

# Neuere Gesichtspunkte für den Bau grosser Eisenbeton-Bauwerke

Autor(en): **Boussiron, S.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **2 (1936)**

PDF erstellt am: **06.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-2718>

## **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.

## IVb 1

### Neuere Gesichtspunkte für den Bau großer Eisenbeton-Bauwerke.

### Tendances actuelles dans les grands ouvrages en béton armé.

### Present-day Tendencies in Large-sized Reinforced Concrete Constructions.

S. Boussiron,  
Paris.

Das Streben nach Schöpfung großer Bauwerke in Eisenbeton ist durch die Fortschritte in der Herstellung des Zementes und durch die Forschungen über seine beste Verwendung in Verbindung mit den gegebenen Zuschlagstoffen unterstützt, wenn nicht gar herausgefordert worden.

Die Bruchfestigkeiten von 400 bis 450 kg/cm<sup>2</sup>, die man auf einer Baustelle schon ohne Anwendung einer außergewöhnlichen Sorgfalt, (deren Gleichmäßigkeit auch nicht verbürgt ist), erreichen kann, erlauben die Annahme einer Arbeitsspannung von rd. 100 kg/cm<sup>2</sup> für bewehrten Beton und von 150 kg/cm<sup>2</sup> für den gleichen Beton mit 1,10 % Umschnürung. Diese Arbeitsspannung kann sogar bis zum 0,6-fachen der Bruchfestigkeit, d. h. 240 kg/cm<sup>2</sup>, gesteigert werden, wenn man mit 3,6 % umschnürt.

Aber mehr denn je muß man hier sagen, daß die Lösung einer schwierigen Frage nicht die Erweiterung einer durchschnittlichen ist. Die Annahme von solchen Spannungen löst die Wirkung verschiedener Erscheinungen aus, deren Durchforschung vertieft werden muß.

Bei großen Spannweiten erfordert der Einfluß der ständigen Last eine Verringerung aller Querschnitte auf ihre richtige Grenze. Aber diese Maßnahme muß von einer ernsthaften Prüfung des Festigkeitsgrades dieser Querschnitte in Hinblick auf ein Anwachsen der Last oder einer Verlagerung der Mittellinie begleitet sein. Man braucht also Berechnungsarten, die sicher alle Spannungen klarlegen und schnell sind, damit der Entwerfende die Schwierigkeiten der geplanten Anordnungen nicht zu spät bemerkt.

Endlich kann die Durchbildung großer Bauwerke nur in Verbindung mit praktischen und sicheren Lösungen für die Lehrgerüste, in denen der wichtigste Teil der Kosten liegt, in Betracht gezogen werden.

Wir zeigen hier folgend die Bestrebungen, welche man aus dem herauschälen kann, was auf diesem Gebiete im Laufe der letzten Jahre in Frankreich gemacht worden ist.

## ERSTER TEIL.

*Anordnungen und Berechnungen:*

Wir beschränken unsere Darlegungen auf Bogenbrücken. Die Bogen bilden in der Tat die einzige Lösung, der der Eisenbeton wirtschaftlich fähig ist, sobald es sich um Spannweiten mit mehr als 100 m handelt. Jede andere Lösung würde nur eine Anpassung an Stahlkonstruktionen oder an Hängebrücken sein und würde den Ingenieur bezüglich der Zugkräfte und Zugstöße vor Aufgaben stellen, die zwar wohl lösbar, aber doch weit davon entfernt sind, eine vernünftige Anwendung des Eisenbetons zu ergeben.

Die Erforschung dieser Bogentragwerke kennzeichnet gegenwärtig ein klares Streben nach einer wissenschaftlichen Bestimmung ihrer kennzeichnenden Größen: Form, Pfeilverhältnis und Spannung.

Die im allgemeinen gewählte Form der Bogenbrücken wurde von den Mauerwerksbrücken übernommen, wie sie sich seit dem Ursprung dieser Bauwerke fortgepflanzt hat. Es sind keine systematischen Untersuchungen angestellt worden, um den Einfluß der Form und der anderen kennzeichnenden Größen des Bogens auf die in den Querschnitten erzeugten Kräfte, noch auf deren Rückwirkung auf die Abmessungen der Querschnitte selbst zu bestimmen. Die erste Untersuchung in diesem Sinne wurde gelegentlich des Baues der Pont de Fin d'Oise gemacht;<sup>1</sup> später wurde diese Untersuchung durch verschiedene Forschungen<sup>2</sup> vervollständigt, die genau die wissenschaftlichen Bedingungen für den Entwurf dieser Bauwerke festlegen.

Da die volle Anwendung dieser Forschungen nur bei Gelegenheit der letzten verwirklichten großen Bogenbrücke gemacht wurde (Brücke bei Roche-Guyon über die Seine), halten wir es zur Darlegung der Methode zur rationellen Bestimmung eines Bogens für das Beste, jene Untersuchungen zu beschreiben, welche zur Festlegung der kennzeichnenden Größen dieses Bauwerkes angestellt wurden; diese sind:

1. Erforschung des Einflusses der Form des Bogens (Veränderlichkeit der Trägheitsmomente der Querschnitte):
2. Wahl des Pfeilverhältnisses,
3. Wahl der Form der Querschnitte,
4. Wahl der Betonspannungen.

