

Zeitschrift: IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen

Band: 4 (1936)

Artikel: Bogenträger mit schräg gestellten Hängestangen

Autor: Nielsen, O.F.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-5092>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 20.02.2026

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

BOGENTRÄGER MIT SCHRÄG GESTELLTEN HÄNGESTANGEN.

PONT EN ARC AVEC SUSPENTES OBLIQUES.

ARCH BRIDGES WITH INCLINED HANGERS.

Dr. sc. techn. O. F. NIELSEN, Direktor der Sv. A. B. Christiani & Nielsen, Stockholm.

Unter einem veränderlichen System versteht man ein Konstruktionssystem, für welches ein oder mehrere der Konstruktionsteile unter Einfluß der äußeren Belastung außer oder in Funktion gesetzt werden.

Eines der bekanntesten dieser Systeme ist der Träger mit sich kreuzenden, schlaffen Diagonalen. Für verschiedene Belastungen sind die Systeme von Zugdiagonalen, die wirksam sind, verschieden. Ferner kann das Rad mit den schlaffen Speichen als ein gutes Beispiel für eine Konstruktion mit einem veränderlichen System, das große Festigkeit mit kleinen Dimensionen vereint, erwähnt werden.

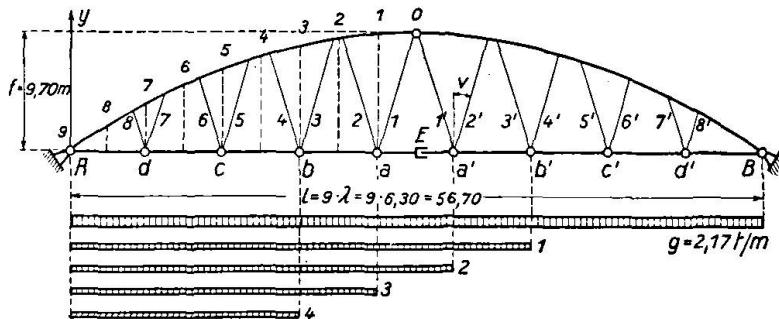


Fig. 1.

Im ersten Band der „Abhandlungen“ der Internationalen Vereinigung für Brückenbau und Hochbau, 1932, Seite 355, ist ein Auszug aus der Dissertation des Verfassers über veränderliche Systeme wiedergegeben, und es ist darin eine Neukonstruktion erwähnt, die diesen Systemen angehört. Diese Konstruktion, der Bogenträger mit den schräg gestellten Hängestangen, ist sehr häufig zur Verwendung gelangt, da sie den Vorteil bietet, daß die Bogen zur Hauptsache nur durch Normalkräfte beansprucht werden. Hierdurch wird erzielt, daß der Bogen bei größerer Spannweite wirtschaftlicher wird als wenn die Hängestangen senkrecht stehen und daß dank der Reduktion der Momente die Deformationen und damit auch die Durchbiegungen sehr gering sein werden. Im Nachfolgenden soll die spezielle Wirkungsart eines Bogenträgers mit schräg gestellten Hängestangen näher beschrieben werden.

In Fig. 1 wird ein Beispiel einer solchen Konstruktion gezeigt — in diesem Falle ein Dreigelenkbogen mit schräg gestellten Hängestangen. Dieser besitzt Auflagergelenke bei *A* und *B* und ein Scheitelgelenk bei *O*. Die Fahrbahn

A—E—B ist mittels Hängestangen, die in einer solchen Weise schräg gestellt sind, daß sie paarweise mit gleicher und entgegengesetzter Neigung von einem und demselben Punkte im Untergurt ausgehen, an dem Bogen angehängt. Unter Hängestangen werden solche Stangen verstanden, die nur Zugkräfte aufnehmen können, sodaß sie, wenn auf Druck beansprucht, außer Wirkung gesetzt werden. Die Fahrbahn ist mit Gelenken an den Knotenpunkten der Hängestangen versehen gedacht und in der Mitte bei Punkt *E* mit einem solchen Gelenk ausgerüstet, das Längenverschiebungen zuläßt, dagegen keine Winkeländerung.

Die Konstruktion ist ein veränderliches System, weil die Hängestangen nur Zugbeanspruchungen aufnehmen können. Wenn eine der Hängestangen Druck bekommt, wird sie außer Wirkung gesetzt, sodaß die Belastung nur an der zweiten Hängestange hängt.

