

Seitensteifigkeit offener massiver Bogenbrücken

Autor(en): **Ostenfeld, A.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **77/78 (1921)**

Heft 15

PDF erstellt am: **22.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-37243>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

INHALT: Seitensteifigkeit offener massiver Bogenbrücken. — Flugzeuge mit verspannungslosen Tragflächen. — Der Segelflug der Vögel und die Möglichkeit einer künstlichen Nachahmung. — Wettbewerb für den Ausbau des Länggass-Quartiers in Bern. — Miscellanea: Neue Schnellbahn-Pläne für New York. Eidgenössische Technische Hochschule. Elektrifizierung der Berliner Vorortbahnen. Die Gibraltar-Staumauer im Santa Inez River in Californien. Kommission für elektrische Anlagen. Eidgenös-

sische Kommission für Mass und Gewicht. Elektrifizierung der Gotthardlinie. — Konkurrenzen: Gemeinde-Asyl in Schwanden. Dorfplatz und Dorfbrunnen in Bettingen. Kirchgemeindehaus Zürich-Enge. Neubau der Schweizerischen Volksbank in Freiburg. — Nekrologie: K. E. Osthaus. — Literatur. — Vereinsnachrichten: Schweizer. Ingenieur- und Architekten-Verein. Société Genevoise des Ingénieurs et des Architectes. St. Gallischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Stellenvermittlung.

Band 77.

Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 15.

Seitensteifigkeit offener massiver Bogenbrücken.

Von Prof. A. Ostensfeld, Kopenhagen.

Während man gewöhnlich bei Untersuchung der Seitensteifigkeit offener Fachwerkbrücken vom Drehungswiderstand des Obergurtes absieht, wird dies für massive Bögen, und besonders für solche aus Eisenbeton, eine allzu grobe Annäherung sein. Indessen wird die Aufgabe durch exakte Berücksichtigung des Drehungswiderstandes ausserordentlich erschwert. Für gewöhnliche Fachwerkbrücken lässt sich das Knickproblem bekanntlich auf die Untersuchung der Determinante eines Systems von 5-gliedrigen Gleichungen zurückführen¹⁾; wenn jetzt in jedem Obergurtstab noch ein unbekanntes Drehungsmoment auftritt und die Zahl der Ueberzähligen daher mit diesen Momenten vergrössert wird, könnte man sich zwar die Rechnung auf die Weise durchgeführt denken, dass man die Drehungsmomente als einzige Ueberzählige auf ein statisch unbestimmtes Hauptsystem mit nur biegungsfestem Obergurt einwirken liesse; ein solches Verfahren würde aber offenbar zu allzu komplizierten Rechnungen und Endgleichungen führen. — Der einzige Weg, der hiernach übrig bleibt, scheint dann der folgende zu sein: indem wir uns hier auf eingespannte Bögen beschränken, betrachtet man den für eine willkürliche Belastung 6-fach statisch unbestimmten Bogen, denkt sich, er habe eine kleine Ausbiegung aus seiner Ebene angenommen und setzt eine gegebene Kurvenform dieser Biegelinie voraus, so dass alle Ausbiegungen y bekannt sind, wenn nur die Ausbiegung f_1 z. B. im Scheitel gegeben ist. Sodann berechnet man die von den Ausbiegungen y hervorgerufenen Aenderungen der Beanspruchungen der verschiedenen Bogenpunkte und schliesslich auch die hierdurch bewirkte Ausbiegung f_1 im Scheitel, die somit als eine Funktion von f_1 selbst hervorgeht, und man kommt auf diese Weise zu einer Gleichung $f_1 = F(f_1)$, woraus sich die Knickbedingung wie gewöhnlich herleiten lässt.

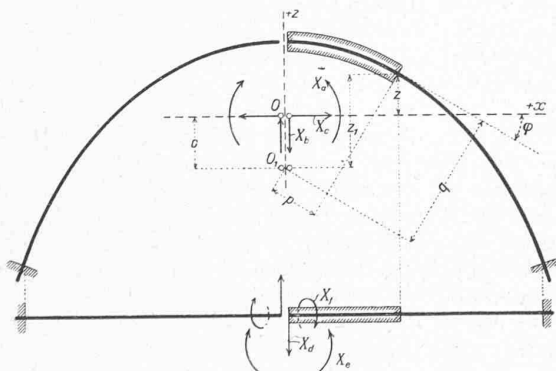


Abb. 1.

