

Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht

Band: 2 (1936)

Artikel: Halb-experimentelle Berechnungsmethode eines grundlegenden
Bauwerktypus

Autor: Pascal, R.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-2839>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 06.10.2024

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

V2

Halb=experimentelle Berechnungsmethode eines grundlegenden Bauwerktypus.

Méthode de calcul semi=expérimentale d'un ouvrage classique.

Semi-Experimental Method of Designing a Typical Structure.

R. Pascal,
Ingénieur conseil, Paris.

Es soll eine halb-experimentelle Berechnungsmethode erläutert werden, die wir bei der Projektierung zweier Stahlbrücken verwandten, von denen die eine 67 und die andere 82 m Spannweite hat. Beide Bauwerke führen über die Seine, zwischen Neuilly und Courbevoie; sie sind 35 m breit und werden voneinander durch zwei massive Widerlager getrennt, die durch ein Eisenbetongewölbe von 32 m Spannweite verbunden werden. Das gesamte Bauwerk wird zur Zeit an der Stelle der berühmten, durch Perronet unter Ludwig XV. erbauten Brücke erstellt.

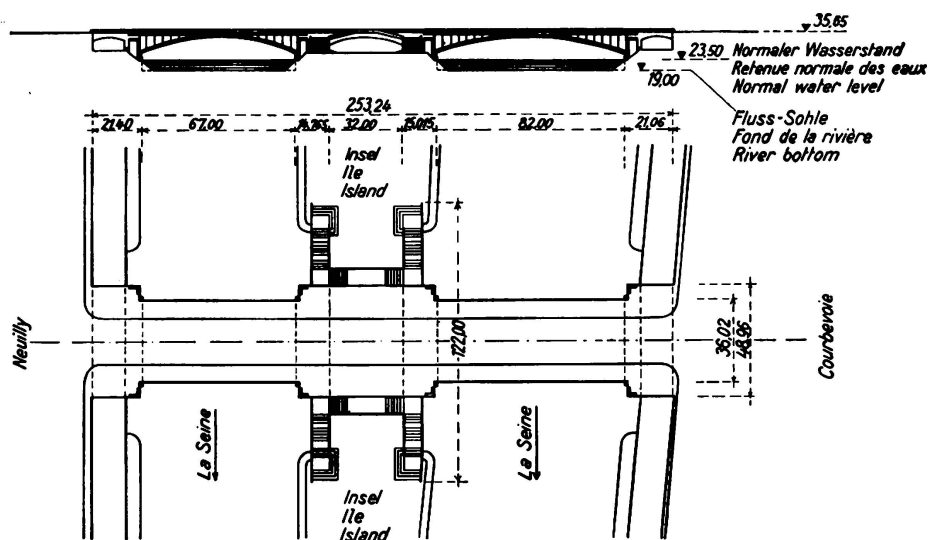


Fig. 1.

Fig. 1 gibt die Gesamtanordnung des Bauwerkes in schematischer Darstellung wieder. Die beiden Stahlbauwerke sind gleichen Typs.

Jeder der 12 Bögen ist an beiden Enden gelenkig gelagert und ist von den Kämpfern bis zum Viertelpunkt von Brückenmitte an gerechnet, starr mit einem Rahmen verbunden, der aus Längsträgern und Vertikalstäben besteht; das Trägheitsmoment der Längsträger und Vertikalstäbe ist bedeutend kleiner als das des Bogens.

In Querrichtung werden die so gebildeten Hauptträger unten durch Querversteifungen und oben durch Querträger verbunden; beide Versteifungen bilden einen Arkadenträger, dessen Vertikalstäbe zugleich die Vertikalen der Hauptträger bilden.

Im mittleren Teil, d. h. in der Nähe des Bogenscheitels sind nur die Querversteifungen vorhanden.

Die Querschnitte der Bögen, der Vertikalstäbe und der Querversteifungen sind rechteckig und hohl ausgebildet und in geeigneter Weise versteift. Die Querschnitte der Quer- und der Längsträger weisen Doppel-T-Form auf.