Wird der Bogen mit dem Eigengewicht der Fahrbahn belastet, so entstehen — abgesehen von den durch die Deformationen verursachten Änderungen — gleich große Zugspannungen in beiden von einem und demselben Punkt ausgehenden Hängestangen. Diese besitzen daher von dem Eigengewicht Zugspannungen. Wird jetzt eine Belastung p aufgebracht (Fig. 1), so werden in gewissen Hängestangen Druckspannungen entstehen; ist diese Belastung p indessen genügend klein, dann werden die Druckspannungen kleiner bleiben als die Zugspannungen infolge des Eigengewichtes g und der gleichzeitig wirkenden Belastung p auf die linke Bogenhälfte.

Wird jetzt die Belastung p erhöht, so werden die durch die Belastung hervorgebrachten Spannungen in den Hängestangen proportional damit erhöht. Ist also die durch das Eigengewicht hervorgebrachte Zugspannung in der Stange $3'$ gleich $S_g 3'$, und die durch Belastung p hervorgebrachte Druckspannung in derselben Stange $S_p 3'$, so lautet die sich ergebende Spannung in der Stange $3'$

$$S(g + p) 3' = S_g 3' - S_p 3'.$$

Wird p erhöht, sodaß $S_g 3' = S_p 3'$, und die resultierende Spannung in der Stange $3'$ gleich Null ist, so haben wir dadurch den Wert von $p = p_1$, der die Spannung Null in der Stange $3'$ ergibt, gefunden, vorausgesetzt, daß kein geringerer Wert von p die Spannung Null in irgendeiner anderen Stange hervorgebracht hat. Läßt man jetzt p weiter steigen, so wird Stange $3'$ spannungslos bleiben, und das System enthält eine Überzählige weniger.

Läßt man nun p fortgesetzt vom Werte Null an steigen, so kann verfolgt werden, in welcher Reihenfolge die verschiedenen Hängestangen außer Wirkung treten und gleichzeitig auch, wie die Spannungen in den übrigen Hängestangen variieren. Ferner kann untersucht werden, welches die Einflüsse auf die Bogenmomente sind.

Die Untersuchung des Einflusses auf die Konstruktion, wenn die Belastung p von Null ab steigt, während deren Lage festgehalten wird, wird hier für die in Fig. 1 gezeigte Konstruktion ausgeführt. Zwecks Übersichtlichkeit ist eine Konstruktion mit relativ kleiner Spannweite und wenig Hängestangen gewählt worden, wenn auch die Ergebnisse bei Konstruktionen mit größeren Spannweiten noch deutlicher würden. Die Berechnung ist für die in Fig. 1 gezeigten Belastungsfälle 1, 2, 3 und 4 ausgeführt.

Als Hauptsystem ist das System gewählt worden, das man dadurch erhält, daß die Knotenpunkte der Hängestangen von dem Untergurt gelöst und die wagerechten Komponenten der Reaktionen der Knotenpunkte auf die Fahrbahn als Überzählige eingeführt werden. Das Berechnungssystem ist in Fig. 2 angegeben.

Der Querschnitt der Konstruktion geht aus Fig. 3 hervor.

Da die Fahrbahn in Wirklichkeit nicht durch Gelenke an den Knotenpunkten der Hängestangen angeschlossen ist, ist bei der Berechnung der Momentenbeiträge die Steifigkeit der Fahrbahn mit berücksichtigt.

In untenstehender Tabelle (1) sind die Ordinaten y des Bogens über der Fahrbahn angegeben, indem die Bogenform als Drucklinie für das Eigengewicht sowohl des Bogens als auch der Fahrbahn bestimmt ist. Die Konstruktion ist symmetrisch zur Mitte.

| Punkt | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | A |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| y in m | 9,700 | 9,583 | 9,230 | 8,640 | 7,811 | 6,742 | 5,429 | 3,870 | 2,062 | 0 |

(1)

Die Hängestangen sind aus Rundeisen 40 mm ausgeführt, $f = 12,6 \text{ cm}^2$, und bilden alle denselben Winkel ν ($\sin \nu = 0,2883$, $\tan \nu = 0,301$) mit der Vertikalen. Die Längen der Hängestangen sind in der Tabelle (2) angegeben.

| Stange Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| Länge in m | 10,10 | 9,70 | 9,50 | 8,40 | 7,90 | 6,30 | 4,80 | 3,40 |

(2)

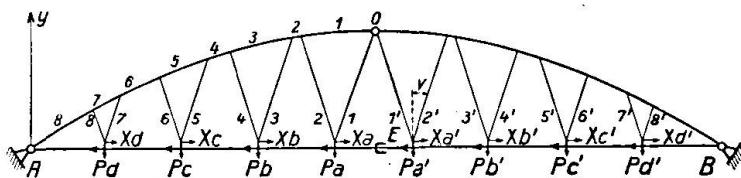


Fig. 2.

