wasser zwischen die Profile zu verhindern.

Auf der Baustelle waren vier Siemens-Gleichstromschweißumformer in Tätigkeit, die auf einem Primärstrom von 380 V arbeiteten. Die vier Einzelumformer waren in zwei Gruppen auf den beiden Brückenenden aufgestellt, so daß zur Verbindung mit den jeweiligen Schweißstellen lange Kabel notwendig waren. Da unterhalb der Brücke die staatliche Fernsprechleitung neben der Bahnlinie verläuft, wurde bei den Verhandlungen um die Baubewilligung wohl zum erstenmal die Frage der Zulässigkeit der Kreuzung von staatlichen Schwachstromleitungen durch Schweißkabelnien berührt. Wie vorausgesehen wurde, haben sich während des Betriebes keine Anstände gezeigt. Die einzigen Klagen, die laut wurden, kamen von den Rundfunkteilnehmern in der Nähe der Baustelle, die während des Schweißbetriebes ständig mit Störungen zu kämpfen hatten.

Die auf der Baustelle arbeitenden Schweißer wurden vor Inangriffnahme der Arbeiten einer besonderen Prüfung unterzogen, bei der besonderer Wert auf gute Fertigkeit im Schweißen an vertikaler Wand gelegt wurde. Auch während der Baustellenschweißungen wurden einige Prüfungen in besonders schwierigen Stellungen vorgenommen, um auch für die Wertigkeit solcher Schweißungen Anhaltspunkte zu gewinnen. Außer den normalen vorgeschriebenen Proben hatten die Schweißer noch 25 mm-Bleche in horizontaler und vertikaler Lage zu verschweißen, um noch besonders auch die Fertigkeit in der Schweißung starker Querschnitte nachzuweisen. Bei den Prüfungen von acht Schweißern wurden folgende Festigkeitsmittelwerte erhalten:

	Horizontal	Vertikal
10 mm-Blech, einseitige V-Naht ⁵⁾	37,9	34,4 kg/cm ²
25 mm-Blech, einseitige V-Naht ⁵⁾	41,9	38,4 kg/cm ²

Die Reihenfolge der einzelnen Schweißarbeiten war bis in die kleinsten Einzelheiten genau festgelegt, um den Schweißspannungen tunlichst zu begegnen. In den einzelnen Arbeitsabschnitten wurde durch Kontrollhöhenmessungen festgestellt, ob keine unzulässigen Verformungen eingetreten

⁴⁾ Neuere in der Durchführung begriffene Versuche zur Feststellung der Schweißfestigkeit von geschweißten Zugstößen verschiedenartiger Ausbildung lassen jedoch eine nicht unbeträchtliche Überlegenheit des Stumpfstoßes erkennen.
Die Schriftleitung.

⁵⁾ Auf Blechdicke abgearbeitet.

waren, um nötigenfalls noch rechtzeitig eingreifen zu können. Die Arbeit gelang ohne solche Maßnahmen. Die mit 60 mm vorgeschriebene Überhöhung der Hauptträger wurde fast genau eingehalten. Der rechte Hauptträger wies nach Vollendung der Schweißarbeiten eine Überhöhung von 58 mm, der linke eine solche von 54 mm auf, was sicherlich befriedigend ist.

Nach Absenken der Konstruktion auf die Lager wurde neuerdings die Überhöhung gemessen und die Durchbiegung unter dem Eigengewicht der Brücke mit 9 mm festgestellt. Die Berechnung hatte 10 mm ergeben. Nach Fertigstellung der Eisenbetondecke und der Pflasterarbeiten wurde eine weitere Durchbiegung von 16 bzw. 17 mm beobachtet, während 21 mm erwartet wurden. Vor Inbetriebnahme des Bauwerkes wurde eine strenge Belastungsprobe vorgenommen, bei der sieben Dampfloktraktoren von je 16 t Gewicht, zusammen also 112 t, auf die Brücke auffuhren. Die Wagen wurden in zwei Auffahrten so verteilt, daß abwechselnd der rechte und der linke Hauptträger die volle, ihm laut Brückenvorschrift zukommende Last zu tragen hatte. Bei der Belastungsprobe wurden neben Durchbiegungsmessungen auch Spannungsmessungen mittels Okhuizen-Hug-