Das Ganze wurde in Stahl St. 54 projektiert. Die Verbindungen sind sämtlich geschweißt.

Die Lager sind aus Stahlguß, die Fahrbahn besteht aus Eisenbetonplatten.

Mauerwerk und Fundamente dieses Bauwerks werden durch die Firma Léon Ballot, die Eisenkonstruktionen durch die Firma Baudet, Donon & Roussel ausgeführt.

Die im Auftrage des Département der Seine vergebenen Arbeiten unterstehen der obersten Leitung von Herrn *Levaillant*, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, und der unmittelbaren Leitung von Herrn *Louis-Alexandre Lévy*, Ingénieur des Ponts et Chaussées, dem Herr *Kienert*, Ingénieur T.P.E., zur Seite steht.

Angewandte Berechnungsmethode.

Jedes Bauwerk stellt in seiner Gesamtheit ein einheitlich wirkendes Tragwerk dar, weil die Hauptträger und die Querverbände untereinander entsprechend verbunden sind. Wir wollen zunächst den Gang der Berechnung der Hauptträger und dann die für die Bestimmung der Querverbände gewählte Methode erläutern.

1. Berechnung der Hauptträger.

Wegen Forderungen des Schiffsverkehrs, die eine geringe Bauhöhe in Brückenmitte bedingen, gehören die betrachteten Brücken einem sehr verbreiteten Typ an, dessen künstlerischer Eindruck dem Auge vertraut ist. Von unserem Standpunkt aus ist zu beachten, daß der Bogen in seinem mittleren Teil von Brückenmitte bis zum ersten Rahmen ein zunehmendes Trägheitsmoment aufweist. Dieser Rahmen läßt sich also durch seinen Riegel in die Zwickelausfüllung des Bogens eingespannt betrachten.

Zahlreiche ähnliche Bauwerke wurden in der Annahme projektiert, daß die Portale vollständig gelenkig gelagert und lediglich an einem Ende gehalten seien.

Die Verwaltung der Ponts et Chaussées hatte die Konstrukteure ausdrücklich gebeten, jeden Hauptträger als ein aus einem Stück bestehendes Ganze zu betrachten; außerdem sollten eigens Vorkehrungen getroffen werden, daß die Decke in der Festigkeitsberechnung unberücksichtigt bleiben könnte.

Nach einem vergeblichen Versuch verzichteten wir wegen der außerordentlich verwickelten Ansätze auf die vollständige Durchrechnung der Kontinuität, die trotz der Einfachheit der angewandten Methode zu undurchführbaren Rechenarbeiten führte.

An Anlehnung an die Arbeiten von *Rieckhof* und in der Absicht, den unter der Bezeichnung Nu.Pu.Best bekannten Apparat zu verwenden, baten wir die

Erbauer, ein Metallmodell im Maßstabe von $1/25$ anzufertigen, dessen Einzelteile Trägheitsmomente aufweisen sollten, die den im Vorprojekt vorgesehenen Trägheitsmomenten verhältnisgleich wären. Mittels des Krümmungsapparates von *Rieckhoff* konnten wir an den Teilen geringeren Trägheitsmomentes die wirklichen oder virtuellen Momentennullpunkte bestimmen. Bei den Bögen haben wir den Apparat aus ersichtlichen Gründen nicht gebraucht.¹

Indem wir eine beliebige Belastung in jedem Knotenpunkt des Hauptträgers einwirken ließen, konnten wir die Einflußlinie der Querkraft des ersten Vertikalstabes an der linken Seite ermitteln. Die Berechnung der äußeren Rahmen genügte dann, um eine doppelte statische Unbestimmtheit zu beseitigen.