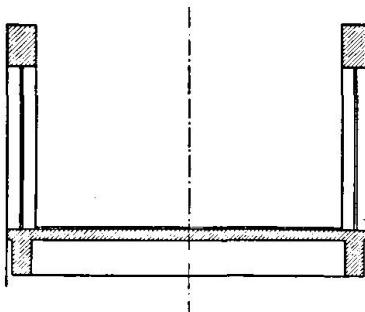


Fig. 3.

Die Querschnittsfläche des Bogens F_b , und das Trägheitsmoment des Bogens J_{bogen} und der Fahrbahn J_a , sowie die Summe von diesen, J_b , ist für die verschiedenen Bogenlängen in der Tabelle (3) angegeben:

| Bogen F_b in cm^2 | 0–2 | 2–4 | 4–6 | 6–8 |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $J_{bogen} \cos \varphi$ cm^4 | 3 055 | 3 165 | 3 280 | 3 390 |
| J_a cm^4 | 1 093 000 | 1 186 000 | 1 259 000 | 1 312 000 |
| $J_b = J_{bogen} \cos \varphi + J_a$ | 3 190 000 | 3 190 000 | 3 190 000 | 3 190 000 |
| | 4 283 000 | 4 376 000 | 4 449 000 | 4 502 000 |

(3)

Bei der Berechnung wird der Elastizitätskoeffizient für Bogen und Fahrbahn gleich 210000 kg/cm^2 und der Elastizitätskoeffizient für die Hängestangen gleich 2100000 kg/cm^2 eingesetzt.

Da die Kraft $X_a = -1$ nur Spannungen in der linken Bogenhälfte ergibt, müssen die Elastizitätsgleichungen für jede Bogenhälfte für sich angeschrieben werden. Für die linke Bogenhälfte erhält man:

$$\begin{aligned} X_a \cdot \delta_{aa} + X_b \cdot \delta_{ab} + X_c \cdot \delta_{ac} + X_d \cdot \delta_{ad} &= \delta_a^0 \\ X_a \cdot \delta_{ab} + X_b \cdot \delta_{bb} + X_c \cdot \delta_{bc} + X_d \cdot \delta_{bd} &= \delta_b^0 \\ X_a \cdot \delta_{ac} + X_b \cdot \delta_{bc} + X_c \cdot \delta_{cc} + X_d \cdot \delta_{cd} &= \delta_c^0 \\ X_a \cdot \delta_{ad} + X_b \cdot \delta_{bd} + X_c \cdot \delta_{cd} + X_d \cdot \delta_{dd} &= \delta_d^0 \end{aligned}$$

Für die rechte Bogenhälfte werden die Gleichungen analog und die Koeffizienten haben denselben Wert. Ferner ist

$$\begin{aligned} \delta_{ac} &= \delta_{bc} \\ \delta_{ad} &= \delta_{bd} = \delta_{cd}. \end{aligned}$$

Bei der Berechnung von δ_{aa} , δ_{ab} usw. wird nur für die Hängestangen Rücksicht auf den Beitrag der Normalkräfte genommen. Bei der Berechnung von δ_a^0 , δ_b^0 usw. wird der Beitrag der Normalkräfte, der sowohl von den Hängestangen als auch vom Bogen herrührt, berücksichtigt. Die Koeffizienten können annäherungsweise gemäß den nachstehenden Formeln berechnet werden:

$$\begin{aligned} \delta_{aa} &= \int_A \frac{y^2}{E \cdot J_b} dx + \frac{l_1 + l_2}{E_j \cdot F_j \cdot 4 \sin^2 v} \\ \delta_{ab} &= \int_A \frac{y^2}{E J_b} dx \\ \delta_a^0 &= - \int_A \frac{M^0 \cdot y}{E J_b} dx + \sum \frac{H}{E F_b} \Delta S + \frac{P_a(l_1 - l_2)}{E_j F_j \cdot 2 \cdot \sin 2 v}. \end{aligned}$$

In diesen Formeln bezeichnen l_1 und l_2 die Längen der Hängestangen durch Punkt a . M^0 und H sind Moment und Horizontalkraft, die von der Belastung p im Hauptsystem herrühren. P_a ist die von der Belastung p herührende Knotenpunktsbelastung. Da es bei dieser Berechnung nur von Interesse ist, die Wirkungsweise des Systems für die Belastung p zu untersuchen, sieht man von Formänderungen, die das Eigengewicht hervorbringt, ab. Die Fahrbahn wird am Bogen angehängt gerechnet, in einer solchen Weise, daß die Spannungen, die von dem Eigengewicht der Fahrbahn in den von ein und demselben Punkte ausgehenden Hängestangen entstehen, gleich groß sind.