Wir zeigen im folgenden, daß man hieraus die Grenzspannweite der Bogenbrücken ableiten kann und vergleichen den gewählten Bogentyp mit anderen.

Schließlich geben wir auszugsweise den genauen Rechnungsgang, der uns zur Bestimmung der Kräfte in der durchgearbeiteten Bogenbrücke gedient hat.

In einem 2. Kapitel stellen wir andererseits einige Betrachtungen über Dreigelenkbogen mit gewöhnlichen und Sondergelenken an.

<sup>1</sup> Siehe Génie Civil vom 1. Februar 1930.

<sup>2</sup> a) Valette: Génie Civil vom 9. Mai 1931 und 2. Bd. der Abhandlungen der Internationalen Vereinigung für Brückenbau und Hochbau. — b) Chalot: im gleichen Werk.

## I. KAPITEL.

## Statisch unbestimmte Systeme.

## 1. Veränderlichkeit der Trägheitsmomente.

Wir untersuchen die Grenzwertkurve der Momente, für einen Bogen mit gleichbleibendem reduzierten Trägheitsmoment und Querschnitt (Kurven I, Fig. 1), deren elastischen Schwerpunkt der Mittellinie in  $\frac{1}{3}$  der Pfeilhöhe hat (Fig. 2 a).

Wenn man nun unter Beibehaltung des gleichen Trägheitsmomentes im Scheitel durch geeignete Veränderungen der Trägheitsmomente das Größtmoment in den Viertelpunkten vergrößert, verringert sich dasjenige an den Kämpfern selbst-

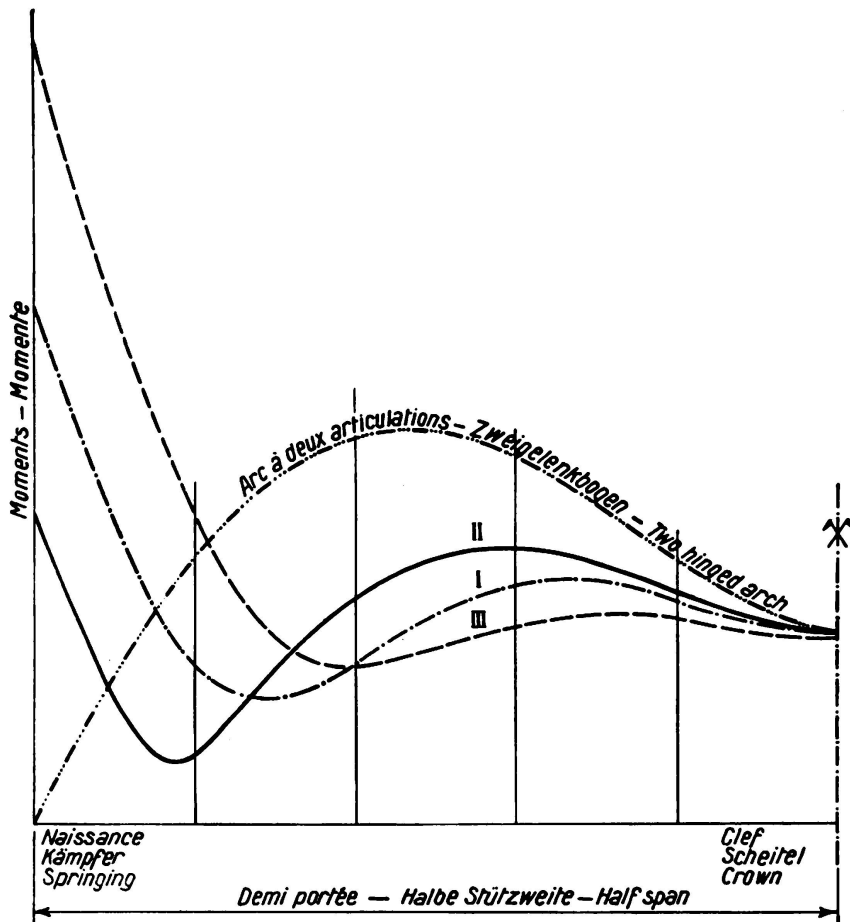


Fig. 1.

Hüllkurven der Momente für die Bogentypen I, II, III, gleicher Spannweite, gleichem Pfeilverhältnis und gleichem Trägheitsmoment im Scheitel sowie für den Zweigelenkbogen mit reduziertem konstantem Querschnitt gleicher Trägheit im Scheitel wie die andern Typen.

tätig. Die Grenzwertkurven der Momente haben den mit II in Fig. 1 bezeichneten Verlauf. Sie entsprechen Gewölben, deren reduziertes Trägheitsmoment vom Scheitel gegen die Kämpfer zu dauernd kleiner wird, bei welchen der elastische Schwerpunkt der Mittellinie innerhalb der unteren zwei Drittel der Pfeilhöhe liegt (Fig. 3 b) und wobei im Grenzfall der Übergang in den Zweigelenkbogen erfolgt, für den das Größtmoment in den Viertelpunkten den höchsten Wert annimmt (Fig. 1).