Das Verfahren ist also das nämliche, das früher von Engesser und Vianello für gerade Säulen angewandt wurde, und fordert daher eigentlich noch eine Verifikation der angenommenen Form der Ausbiegungslinie, durch Vergleich mit der berechneten. Für gerade Säulen ist doch bekanntlich eine solche Nachprüfung nicht besonders notwendig, indem die Form der Biegelinie nur sehr wenig durch kleine Aenderungen des Ausgangspunktes beeinflusst wird und im vorliegenden Falle, für einen eingespannten Bogen mit symmetrischer Deformation, worauf wir uns hier beschränken, scheint diese Nachprüfung noch weniger notwendig zu sein, da die Form der Biegelinie hier so ziemlich gegeben ist.

¹⁾ Siehe «Beton und Eisen» 1916, S. 123, 147.

Um zu fertigen Formeln zu gelangen, wird es notwendig werden, sowohl eine einfache Bogenform wie eine einfache Querschnittsänderung vorauszusetzen, um die Durchführung der Rechnungen möglich zu machen. Doch kann natürlich die skizzierte Berechnung immer durchgeführt werden, falls man sich mit Summationen statt Integrationen begnügen und in jedem Einzelfalle die Arbeit nach der Zahlenrechnung hinlegen will.

Als Einleitung soll zuerst kurz gezeigt werden die im folgenden benutzte

I. Behandlung des eingespannten Bogens mit räumlicher Belastung.

Indem die Querschnittshauptaxe 1 senkrecht zur Bogenebene, die Axe 2 in der Bogenebene selbst liegt, werden die sechs Schnittkräfte eines willkürlichen Querschnitts folgendermassen bezeichnet:

- in der Bogen-ebene M' ... Biegemoment um die Axe 1, + für Druck oben
- N ... Normalkraft, + für Zug
- T ... Querkraft in der Axe 2, + nach der konvexen Seite
- T'' ... Querkraft in der Axe 1, + nach vorn
- M'' ... Biegemoment um die Axen 2, + für Druck auswendig
- M_d ... Drehungsmoment, + wenn der Bogen sich als linksgängige Schraube windet

Die Vorzeichen für T' und T'' setzen voraus, dass diese Kräfte auf das Bogenstück links vom Schnitte angreifen.

Wie gesagt, beschränken wir uns auf einen symmetrischen Bogen und stellen das Hauptsystem dar durch Ueber-schneidung des Bogens im Scheitel (Abb. 1); die sechs Ueberzähligen X sollen dann die Schnittkräfte im Scheitel ersetzen. Die drei ersten dieser Ueberzähligen, das Moment X_a und die beiden Vertikal- und Horizontalkräfte X_b und X_c , sind die nämlichen wie für den ebenen Bogen und sollen im Punkte O (Abb. 1) angreifend gedacht werden; die drei übrigen, nämlich die Querkraft X_d senkrecht zur Bogenebene, das Biegemoment X_e um die Axe 2 de Scheitelquerschnitts und das Drehungsmoment X_f , lassen wir im Punkte O_1 (in der Symmetrieaxe) angreifen. Die positiven Richtungen der Grössen X sind durch Pfeile in Abb. 1 angegeben; ein positives X_f gibt ein positives M^d in den verschiedenen Bogenpunkten. Der Koordinatenanfang wird in O gelegt, x wird nach rechts, z nach oben positiv gezählt; O_1 wird im Abstände c nach unten von O angenommen. Die Bogen-tangente schliesst mit der x -Axe den Winkel φ ein und φ wird für die linke Bogenhälfte als positiv, für die rechte als negativ angesehen.

Mit einer willkürlichen Belastung ergibt sich für den Querschnitt (x, z) (vergl. Abb. 1):

$$\left. \begin{aligned} M' &= M'_0 - X_a - X_b x - X_c z, \\ M'' &= M''_0 + X_d p + X_e \cos \varphi - X_f \sin \varphi, \\ M^d &= M^d_0 - X_d q + X_e \sin \varphi + X_f \cos \varphi, \\ N &= N_0 + X_b \sin \varphi - X_c \cos \varphi, \\ T' &= T'_0 + X_b \cos \varphi + X_c \sin \varphi, \\ T'' &= T''_0 - X_d, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

und hieraus bildet man die folgende Zusammenstellung der von den Belastungen $X = -1$ hervorgerufenen Beanspruchungen:

Belastung	M'	M''	M^d	N
$X_a = -1$	+ 1	o	o	o
$X_b = -1$	+ x	o	o	- sin φ
$X_c = -1$	+ z	o	o	+ cos φ
$X_d = -1$	o	- p	+ q	o
$X_e = -1$	o	- cos φ	- sin φ	o
$X_f = -1$	o	+ sin φ	- cos φ	o