Nach der Berechnung der Koeffizienten erhalten die Elastizitätsgleichungen die in den Formeln (4) angegebene Form:

$$\begin{aligned} 136 X_a + 67 X_b + 25 X_c + 5 X_d &= \delta_a^0 \\ 67 X_a + 79 X_b + 25 X_c + 5 X_d &= \delta_b^0 \\ 25 X_a + 25 X_b + 36 X_c + 5 X_d &= \delta_c^0 \\ 5 X_a + 5 X_b + 5 X_c + 13 X_d &= \delta_d^0 \end{aligned} \tag{4}$$

Man kann jetzt für den in Fig. 1 angegebenen Belastungsfall 1 die Werte von δ_a^0 , δ_b^0 usw. als Funktionen von p berechnen und danach von den Elastizitätsgleichungen die Werte von X_a , X_b usw. bestimmen.

Für den Belastungsfall 1, rechte Bogenhälfte, erhält man:

$$\begin{aligned} 10^4 \delta_{a'}^0 &= -628 p & X_{a'} &= -2,90 p \\ 10^4 \delta_{b'}^0 &= -458 p & X_{b'} &= -2,46 p \\ 10^4 \delta_c^0 &= -230 p & X_c &= -2,42 p \\ 10^4 \delta_{d'}^0 &= -60 p & X_{d'} &= -1,62 p \end{aligned}$$

Da X_c' am größten ist und Punkt c' keine Belastung von p erhält, ist Stange 5' diejenige, welche in diesem Belastungsfall zuerst die Nullspannung

erhält. Die Spannung in Stange 5', von dem Eigengewicht g herrührend, ist:

$$S_{g5'} = \frac{g \cdot \lambda}{2} \cdot \frac{1}{\cos \nu}$$

und von der Belastung p herrührend:

$$S_{p5'} = \frac{x_c}{2 \sin \nu}$$

Wenn die sich ergebende Spannung gleich Null sein soll, muß sein:

$$S_{g5'} + S_{p5'} = 0 = \frac{2,17 \cdot 6,30}{2} \cdot \frac{1}{\cos \nu} - \frac{2,42 p}{2 \sin \nu}$$

$$p = \frac{2,17 \cdot 6,30}{2,42} \cdot 0,301 = 1,70 \text{ t/m.}$$

Für $p = 1,70 \text{ t/m}$ wird Stange 5' im Belastungsfall 1 (Fig. 1) also Nullspannung erhalten, unter der Voraussetzung, daß keine der Stangen auf der linken Bogenhälfte Nullspannung für eine geringere Last erhält. Bei der Lösung der Elastizitätsgleichungen für die linke Bogenhälfte erhält man indessen in diesem Fall:

$$\begin{aligned} X_a &= -1,43 p & X_c &= -0,27 p \\ X_b &= -0,70 p & X_d &= +0,23 p. \end{aligned}$$

Hier ist X_a am größten, aber da die Knotenpunktsbelastung P_a in diesem Falle $(g+p)\lambda$ ist, kann Stange 2 nicht vor Stange 5' Nullspannung erhalten. Die angegebenen Werte von X zeigen, daß keine der Stangen auf der linken Bogenhälfte beim Belastungsfall 1 Nullspannung erhalten und dadurch außer Wirkung gesetzt werden können, da die Bedingung hierfür ist, daß p negativ sein soll.

Für $p = 1,70 \text{ t/m}$ ist somit im Belastungsfall 1 Stange 5' die einzige, die außer Funktion ist. Wird p größer als $1,70 \text{ t/m}$, so hängt die Knotenpunktsbelastung in Punkt c' nur in Stange 6' und bei der fortgesetzten Variation von p soll X_c' in den Elastizitätsgleichungen konstant gleich $-4,12$ sein, da

$$X_c' = -2,42 \cdot p = -2,42 \cdot 1,70 = -4,12.$$

Die Elastizitätsgleichungen für das neue System, wo Stange 5' außer Wirkung gesetzt ist, geht aus den ursprünglichen Elastizitätsgleichungen hervor, indem man $X_c' = -4,12$ einsetzt und die Gleichungen für X_c' ausläßt (siehe Abhandlungen Erster Band, Seite 359). Die Elastizitätsgleichungen für die rechte Bogenhälfte lauten daher wie folgt:

$$\begin{aligned} 136 X_{a'} + 67 X_{b'} - 25 \cdot 4,12 + 5 X_{d'} &= -628 p \\ 67 X_{a'} + 79 X_{b'} - 25 \cdot 4,12 + 5 X_{d'} &= -458 p \\ 5 X_{a'} + 5 X_{b'} - 5 \cdot 4,12 + 13 X_{d'} &= -60 p. \end{aligned}$$

Aus diesen Gleichungen entnimmt man ebenso wie oben, daß Stange 7' Nullspannung für $p = 2,36 \text{ t/m}$ erhält. Wenn auf diese Weise fortgefahrt wird, so kann man nach und nach die Werte von p bestimmen, für welche die Hängestangen nach und nach Nullspannungen erhalten, und man wird dadurch zuletzt feststellen, daß für $p = 3,37 \text{ t/m}$ die letzte Stange 1' außer Wirkung gesetzt wird. Durch eine weitere Erhöhung von p wird das System sich nicht ändern.