Wenn dagegen durch die Veränderung der Trägheitsmomente die Momente in den Viertelpunkten herabgesetzt werden, stellt man fest, daß das Moment an den Kämpfern zunimmt. Grenzwertkurven wie III (Fig. 1) gehören zu Bogen, deren reduziertes Trägheitsmoment vom Scheitel gegen die Kämpfer hin wächst, und welche den elastischen Schwerpunkt der Mittellinie im oberen Drittel der Pfeilhöhe haben (Fig. 2 c), wobei der Grenzfall zwei Kragträgern zustrebt, die im Scheitel durch ein Gelenk verbunden sind.

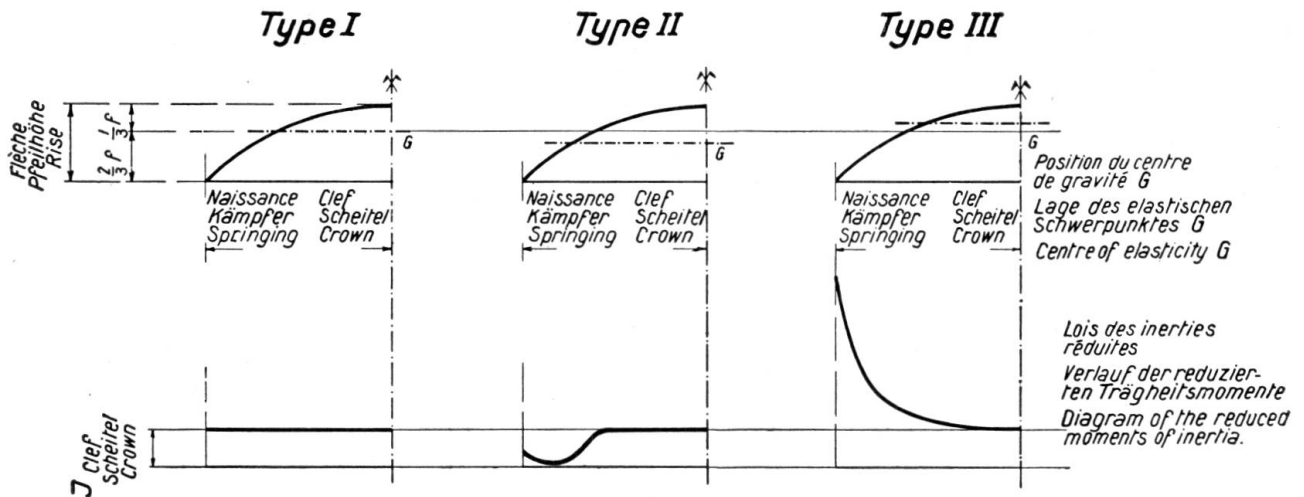


Fig. 2.

Lage der Hauptträgheitsachsen welche durch den Schwerpunkt  $G$  der mittleren Faser gehen;  
Verlauf der reduzierten Trägheitsmomente für die Bogentypen I, II und III.

Augenscheinlich werden die kleinsten Größtmomente zwischen beiden Extremfällen liegen, wenn der Verlauf der Trägheitsmomente ein solcher ist, daß sie in den Kämpfern und in den Viertelpunkten gleich groß sind. Diese Untersuchungen führten auf jenen Bogen besonderer Bauart, der in Frankreich bereits

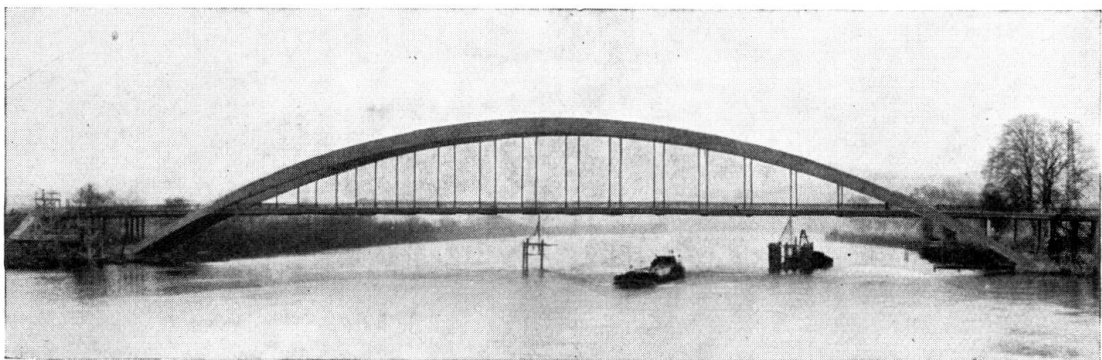


Fig. 3.

Bogen von 161,0 m Stützweite über die Seine bei La Roche-Guyon.

im Jahre 1929 beim Bau der Pont de Conflans-Fin-d'Oise für eine Spannweite von 126 m ausgeführt worden ist und der eine noch interessantere Anwendung bei der von uns konstruierten Brücke von 161 m Spannweite über die Seine bei Roche-Guyon gefunden hat (Fig. 3 und 4).

Mit Rücksicht auf das gründliche Studium, welches bei diesem Bauwerk vorgenommen wurde, soll es als Vergleichsgrundlage für verschiedene Annahmen dienen.

Um dies mit mehr Klarheit zu tun, muß man im Voraus die Wahl der anderen Eigenarten dieses Bogens festlegen.