Hieraus ist sofort ersichtlich, dass sich die Ueberzähligen in zwei Gruppen, X_a, X_b, X_c und X_d, X_e, X_f , teilen, die von einander unabhängig bestimmt werden und weiter, dass sich auch die erstgenannten, X_a, X_b, X_c , aus je einer Gleichung berechnen, sobald der Punkt O als Schwerpunkt der elastischen Kräfte $\frac{ds}{J_1}$ gewählt wird. Für die drei letztgenannten Ueberzähligen erreicht man den gleichen Vorteil, falls nur:

$$\begin{aligned} & \int \frac{p \cos \varphi}{EI_2} ds - \int \frac{q \sin \varphi}{GI_p} ds = 0, \\ & - \int \frac{p \sin \varphi}{EI_2} ds - \int \frac{q \cos \varphi}{GI_p} ds = 0, \\ & - \int \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{EI_2} ds + \int \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{GI_p} ds = 0, \end{aligned}$$

von welchen Bedingungen die letzte aus Symmetriegründen sofort erfüllt ist. Mit $c + z = z_1$ (Abb. 1) ist:

$$\left. \begin{aligned} p &= x \cos \varphi + z_1 \sin \varphi, \\ q &= -x \sin \varphi + z_1 \cos \varphi \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

womit die beiden ersten der genannten Bedingungen übergehen in:

$$\begin{aligned} & \int \frac{x \cos^2 \varphi + z_1 \sin \varphi \cos \varphi}{EI_2} ds - \int \frac{-x \sin^2 \varphi + z_1 \sin \varphi \cos \varphi}{GI_p} ds = 0, \\ & - \int \frac{x \sin \varphi \cos \varphi + z_1 \sin^2 \varphi}{EI_2} ds - \int \frac{-x \sin \varphi \cos \varphi + z_1 \cos^2 \varphi}{GI_p} ds = 0, \end{aligned}$$

Hier ist wieder die erste aus Symmetriegründen erfüllt und mittels der letzten bestimmt sich die Lage des Punktes O_1 (Abb. 1). Mit $z_1 = c + z$ und

$$\frac{EI_2}{GI_p} = k, \dots \dots \dots (3)$$

wird erhalten:

$$\begin{aligned} c \int (\sin^2 \varphi + k \cos^2 \varphi) \frac{ds}{I_2} &= - \int (\sin^2 \varphi + k \cos^2 \varphi) \frac{z}{I_2} ds \\ &- \int x \sin \varphi \cos \varphi (1 - k) \frac{ds}{I_2}, \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

woraus sich der Abstand c berechnen lässt. Ein positives c bedeutet, dass O_1 unter O zu liegen kommt. Für $k = 1$, ein Fall, der natürlich durchaus nicht allgemein zutrifft, der uns aber weiter unten speziell interessieren wird, geht aus (4) hervor, dass O_1 im Schwerpunkte der elastischen Kräfte $\frac{ds}{J_2}$ fällt. Für rechteckigen Querschnitt ist

$$J_2 = \frac{1}{12} h b^3 \quad \text{und} \quad J_p = \frac{12}{m} \frac{b^3 h^3}{b^2 + h^2}$$

wo m zwischen 38,5 und 42,7 (letzteres für $b = h$) liegt. Wird weiter für Beton $G:E = 0,45 \dots 0,375$ angenommen, so ergibt sich:

$$k = \frac{m}{65} \left(1 + \frac{b^2}{h^2} \right) \dots \dots \frac{m}{54} \left(1 + \frac{b^2}{h^2} \right)$$

oder für $b:h =$

$\frac{1}{2}$,	$\frac{3}{4}$,	1,	2,	5
$k = 0,81$	$1,00$	$1,32$	$3,23$	$15,8$,
bis $k = 0,98$	$1,20$	$1,59$	$3,89$	$19,0$.

Nach Festlegung der Punkte O und O_1 bestimmen sich die sechs Ueberzähligen aus je einer Gleichung und die drei letzten dieser Gleichungen lauten:

$$\left. \begin{aligned} X_d \int (\rho^2 + k q^2) \frac{ds}{I_2} &= \int (-M_0'' p + k M_0^d q) \frac{ds}{I_2}, \\ X_e \int (\cos^2 \varphi + k \sin^2 \varphi) \frac{ds}{I_2} &= - \int (M_0'' \cos \varphi + k M_0^d \sin \varphi) \frac{ds}{I_2} \\ X_f \int (\sin^2 \varphi + k \cos^2 \varphi) \frac{ds}{I_2} &= \int (M_0'' \sin \varphi - k M_0^d \cos \varphi) \frac{ds}{I_2} \end{aligned} \right\} (5)$$

in welchen Gleichungen die Werte p und q durch die Gleichungen (2) gegeben sind.