Tabelle 5.

| Belastungs- fall | Nullsp. in der Stange | schräg gestellten Hängestangen | | | | | | | | | | | | | | | | senkrechten Hängestangen | | | Anmerkung |
|---------------------|---------------------------------|--|---|--|---|---|---|---|---|--|--|--|---|--|--|--|--|--|--|-------------------------|-----------|
| | | p t/m | $-X_a$ | $-X_b$ | $-X_c$ | $-X_d$ | $-X_a'$ | $-X_b'$ | $-X_c'$ | $-X_d'$ | M_2 | M_4 | M_6 | M_8 | $M_{2'}$ | $M_{4'}$ | $M_{6'}$ | $M_{8'}$ | M_{max} | M_{min} | |
| 1 Fig. 1 | 5' 7' 3' 1' | 1,70 2,36 2,39 3,37 | 2,4 3,4 1,7 2,4 | 1,2 0,6 0,6 0,9 | 0,5 -0,5 -0,5 -0,8 | -0,4 6,9 7,0 10,5 | 4,9 6,3 7,0 7,3 | 4,2 4,1 4,1 4,1 | 4,1 4,1 4,1 4,1 | 2,8 2,8 4,1 4,1 | 5 7 10 10 | 7 8 0 8 | 0 0 5 0 | 3 5 -12 -13 | -12 -12 -31 -32 | -19 -19 -31 -32 | -11 -16 -17 -33 | M_4 36 49 50 71 | $M_{6'}$ -91 -126 -127 -179 | 1-8 nie spannungslös | |
| 2 Fig. 1 | 3'-1' 5' 7' | 1,70 1,83 2,29 | 4,4 4,7 5,9 | 2,4 2,6 3,3 | 1,4 1,5 1,9 | 0,2 0,3 0,3 | 5,8 5,9 6,3 | 4,1 4,1 4,1 | 3,5 2,4 2,4 | 2,1 2,4 4,1 | 6 6 8 | 12 10 16 | 9 2 2 | -2 -3 -8 | -14 -14 -20 | -14 -17 -38 | -8 -8 -14 | M_4 65 70 87 | $M_{4'}$ -91 -98 -123 | | |
| 3 Fig. 1 | 1' 2' 3' 5' 7' | 1,55 1,69 1,95 2,30 2,54 | 5,2 5,7 6,0 6,3 6,5 | 3,2 3,5 4,6 5,9 6,8 | 2,4 2,6 3,1 3,7 4,2 | 0,7 0,8 0,9 1,1 1,2 | 4,1 4,1 4,1 4,1 4,1 | 2,5 2,2 2,6 2,6 4,1 | 2,0 2,2 2,6 3,2 4,1 | 2,0 2,2 2,6 19 25 | 3 3 10 19 25 | 15 16 19 21 28 | 13 14 17 25 33 | 4 5 -15 -25 -32 | -4 -4 -13 -25 -36 | -9 -9 -10 -25 -32 | -9 -9 -10 -11 -16 | M_4 81 88 102 120 132 | $M_{4'}$ -61 -67 -77 -91 -100 | 1-8 nie spannungslös | |
| 4 Fig. 1 | 2 4' 1' 3' 6' 7' | 1,49 2,12 2,75 3,47 3,50 4,06 4,07 | 4,1 4,1 6,7 4,1 4,1 8,0 4,1 | 3,3 6,1 6,7 7,4 7,4 10,8 8,6 | 2,9 4,4 7,3 3,8 3,8 3,9 5,3 | 1,3 1,8 2,8 4,1 4,1 4,1 4,1 | 2,2 2,0 2,6 4,1 4,1 4,1 4,1 | 1,4 1,6 2,1 2,7 2,7 1,6 1,7 | 1,1 1,0 1,3 1,6 1,6 46 47 | 0,7 1,0 25 46 50 51 51 | -2 14 25 37 18 -16 -14 | 12 20 14 14 18 19 24 | 17 -4 -5 -9 -13 -11 -11 | -3 -7 -6 -8 -5 -5 -5 | -5 -4 -3 -4 -5 -5 -5 | -4 -2 -3 -4 -5 -5 -5 | 73 104 135 171 172 200 231 | -33 -47 -61 -77 -78 -90 -104 | | | |