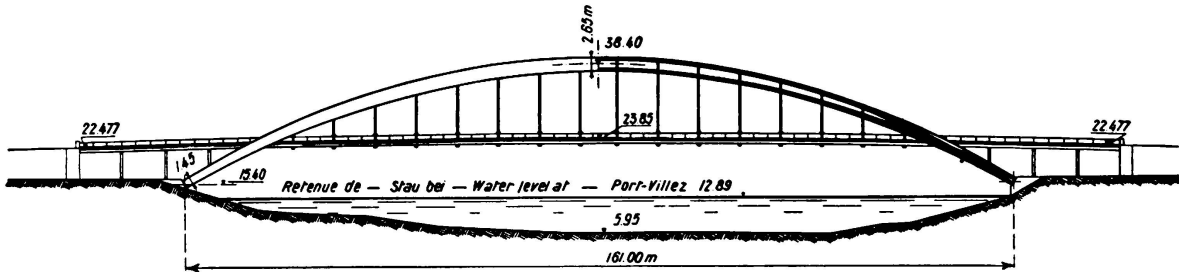


Fig. 4.

Brücke bei La Roche-Guyon. Aufriß und Längsschnitt.

## 2. Wahl des Pfeilverhältnisses.

Um die Bedingungen dieser Wahl zu bestimmen, wurden die Kurven B (Fig. 5)

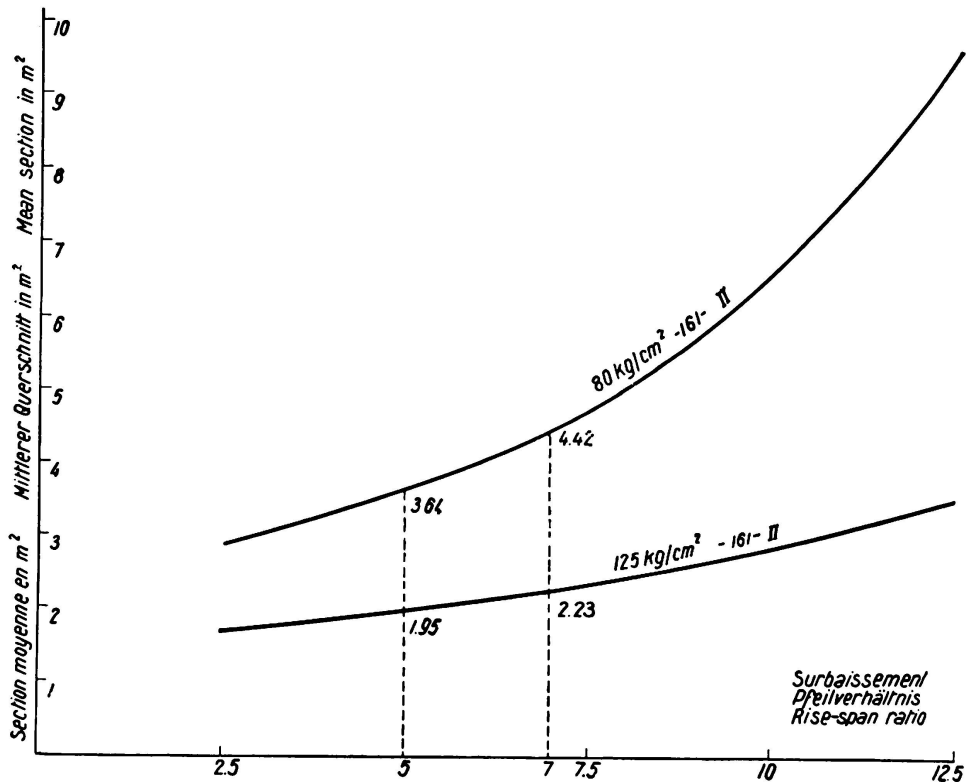


Fig. 5.

Kurven B.

Änderung des mittleren Querschnittes in Funktion des Pfeilverhältnisses für Bogentyp II von 161,00 m Stützweite und für Beanspruchungen von 80 kg/cm<sup>2</sup> und 125 kg/cm<sup>2</sup>.

aufgestellt, die die Abhängigkeit der Veränderlichkeit des mittleren Querschnittes vom Pfeilverhältnis darstellen. Eine Prüfung der Kurve 80—161—II, die dem

Bogen von 161 m Spannweite bei Roche-Guyon mit einer zulässigen Spannung von  $80 \text{ kg/cm}^2$  entspricht, zeigt, daß der mittlere Querschnitt von  $4,42 \text{ m}^2$  auf  $3,64 \text{ m}^2$  zurückgeht (dies entspricht einer Verhältniszahl 1,21), wenn sich das Pfeilverhältnis von  $1/7$  auf ein  $1/5$  ändert.

Bei einer höheren Spannung sind die Querschnittsänderungen bedeutend langsamer. Die Kurve 125—161—II zeigt, daß für das gleiche Bauwerk mit einer Spannung von  $125 \text{ kg/cm}^2$  der mittlere Querschnitt sich von  $1,95 \text{ m}^2$  auf  $2,23 \text{ m}^2$  ändert, wenn man von einem Stich von  $1/5$  zu einem solchen von  $1/7$  übergeht (siehe Fig. 5). Die Verhältniszahl des mittleren Querschnittes senkt sich auf  $\frac{2,23}{1,95} = 1,14$ . Wenn man noch die Abwickelungen, die den beiden Pfeilhöhen entsprechen, in Rechnung setzt, stehen tatsächlich die Bauwerksmassen nunmehr im Verhältnis  $\frac{1,054 \cdot 2,23}{1,10 \cdot 1,95} = 1,09$ .