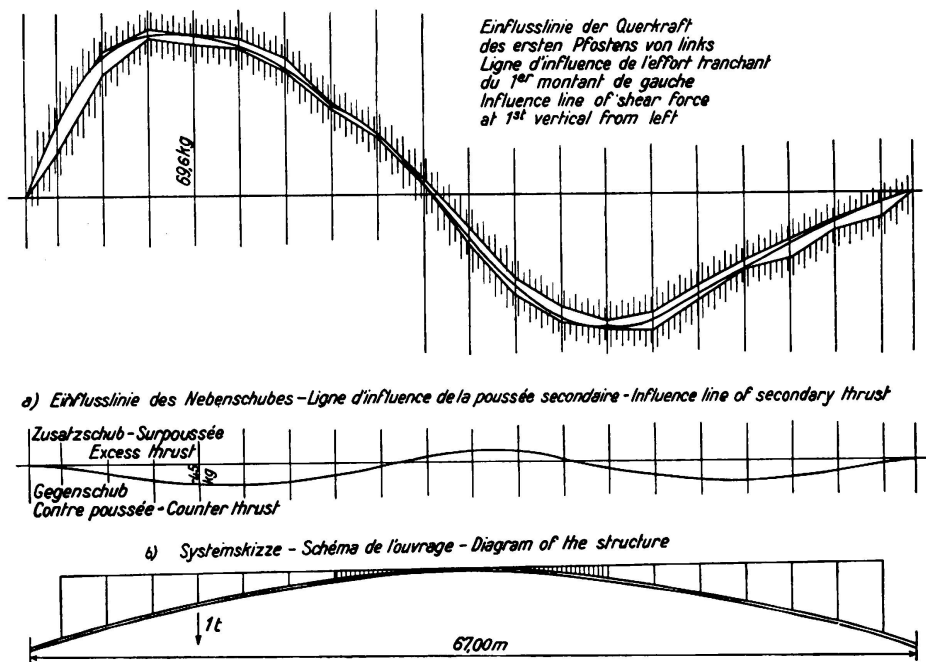


Fig. 2.

Fig. 2 zeigt den Verlauf der Einflußlinie, die wir auf diese Weise erhielten. Fig. 2a gibt die Einflußlinie der Nebenschübe wieder.

Wir hatten zuvor den einzelnen Bogen, durch Ermittlung der Einflußlinie des Schubes untersucht, und zwar:

1. unter der Wirkung einer senkrechten Einheitslast,
2. unter der Wirkung einer waagerechten Einheitslast,
3. unter der Wirkung eines Einheitsmomentes.

Die Berechnungen waren unter Berücksichtigung der Veränderlichkeit des Trägheitsmomentes im mittleren Teil durchgeführt worden.

Aus der vorerwähnten Einflußlinie, die in Fig. 2 dargestellt ist, konnten wir die Einflußzahlen für alle Kräfte in sämtlichen Querschnitten des Bauwerkes, in denen Schweißungen vorhanden waren, bestimmen. Zu gleicher Zeit wurde die Wirkung der Temperaturschwankungen untersucht.

Die Ingenieure der Firma Baudet, Donon & Roussel machten uns auf den

¹ Diese Methode kann in gerechtfertigter Weise nur dann angewendet werden, wenn dafür Sorge getragen wird, daß keine Knickerscheinungen auftreten können, was leicht zu erreichen ist.

wichtigen Vorteil aufmerksam, der dadurch entstand, daß die Verbindungen des Modells, die ursprünglich aus zylindrischen Teilen bestanden, durch Teile ersetzt wurden, die einerseits die Höhe der Bögen und andererseits die der Längsträger hätten. Ein Vergleich des Modelles mit der Zeichnung des Bauwerkes genügt, um den Nutzen dieses Hinweises zu ermessen.

Wie wichtig er ist, konnten wir aus der Prüfung eines Abschnittes des Modelles unter polarisiertem Licht schließen.

Diese Prüfung lieferte zugleich eine interessante Bestätigung der angewandten Methode.