Für die verschiedenen Werte von p kann man die Momente in den verschiedenen Punkten des Bogens berechnen. Für das Moment in Punkt 6' hat man z. B.

$$M_{6'} = M_{6'}^0 - X_{a'} y_{6'} - X_{b'} y_{6'} - X_{c'} y_{6'}.$$

Hier ist $M_{6'}^0$ das Moment im Hauptsystem. Alle übrigen Überzähligkeiten sind in diesem Falle ohne Einfluß auf das Moment in Punkt 6'. Ist Stange 5' im Belastungsfall 1 außer Funktion, so wird das Moment im Punkt 6'

$$M_{6'} = M_{6'}^0 - X_{a'} y_{6'} - X_b y_{6'} + 4,12 y_{6'},$$

indem X_c' beständig gleich $-4,12$ eingesetzt wird.

Werden die Berechnungen für sämtliche in Fig. 1 angegebenen vier Belastungsfälle durchgeführt, so können die Ergebnisse, wie in nachstehender Tabelle gezeigt, angegeben werden.

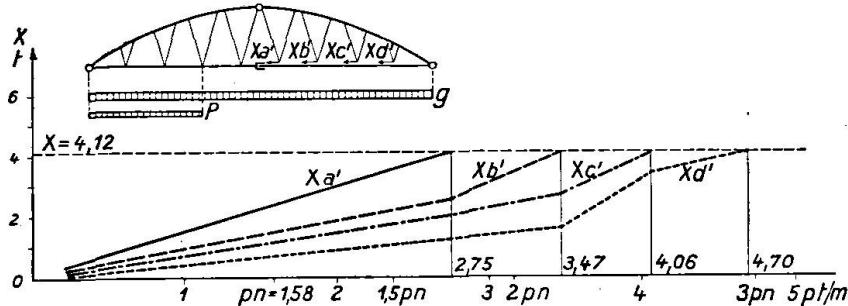


Fig. 4.

Für die Beurteilung der Bedeutung des angegebenen Wertes von p kann mitgeteilt werden, daß in den schwedischen Normen für Brückenbau die Belastungen p_n , für welche eine Brücke in den angeführten Fällen berechnet werden soll, wie folgt vorgeschrieben sind:

| | |
|------------------|--------------------------|
| Belastungsfall 1 | $p_n = 1,38 \text{ t/m}$ |
| " 2 | $p_n = 1,44 \text{ "}$ |
| " 3 | $p_n = 1,49 \text{ "}$ |
| " 4 | $p_n = 1,58 \text{ "}$ |

Durch Vergleich mit der Tabelle 5 stellt man fest, daß für die normalen Belastungen sämtliche Stangen in dem angegebenen Fall wirksam sind, mit Ausnahme des Belastungsfalls 4, wo Stange 2 unwirksam ist. Für diesen Belastungsfall wird das größte Moment in Punkt 6 gefunden, wo es für $p = 1,49 \text{ t/m}$ $M_6 = 17 \text{ tm}$ beträgt. Wird die Belastung p größer, so wird Stange 2 außer Funktion gesetzt, bis p den Wert $p = 2,12 \text{ t/m}$ erreicht, da außerdem Stange 4 Nullspannung erhält. Das Moment in Punkt 6 ist dann bis zu $M_6 = 25 \text{ tm}$ gestiegen. Wenn die Belastung p größer wird als $2,12 \text{ t/m}$, wird Stange 4 auch unwirksam werden, bis p den Wert $p = 2,75 \text{ t/m}$ erreicht, da Stange 1' Nullspannung und M_6 den Wert 37 tm erhält. Für den Belastungsfall 4 beträgt die normale Belastung gemäß den schwedischen Normen $p_n = 1,58 \text{ t/m}$ und das Moment in Punkt 6 folglich

$$M_6 = 17 + \frac{25 - 17}{2,12 - 1,49} \cdot (1,58 - 1,49) = 18,1 \text{ mt.}$$

Wird die Belastung um 50 % auf $p = 1,50 \cdot 1,58 = 2,37 \text{ t/m}$ erhöht, so beträgt das Moment in Punkt 6

$$M_6 = 25 + \frac{37 - 25}{2,75 - 2,12} (2,37 - 2,12) = 29,8 \text{ mt.}$$

d. h. das Moment ist in diesem Falle um 65 % gestiegen, wenn die Belastung um 50 % erhöht ist. Selbst wenn das Moment somit etwas schneller ansteigt als die Belastung, so werden die Momente in Bogenkonstruktionen mit schräg gestellten Hängestangen doch immer bedeutend unter den Momenten in einem Bogen mit senkrechten Hängestangen liegen, so wie es aus der Tabelle 5 hervorgeht, wo die Momente in einem Bogen mit senkrechten Hängestangen in den beiden äußersten Kolonnen angegeben sind. Selbst wenn die Belastung p um 50 % erhöht wird, so werden die Momente im Bogen mit schräg ge-