II. Ausknickung des eingespannten Bogens im einfachsten Falle.

Die äussere Belastung sei lotrecht. Für den ebenen Bogen hat man dann nur mit den Momenten M_0' zu tun, während $M_0'' = 0$ und $M_0^d = 0$. Nimmt der Bogen dagegen die Ausbiegungen y , senkrecht zu seiner Ebene, an, wird die Belastung die ursprünglichen Momente M_0' ein wenig ändern und die Momente M_0'' und M_0^d werden von Null verschieden. Die Grösse der genannten Aenderungen hängt von der Wirkungsweise der Belastung ab; bleibt z. B. die Belastung immer lotrecht und greift sie in Punkten der Bogenaxe an (was übrigens in der Wirklichkeit kaum möglich sein wird), so bekommt man einen Wert der Aenderungen; wird die Belastung durch schlaife Hängestäbe übergeführt, die sich ein wenig schräg stellen, wenn sich der Bogen ausbiegt, so ergibt sich ein anderer Wert; noch mehr abweichend werden die Verhältnisse, wenn steife Hängestäbe zusammen mit den Querträgern steife Halbrahmen bilden. Wir nehmen indessen vorläufig an, die erwähnten Aenderungen der M_0 -Werte seien so geringfügig, dass man sie ganz vernachlässigen kann, und strenge gilt daher die erste folgende Untersuchung nur für einen unbelasteten Bogen, der z. B. allein von einer Temperaturänderung beansprucht wird. Wir kommen auf die Berücksichtigung der Schrägstellung der Hängestäbe und eventueller Halbrahmen zurück.

Wenn der Bogen die Ausbiegungen y annimmt, stellen sich infolge hiervon auch einige kleine Winkeländerungen α um die Axe 2 und kleine Verdrehungen ϑ ein, indem die Bogenaxe in eine Raumkurve übergeht; auch diese Deformationen werden natürlich die erwähnten Aenderungen der Schnittkräfte beeinflussen. Indessen hängen die Ausbiegungen y in ähnlicher Weise von α und ϑ ab, wie die Durchbiegung eines geraden Balkens von den Tangentenwinkeln, und ebenso wie man gewöhnlich in der Differentialgleichung der elastischen Linie eines geraden Balkens die $dy:dy$ im Verhältnis zu 1 vernachlässigt, wird es daher berechtigt sein, im folgenden die Grössen α und ϑ als verschwindend zu betrachten.

Die erste Aufgabe ist nun, die Ueberzähligen X mit Berücksichtigung der Ausbiegungen y senkrecht zur Bogenebene (siehe Abbildung 2, unten, y positiv nach vorne) zu berechnen. Bei Aufstellung des Ausdruckes für die Momente im Schnitte (x, z, y) erinnert man sich jetzt, dass α und ϑ vernachlässigt werden sollen; die Tangente der Ausbiegungslinie (Axe des Drehungsmomentes) soll also als parallel zur ursprünglichen Bogenebene, und die Querschnittsachsen 1 und 2 sollen als wagerecht bzw. parallel zur Bogenebene angesehen werden. X_a ruft dann nur um die Axe 1 ein Moment hervor, aber weder um die Axe 2, noch um die Bogentangente; die senkrechte Kraft X_b gibt die Momente: $-X_b x$ um die Axe 1, $+X_b \sin \varphi \cdot y$ (im Punkte y in Abbildung 2 ist φ negativ) um die Axe 2 und $-X_b \cos \varphi \cdot y$ um die Bogentangente usw.; X_d, X_e und X_f rufen die nämlichen Momente hervor wie in (1) angegeben, da eine Parallelverschiebung aller dreier Momentenachsen um die Strecke y senkrecht zur Bogenebene keinen Einfluss auf die Wirkung dieser Kräfte üben kann. Im ganzen ergibt sich:

$$\left. \begin{aligned} M' &= M_0' - X_a - X_b x - X_c z, \\ M'' &= X_b y \sin \varphi - X_c y \cos \varphi + X_d p + X_e \cos \varphi - X_f \sin \varphi, \\ M_d &= -X_b y \cos \varphi - X_c y \sin \varphi - X_d q + X_e \sin \varphi + X_f \cos \varphi, \end{aligned} \right\} (6)$$

und die von den Belastungen $X = -1$ herrührenden Momente werden somit:

Belastung	M'	M''	M^d
$X_a = -1 \dots \dots \dots$	$+1$	0	0
$X_b = -1 \dots \dots \dots$	$+x$	$-y \sin \varphi$	$+y \cos \varphi$
$X_c = -1 \dots \dots \dots$	$+z$	$+y \cos \varphi$	$+y \sin \varphi$
$X_d = -1 \dots \dots \dots$	0	$-p$	$+q$
$X_e = -1 \dots \dots \dots$	0	$-\cos \varphi$	$-\sin \varphi$
$X_f = -1 \dots \dots \dots$	0	$+\sin \varphi$	$-\cos \varphi$

(7)