Die Berechnung der Formänderungen bewies, daß die Durchbiegungen in senkrechter und waagerechter Richtung des als aus einem Stück bestehend auf-

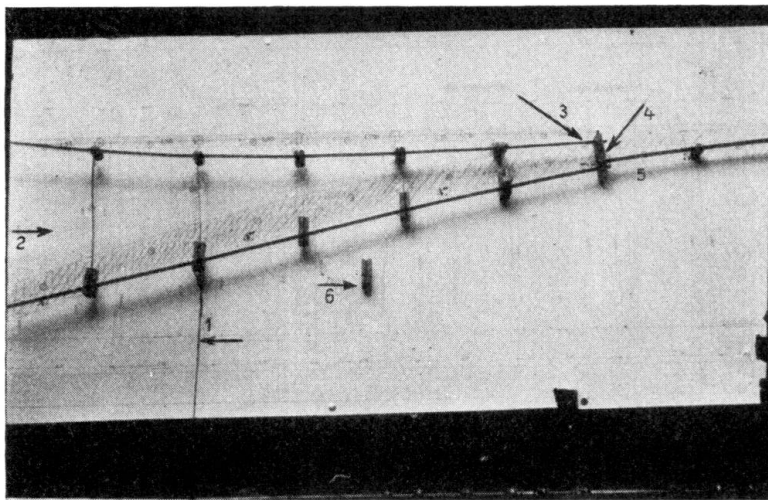


Fig. 3.

- 1 = Eine senkrechte Last.
- 2 = Querkraft x des äußersten linken Pfostens.
- 3 = Vollkommene Einspannung des letzten Längsträgers auf der Scheitelseite.
- 4 = Unveränderlicher Winkel.
- 5 = Streifen von veränderlicher Höhe, (Veränderlichkeit des Trägheitsmomentes).
- 6 = Einzelstück.

gefaßten Hauptträgers geringer waren als die eines Bauwerkes mit gelenkig gelagerten Rahmen.

Fig. 3 zeigt ein Lichtbild eines der verwendeten Modelle. Durch besondere Vorkehrungen ist es uns gelungen, die durch das Gewicht des waagrecht angeordneten Apparates hervorgerufenen Reibungskräfte auszuschalten; wir konnten übrigens nachweisen, daß die Erhöhung des Trägheitsmomentes, die aus der Dicke der Verbindungen herrührt, für die Werte der erzielten Ergebnisse praktisch keinerlei Bedeutung hatte.

Die Kurve 2, der die Kurve 2a beigegeben ist, die die Einflußlinie der Sekundärschübe darstellt, wurde abgeleitet aus dem Vergleich der Ergebnisse der Berechnung des ersten Rahmens links von Brückenmitte mit denen der Berechnung des ersten Rahmens rechts von Brückenmitte; diese beiden Berechnungen dienten gegenseitig als Kontrolle. So war es möglich, eine genügend genaue Übergangszone der Kurve zu bestimmen. Kurve 2a wurde zugleich mit Kurve 2 aufgetragen.

2. Berechnung der Querverbände und des Systemes.

Wenn man die Gleichheit der Formänderungen für jeden Knotenpunkt ausdrückt, der durch die Überschneidung der Hauptträger und der Querverbände entsteht, so erhält man ein System von 228 Gleichungen mit 228 Unbekannten, das zwar nicht unerheblich vereinfacht werden kann, aber dennoch völlig unbrauchbar bleibt. Wenn wir dieses Gleichungssystem lösen könnten, würde es uns für jeden Belastungsfall die Kräfteverteilung in den Hauptträgern und in den Querverbänden geben.