Die Wirkung des Windes ist größer auf einem hohen Bogen und kann einen Mehraufwand an Baustoff notwendig machen. Dieser Mehraufwand würde die Verhältniszahl 1,09 noch vermindern.

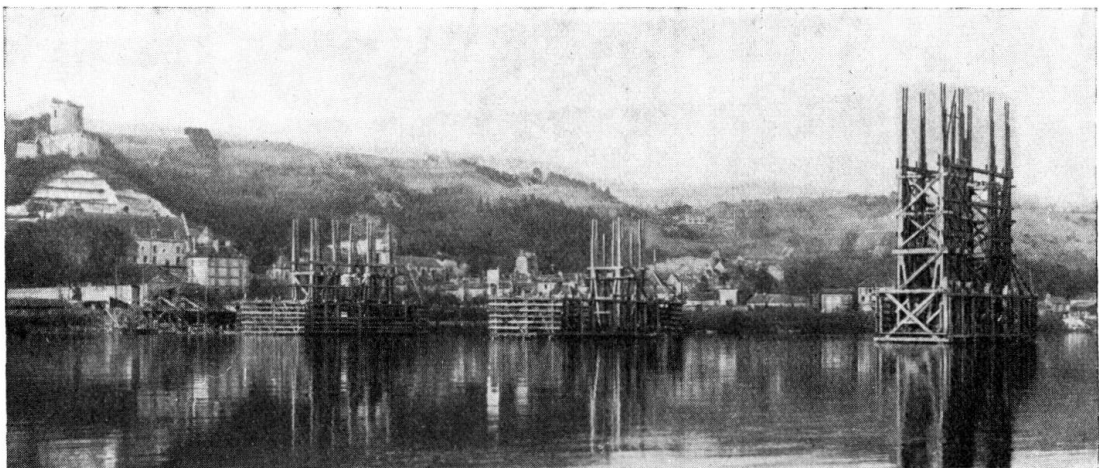


Fig. 6.

Brücke bei La Roche-Guyon. Blick auf das rechte Steilufer.

Der entscheidende Faktor für die Wahl des Pfeilverhältnisses wird in diesem besonderen Falle schließlich die Vergrößerung des Horizontalschubes sein, der ihm nahezu verhältnismäßig ist. Da die Rückwirkung auf dem mittleren Querschnitt nicht groß ist, wird man den Grad der Verringerung des Horizontalschubes je nach Einfachheit der Gründung der Widerlager und im Einklang mit den Bedingungen der Bauausführung und der Ästhetik wählen. In Roche-Guyon haben wir das Pfeilverhältnis  $1/7$  gewählt, welches die Höhe des Bogens über der Fahrbahn der Landschaft anpaßt, die von den steilen Hängen am rechten Ufer beherrscht wird (Fig. 6).

Die Begrenzung der Pfeilhöhe entspricht auch dem Wunsch, die Höhe des Lehrgerüsts über der Fahrbahn zu beschränken.

Diese Schlußfolgerungen lassen sich nur auf Bogenarten anwenden, deren Veränderlichkeit der Trägheitsmomente scharfsinnig erforscht worden ist; für

andere Bogenarten kann das Pfeilverhältnis je nach der zulässigen Spannung einen beträchtlichen Einfluß auf die Querschnitte haben.

3. Wahl der Querschnittsform.

Die Untersuchung des Einflusses der Querschnittsform auf die Spannung (vgl.

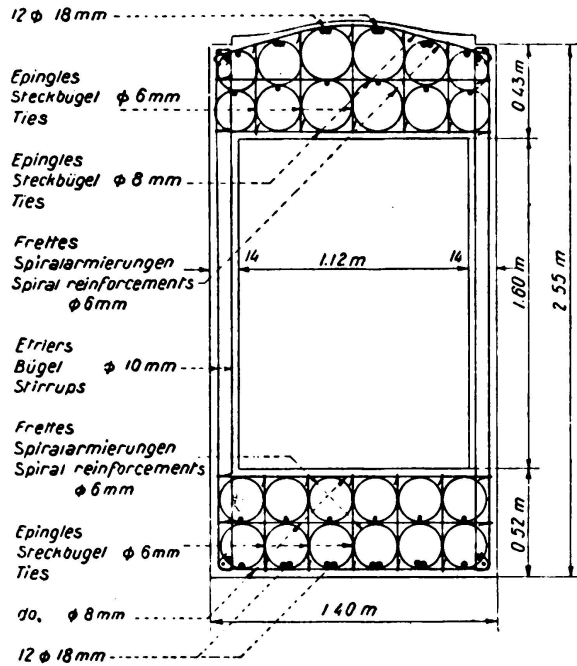


Fig. 7.  
 Querschnitt im Scheitel.

Vallette Génie civil, 9. Mai 1931) würde zeigen, daß man einen breiten und gegliederten Querschnitt wählen muß.