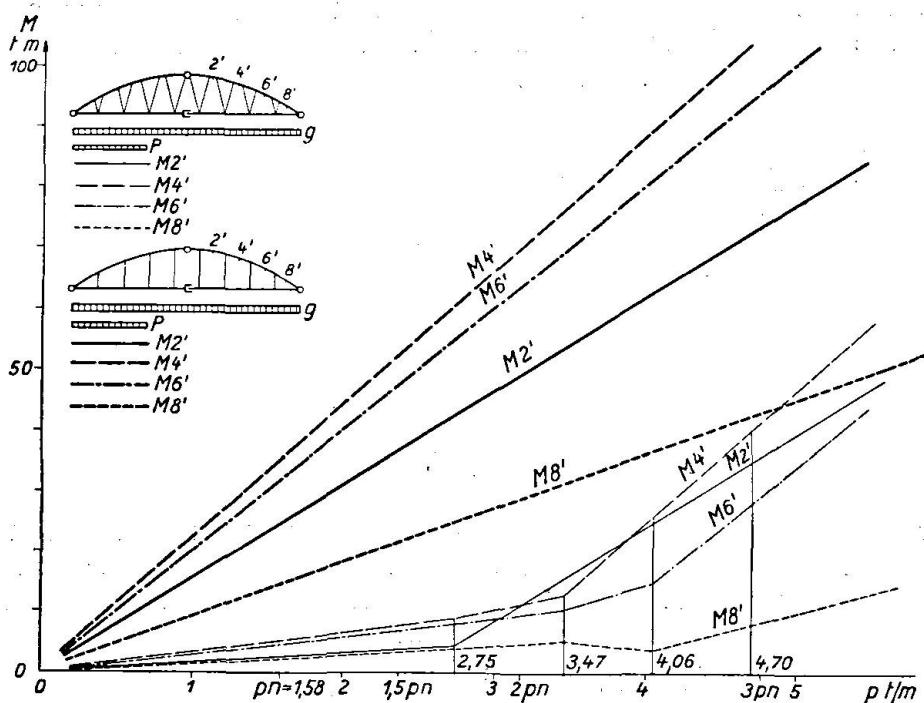


Fig. 5.

stellten Hängestangen so klein sein, daß der Bogen nur Druckspannungen erhält, für welche eine Betonkonstruktion eine große überschüssige Sicherheit besitzt. In diesem Zusammenhang kann erwähnt werden, daß eine fehlerhafte Bogenform bei dem Bogen mit schräg gestellten Hängestangen im wesentlichen nur Änderungen der Spannungen in den Hängestangen verursacht, während das Moment im Bogen hierdurch nur unwesentlich beeinflußt wird.

Für einen Bogen mit senkrechten Hängestangen kann dagegen eine fehlerhafte Ausführung der Bogenform Extramomente verursachen und damit Zugbeanspruchungen, die selbst bei kleinen Abweichungen von der richtigen Bogenform sehr wesentlich sein können. Wird die Belastung für diese Konstruktionen um 50 % erhöht, so werden die Zugbeanspruchungen dementsprechend erhöht, und diese Konstruktionen werden unter solchen Verhältnissen immer Risse im Beton zeigen.

In dieser Verbindung kann erwähnt werden, daß keine von den vielen Bogenkonstruktionen, die bis jetzt mit schräg gestellten Hängestangen ausgeführt worden sind, irgendeine Rißbildung im Beton gezeigt haben, trotzdem die Probobelastung in mehreren Fällen mit 75 % Überbelastung ausgeführt wurde.

Um die Variation der Spannungen mit der Belastung p graphisch zu veranschaulichen, sind in Fig. 4 Variationen der Werte $X_{a'}$, $X_{b'}$, $X_{c'}$ und $X_{d'}$ in dem in Fig. 1 gezeigten Belastungsfall 4 für einen steigenden Wert von p gezeigt. Wenn die X -Kräfte den Wert — 4,12 t erhalten, bekommt die entsprechende Stange Nullspannung, weshalb die X -Linie danach horizontal verläuft. Man sieht also, daß, wenn $p = 2,75$ t/m ist, $X_{a'}$ den Maximalwert erreicht, wonach Stange 1' unwirksam wird. Die Spannung in den übrigen Stangen steigt nun etwas stärker, und wenn $p = 3,47$ t/m ist, erreicht $X_{b'}$ den Maximalwert und Stange 3' wird unwirksam. Wenn $p = 4,70$ t/m ($p = 2,97 \cdot 1,58$) ist, d. h. 2,97 mal die normale Belastung, sind alle Stangen 1', 3', 5' und 7' auf der rechten Bogenhälfte außer Funktion. Die Hängestangen 2', 4', 6' und 8' auf der rechten Bogenhälfte werden also eine Zugspannung

$$P = g \cdot \lambda \sec \varphi = 2,17 \cdot 6,30 \cdot 1,044 = 14,3 \text{ t}$$

haben.