Abb. 6. Blick in die fertige Brücke.

genbergerschen Spannungsmessern vorgenommen, die allerdings bei der Kleinheit des zu messenden Spannungsintervalls (etwa 400 kg/cm²) und der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit nur einige Hinweise geben konnten. So ergaben z. B. die Messungen im Untergurte der Hauptträger und auf den Längsträgern, daß zur Aufnahme der Untergurtzugkräfte ganz wesentlich auch die Längsträger herangezogen werden.

Dies spiegelt sich teilweise auch in den gemessenen Durchbiegungswerten wider, die im Durchschnitt etwa um 20% kleiner sind als die berechneten Werte, wie aus der folgenden Zusammenstellung hervorgeht:

	Rechter Hauptträger			Linker Hauptträger		
	Ge-messen	Be-rechnet	Unter-schied	Ge-messen	Be-rechnet	Unter-schied
Belastung I . . .	8,1 mm	9,9 mm	18%	8,8 mm	12,0 mm	27%
Belastung II . . .	11,0 mm	13,1 mm	16%	6,7 mm	8,2 mm	18%

Die gemessene bleibende Durchbiegung von 0,2 bzw. 0,5 mm der Hauptträger ist belanglos.

Über das Aussehen der fertigen Brücke unterrichtet die Abb. 6. Die Konstruktion ist glatt und ebenflächig, jedoch genügend gegliedert, um auch in den Einzelheiten nicht eintönig zu wirken. Die vollwandigen Ausfachungsstäbe tragen viel zur Geschlossenheit der Gesamtwirkung bei, die im guten Sinne des Wortes als modern zu bezeichnen ist.

Das Gesamtgewicht der Stahlkonstruktion beträgt einschließlich der Stahlgußlager 145 t; nach einem vollständig durchgearbeiteten Entwurf hätte eine genietete Brücke derselben Ausmaße 175 t, also 20% mehr gewogen. Zu dieser namhaften Ersparnis tragen alle Teile der Stahlkonstruktion in ziemlich gleichem Maße bei, wie der folgenden Zusammenstellung zu entnehmen ist.

Gewicht der Konstruktion.

	Geschweißt	Genietet	Unterschied	
Hauptträger	77 250 kg	92 750 kg	15 500 kg	20,0%
Querträger, Längsträger	54 100 „	66 300 „	12 200 „	22,5%
Windverbände usw. . . .	9 600 „	11 100 „	1 500 „	15,6%
Stahlgußlager	4 750 „	4 750 „	—	—
Zusammen	145 700 kg	174 900 kg	29 200 kg	20,0%

Trotzdem die Montage, die sehr behutsam und angesichts der Neuheit der Arbeit auch langsam ausgeführt wurde, teurer zu stehen kam als die normale Montage einer genieteten Brücke, ist doch das Gesamtergebnis zugunsten der geschweißten Brücke ausgefallen. Der erste Bau einer geschweißten Brücke in der Tschechoslowakei bedeutete daher einen nicht nur in technischer Beziehung ermutigenden Erfolg.

INHALT: Allgemeine Methode zur Darstellung der Einflußlinien von Balken und Rahmen-tragwerken. Zuschrift. Erwiderung. — Eine vollständig geschweißte Straßenbrücke in Pilsen.

Für die Schriftleitung verantwortlich: Geh. Regierungsrat Prof. A. Hertwig, Berlin-Charlottenburg. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin W3. Druck der Buchdruckerei Gebrüder Ernst, Berlin SW 68.