Was wir von der Berechnung nicht erwarten konnten, haben wir dem Experiment zugemutet. Die Firma Baudet, Donon & Roussel ließ auf unsere Bitte ein Modell im Maßstab $1/25$ des zu untersuchenden Tragsystems an-

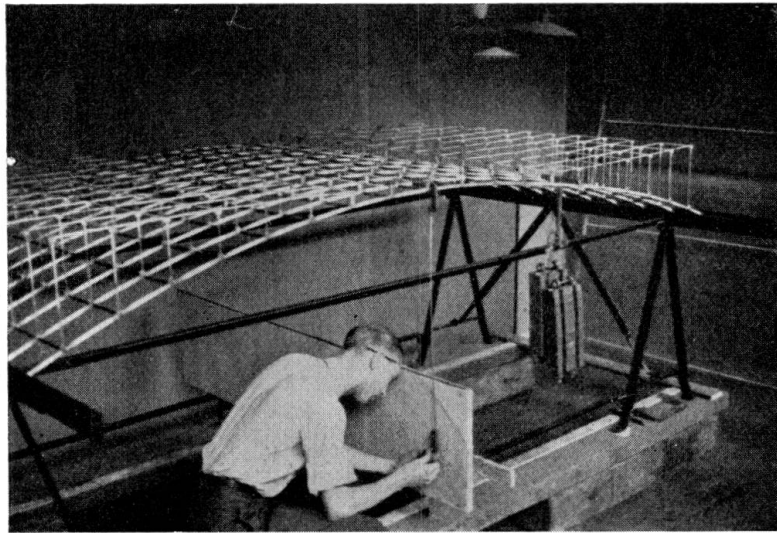


Fig. 4.

Räumliches Modell. Messung der lotrechten Verschiebungen.

fertigen, bei dem das Verhältnis der achsialen und polaren Trägheitsmomente soweit dies bei der Modell-Verkleinerung irgend möglich war, aufrechterhalten wurde (siehe Fig. 4). Daneben konnten wir auch über ein Modell verfügen, das aus zwei den anderen gleichen Bögen bestand, die mittels Quersteifen und Querträgern in gleicher Weise wie beim Hauptmodell verbunden waren. Diese beiden Bezugsbögen sind aus Fig. 5 ersichtlich.

Wir haben an eine größere Zahl Knotenpunkte eine Belastung von 20 kg angebracht und die senkrechten Verschiebungen der einzelnen Knotenpunkte aufgenommen; dabei wurde festgestellt, daß die waagerechten Verschiebungen viel kleiner waren.

Nach Ermittlung des elastischen Verhaltens der einzelnen Querverbände haben wir in folgender Weise ein *Verbundsystem* verwirklicht:

Jeder einfache oder zusammengesetzte Querverband wurde durch ein kleines Modell, ähnlich demjenigen ersetzt, das wir für die Hauptträger benutzten und an dem wir die Krümmungen und die Momentennullpunkte bestimmten.

Wir erhielten nicht so genaue Ergebnisse wie bei den Hauptträgern. Jedoch konnten wir mit beinahe genügender Annäherung die in den Längsträgern, sowie in den Vertikalstäben und in den Quersteifen der Querverbände hervorgerufenen

Kräfte errechnen. Für jeden erforschten Querschnitt wurde eine Einflußtabelle aufgestellt. Durch Vergleichen dieser Tabellen konnten wir überzeugend feststellen, daß die schachbrettartige Überlast, wie sie Fig. 6 wiedergibt, bei weitem die ungünstigste war, und dies bei allen Querschnitten, die wir untersuchten.

Nebenbei sei gesagt, daß die Querverbände durch die tote Last nicht beansprucht werden, weil das Gewicht der Bürgersteige beinahe dem der Fahrbahnen gleich kommt. Sie werden auch nicht durch Lasten beansprucht, die die ganze Breite des Bauwerkes einnehmen.