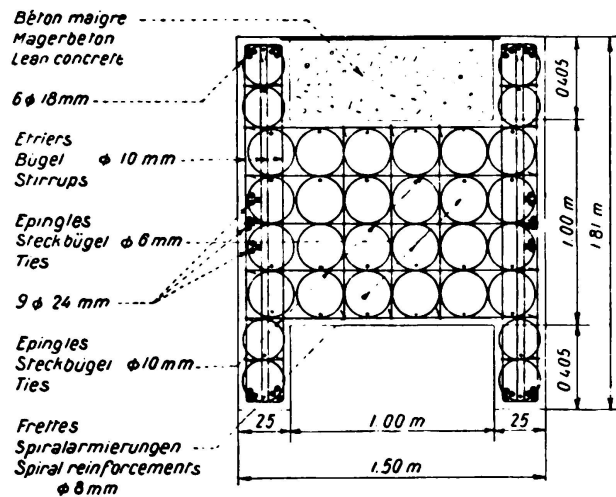


Fig. 8.  
 Querschnitt  
 im Viertel.

Bei einem Bogen mit angehängter Fahrbahn sind wir noch praktisch durch die Notwendigkeit beschränkt, die Spannweite der Querträger nicht über alle Maßen zu vergrößern.

Darum haben wir für den ganzen Teil des Bogens, der oberhalb der Fahrbahn liegt, eine Breite von 1,40 m gewählt. Da ein großer gedrückter Bogen vor uns



liegt (vgl. *Vallette Génie civil*, 9. Mai 1931), haben wir um das kleinstmögliche Verhältnis  $\frac{h}{l}$  zu erhalten, anschließend den Bogen fortlaufend bis auf 3,00 m verbreitert und seine Höhe bis auf 1,45 m, d. i. weniger als  $\frac{1}{110}$  der Spannweite verringert (siehe Fig. 7, 8, 9).

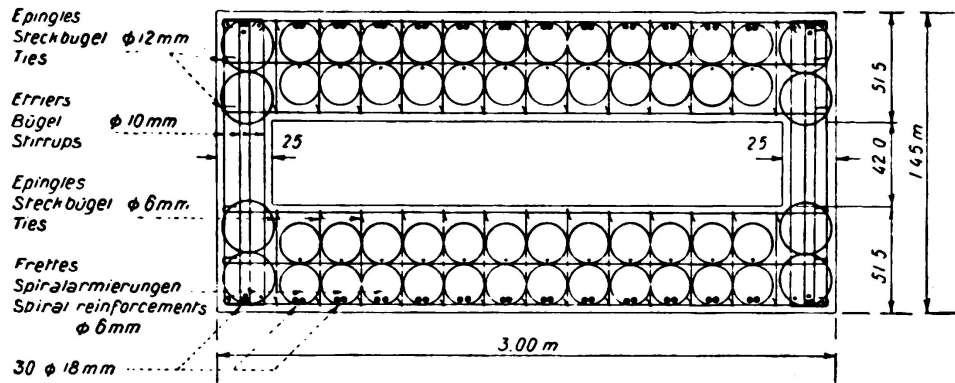


Fig. 9.  
Querschnitt im Kämpfer.

#### 4. Wahl der Spannung.

Die Wahl einer passenden Spannung ist äußerst wichtig, wie die vollausgezogene Kurve C (Fig. 10) darlegt, die die Veränderlichkeit des mittleren Querschnittes in Abhängigkeit von den Spannungen für einen Bogen von 161 m Spannweite und  $\frac{1}{7}$  Stichverhältnis zeigt, der die geforderten Nutzlasten und Temperaturunterschiede aufnehmen soll.

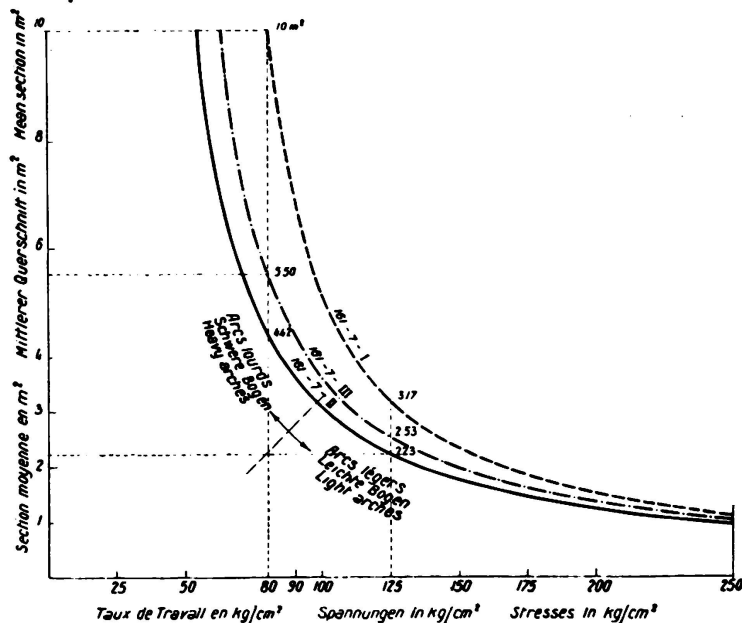


Fig. 10.  
Kurven C.

Änderung des mittleren Querschnittes in Abhängigkeit von der Beanspruchung für 3 Bogen-typen von 161,00 m Stützweite und Pfeilverhältnis  $\frac{1}{7}$ .