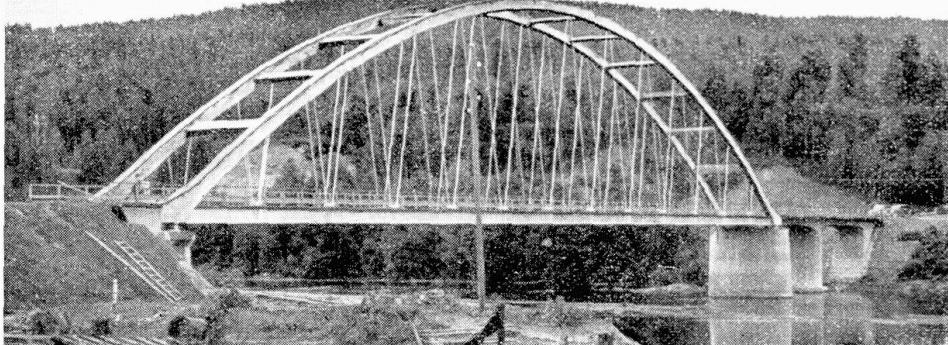


Fig. 6.

In Fig. 5 ist danach eine graphische Darstellung der Momente in der rechten Bogenhälfte für den in Fig. 1 gezeigten Belastungsfall 4 gezeigt, unter Voraussetzung eines steigenden Wertes von p . Man sieht also, daß die Momente proportional mit der Belastung sind bis zu einem Wert von $p = 2,75$ t/m, wo Stange 1' Nullspannung erhält. Danach steigt das Moment in Punkt 2' etwas stärker, ist aber doch immer sehr klein im Verhältnis zum Moment beim Bogen mit senkrechten Hängestangen, für welche die Momente in der Figur mit kräftigen Strichen angegeben sind.

Man sieht, daß die Momente im Bogen mit den schräg gestellten Hängestangen sich überall bedeutend unter den entsprechenden Momenten im Bogen mit den senkrechten Hängestangen halten.

Wie früher erwähnt, ist in dieser Darstellung zwecks Übersichtlichkeit ein Bogen mit relativ kleiner Spannweite und wenigen Hängestangen untersucht. Für einen Bogen mit größerer Spannweite wird die Momentreduktion noch deutlicher.

In Fig. 6 ist eine Photographie von einer der zuletzt ausgeführten Konstruktionen dieser Art, nämlich der Brücke über der Klarelv bei Höje in Schweden, gezeigt. Der Bogen besitzt eine Spannweite von 90 m und wurde von der Sv. A. B. Christiani & Nielsen in einer Bauzeit von $4\frac{1}{2}$ Monaten (1. Februar—15. Juni) ausgeführt. Zurzeit führt die erwähnte Firma eine

Brücke in Nordland (Schweden) mit einer Lichtweite von 120 m und derselben Konstruktion aus; selbst bei dieser Lichtweite kann die Konstruktion mit Bogen-dimensionen von 90×70 cm im Scheitel und 100×70 cm bei den Unterstützungen durchgeführt werden.

Zusammenfassung.

Wird in einer Bogenbrücke mit angehängter Fahrbahn die Anordnung der Hängestangen so getroffen, daß diese paarweise mit gleicher und entgegen-gesetzter Neigung vom gleichen Punkte der Fahrbahn ausgehen, so entsteht eine Brückenkonstruktion, die den bisherigen Ausführungen mit senkrechten Hängestangen wirtschaftlich bedeutend überlegen ist. An Hand eines einfachen Beispiels wird der Gang der statischen Untersuchung dargelegt.

Résumé.

L'auteur étudie un pont en arc avec tablier suspendu. Les barres de suspension sont disposées de telle sorte que deux à deux elles partent du même point du tablier avec une inclinaison égale mais opposée. On obtient ainsi une construction de pont qui est de beaucoup préférable aux exécutions réalisées jusqu'à ce jour avec barres de suspension verticales. Sur la base d'un exemple simple l'auteur expose la suite de l'étude statique de ce pont.

Summary.

If the hangers on bow-string arch bridges are arranged in pairs, leaving the decking at the same point and sloping upwards in opposite directions but at equal angles, the resulting type of construction proves more economical than a similar bridge with vertical hangers. The mode of calculation is explained for a simple example.