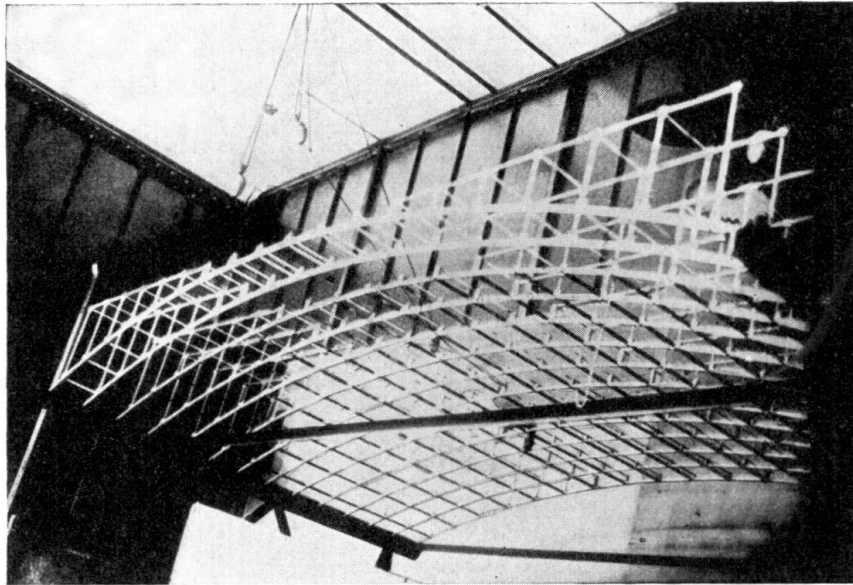


Fig. 5.

Am Rande sieht man die beiden gekoppelten Bezugsträger. Unten das Zeichenbrett.

Die vollständige Erforschung des ganzen Systems würde auch die Erforschung des Verhaltens der Hauptträger des Bauwerkes unter der schachbrettartigen Belastung mit Benutzung des vorerwähnten Verbundsystems² erfordern, aber es würde sich dabei lediglich um eine Nachprüfung handeln. Bei Betrachtung der Fig. 6, die die durch die gleiche Belastung hervorgerufenen elastischen Linien des Probeträgers und der einzelnen Träger Nr. 4, 5 und 6 zeigt, stellt man sehr große Unterschiede in den senkrechten Verschiebungen fest, die 60 bis 70 % erreichen können, woraus sich ergibt, daß die entsprechenden Beanspruchungen in den Trägern erheblich durch das Vorhandensein der Querverbände herabgesetzt werden.

Dieses Ergebnis konnte übrigens erwartet werden, wenn man bedenkt, wie sich eine Eisenbetonplatte verhält, die an zwei Seiten aufliegt und mit Verteilungseisen versehen ist.

Zusammenfassend ergibt sich aus diesem Beispiel, daß es gelingt, ein Bauwerk zu erforschen, indem man von dem Experiment das verlangt, was die Berechnung nur auf Kosten von unverhältnismäßigen Anstrengungen ergeben

² Wir sprechen von unvollständigem Verbund, wenn die Verbindungen lediglich an den durch das dreidimensionale Modell angezeigten Stellen gelegen sind und von vollständigem Verbund, wenn die Verbindungen außerdem im selben Sinne gerichtet sind. Innerhalb der Grenzen unserer Versuche konnten wir uns davon überzeugen, daß die Differenz zwischen beiden Anordnungen nicht vernachlässigbar gering, aber allgemein nicht beträchtlich war.

würde. Wesentlich ist es, jeden Empirismus und die mit ihm verbundene Unsicherheit auszuschalten. Es ist selbstverständlich, daß die Berechnung Schritt für Schritt der Experimentalforschung folgen muß. Diese Methode der Verwendung von ebenen und räumlichen Modellen kann bei der Erforschung vieler zwei- oder dreidimensionaler Bauwerke befolgt werden, die Dreiecks-Fachwerke