Wir hätten versucht sein können, eine übliche Spannung zu wählen, um das Umschnüren des Betons zu vermeiden, wenn wir dieser Veränderlichkeit nicht nachgegangen wären. Die Prüfung der Kurve zeigt sofort, daß die Massen des Bogens für eine Grenze von  $80 \text{ kg/cm}^2$  das Doppelte von denen gewesen wären, die notwendig waren, um den Bogen mit der gewählten Spannung von  $125 \text{ kg/cm}^2$  zu verwirklichen. (Kurve 161—7—II; die Kurven I und III beziehen sich auf andere Gesetze des Trägheitsmomentenverlaufes, von denen später bei der vergleichenden Untersuchung die Rede sein soll.)

Diese Wahl war von der doppelten Notwendigkeit bedingt, den Bogen kleinster Abmessungen und eine ausreichende Sicherheit gegen ein zu schroffes Wachsen der Spannungen infolge zufälliger Ursachen zu haben. Durch eine sehr geringe Verminderung des Querschnittes kann in dem waagerechten Ast der Hyperbel, der dem „leichten“ Bogen entspricht, dieses Anwachsen beträchtlich werden. Darum sind wir bei  $125 \text{ kg/cm}^2$  stehengeblieben. Wir führten den Nachweis der Standfestigkeit und errechneten für mehrere Querschnitte bei Verdoppelung der Nutzlast Spannungen, die  $12 \text{ kg/mm}^2$  in der Bewehrung und  $180 \text{ kg/cm}^2$  im Beton nicht überschreiten.

Außerdem kann auf jeder der Kurven C ein Punkt gefunden werden, für den eine Querschnittsverminderung so mit einem Wachsen  $dR$  der Spannung in Einklang steht, daß  $\frac{d\Omega}{dR} = \text{konstant}$  ist.

Die letzte Bedingung erklärt die Standfestigkeit eines Bogens durch den Wert der Tangente an die Kurve in dem der gewählten Spannung entsprechenden Punkte (oder durch ein Vielfaches dieses Tangens, da die Maßstäbe von  $\Omega$  und  $R$  verschieden sind und demzufolge die Kurve verzerrt ist). Alle diese Betrachtungen und die vorerwähnten Studien haben zu der angenäherten Beziehung geführt:

$$l = \frac{\epsilon R^n}{e^\alpha}$$

##### 5. Grenzspannweite von Bogen:

Da die Konstante  $\alpha$  von der Gewölbeform abhängt, so ergeben die Konstanten  $\epsilon$  und  $n$ , wenn sie entsprechend gewählt werden, für ein und dasselbe Pfeilverhältnis  $\frac{1}{e}$  die gleiche Standfestigkeit und infolgedessen auch den gleichen Charakter, „schwer“ oder „leicht“. Die obenstehende Formel gibt also die praktische Handhabe, die Betonfestigkeit in Abhängigkeit von der Spannweite und vom Pfeilverhältnis zu wählen. Wie wir gesehen haben, ist diese Wahl wesentlich, um einen Bogen wirtschaftlich und zugleich stabil zu erstellen.

Dank dieser Formel können wir auch unmittelbar die Grenzspannweite  $l$  des Bogens bestimmen.

Wir haben in Fig. 11 für wechselnde Spannweiten die Kurven C gezeichnet, die die Veränderlichkeit des mittleren Querschnittes eines Bogens vom Typ II mit dem Pfeilverhältnis  $\frac{1}{5}$  in Abhängigkeit von der Spannung  $R$  zeigen.

Diese Darstellung gibt die Kurven gleicher Standfestigkeit für die „leichten“ Bogen an. Die mit I bezeichnete Kurve trennt die „schweren“ von den „leichten“

Bogen. Mit den gewählten Maßstäben entspricht sie dem Wert  $\frac{d\Omega}{dR} = 0,005$ . Für Roche-Guyon haben wir  $\frac{d\Omega}{dR}$  zu 0,0025 angenommen, d. i. 0,5 im Maßstab der graphischen Darstellung.

Für die Standfestigkeitszahl 0,4 haben wir die aus dem obenstehenden Näherungsgesetz erhaltene Kurve punktiert eingetragen. Dieses Gesetz bietet den Vorteil, für sehr große Spannweiten die Standfestigkeit etwas zu erhöhen.

Es ist zu beachten, daß die Kurven für alle Spannweiten unter der Annahme gezeichnet wurden, daß jeder Bogen eine Last von 6600 kg/lfdm außer seinem Eigengewicht trägt: 2000 kg/m Nutzlast und 4600 kg/m für die Fahrbahn, Hängestangen, Windverbände und alle anderen Nebenbauglieder. Diese Verhältnisse entsprechen einer lichten Breite von 8,00 m. Die obenerwähnten Kurven sind derart, daß der mittlere Querschnitt der Bogen nahezu proportional der Nutzlast ist, die ihrerseits wiederum verhältnismäßig der Breite ist.