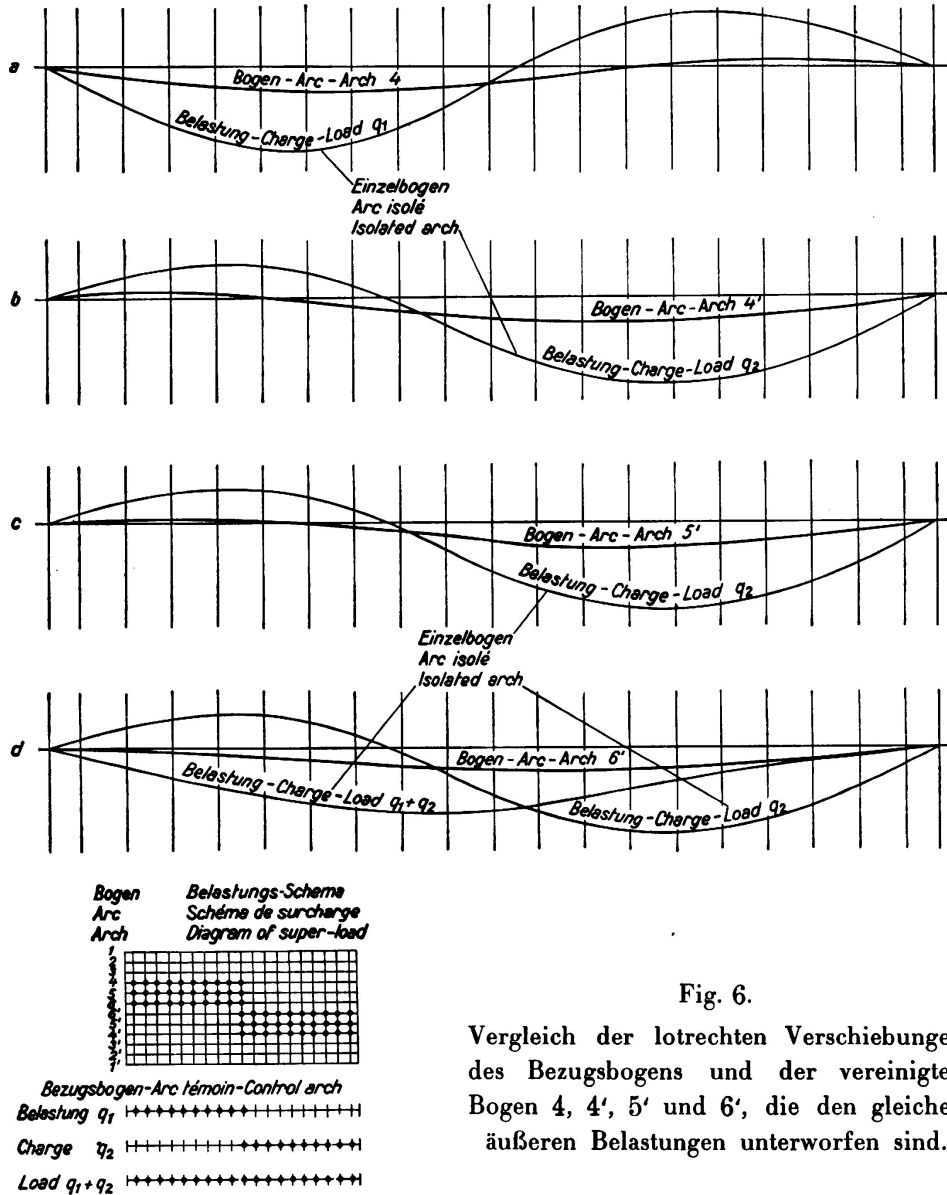


Fig. 6.

Vergleich der lotrechten Verschiebungen des Bezugsbogens und der vereinigten Bogen 4, 4', 5' und 6', die den gleichen äußeren Belastungen unterworfen sind.

oder eine beliebige Verbindung von Portalen enthalten. Sie setzt uns u. A. in den Stand, mit Leichtigkeit das Studium der Nebenspannungen in Dreiecks-Fachwerkbauten durchzuführen.³

Die Nachprüfungen unter polarisiertem Licht ließen uns eine befriedigende Übereinstimmung sogar bei ziemlich kurzen Teilen und eine genaue Übereinstimmung bei längeren Teilen feststellen.

³ Soeben haben wir eine eingehende Untersuchung einer großen Brücke über den Niger durchgeführt. Es hat sich gezeigt, daß einzig die experimentelle Methode befriedigende Ergebnisse bezüglich der Spannungen in den überzähligen Stäben und der Nebenspannungen liefern kann.