Dies Ergebnis folgt aus der von *Vallette* aufgestellten allgemeinen Formel (2) (2. Band der Abhandlungen der I.V.B.H., Zürich 1934).

$$\Omega_0 = pl \frac{C_5 e\lambda + C_6 \frac{e}{\lambda} + \frac{C_8}{\lambda'} + \frac{C_1 l}{2 a^2 h} + \frac{C_2 h e^2}{2 l}}{R - C_4 \lambda l e + C_7 \frac{a^2}{\lambda} \left(\frac{h}{l}\right)^2 e^2 - C_3 \frac{h}{l} \times \frac{e}{2}}$$

Die Anwendung dieser Formel auf Gewölbe vom Typ II (Typ La Roche-Guyon) ergibt nach der Bestimmung der Konstanten C für den Kämpferquerschnitt die Formel (3)

$$\Omega_0 = pl \frac{0,124 k_1 e\lambda + 0,0376 \frac{e}{\lambda} + 0,329 \times \frac{1}{\lambda'} + 5,95 + 0,00163 e^2}{R - 0,191 \lambda l e + t^0 e \left(0,0025 \frac{e}{\lambda} - 0,603\right)}$$

Für Bögen vom Typ I mit gleichbleibendem reduziertem Trägheitsmoment und Querschnitt würde man erhalten (4)

$$\Omega_0 = pl \frac{0,121 k_1 e\lambda + 0,04 \frac{e}{\lambda} + 0,35 \times \frac{1}{\lambda'} + 3,57 + 0,005 e^2}{R - 0,28 \lambda l e + t^0 e \left(0,0127 \frac{e}{\lambda} - 1,54\right)}$$

Für den Bogen vom Typ III mit annähernd konstantem, reduziertem Querschnitt, der von *Chalos*, Ingenieur des Ponts et Chaussées, Chef des Service Central d'Etudes Techniques du Ministère des Travaux Publics,<sup>3</sup> beschrieben, aber durch die Wahl von Hohlquerschnitten verbessert worden ist, erhält man (5):

$$\Omega = pl \frac{0,125 k_1 e\lambda + 0,038 \frac{e}{\lambda} + 0,33 \times \frac{1}{\lambda'} + 4,85 + 0,002 e^2}{R - 0,248 \lambda l e + t^0 e \left(0,0037 \frac{e}{\lambda} - 0,61\right)}$$

In diesen Formeln bedeutet  $k_1$  das Verhältnis des Gewichtes der Fahrbahn und der Nebenbauteile zur Nutzlast. Selbst für den Fall, daß sich dieses Verhältnis von 2 auf 3 änderte, welches die äußerste Grenze darstellt, wäre die Rückwirkung dieser Änderung auf die Formel geringfügig.

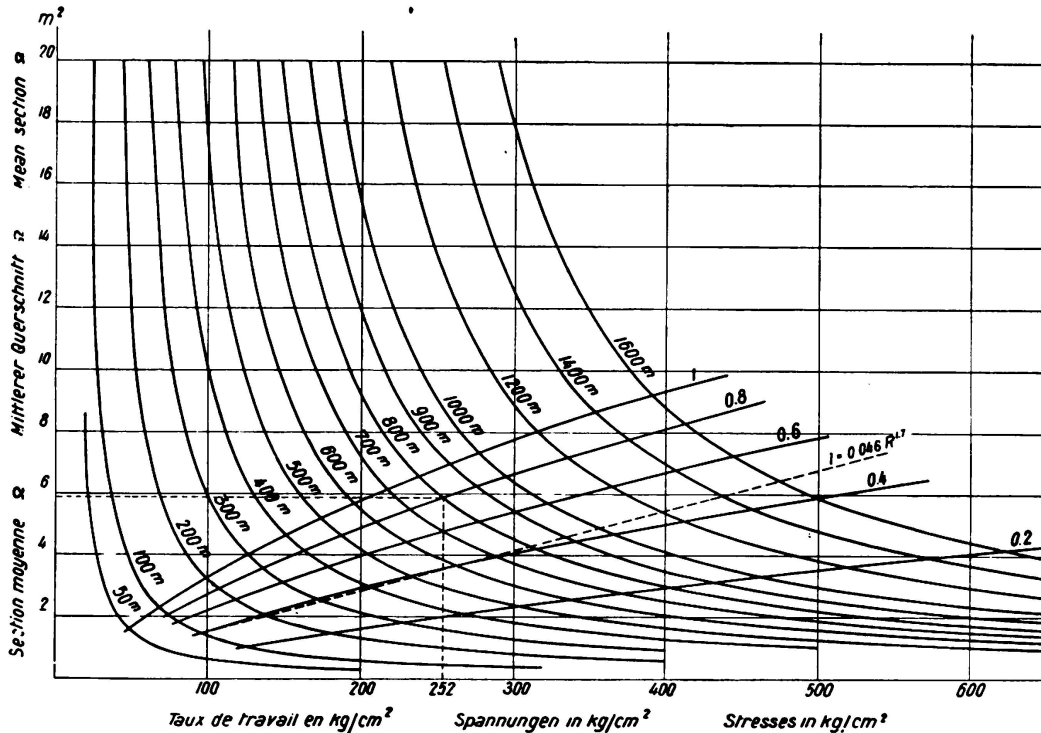


Fig. 11.

Kurven C.

Kurven für die Änderung des mittleren Querschnittes in Funktion der Beanspruchung und Stabilitätskurven für Bogen mit Pfeilverhältnis 1 : 5 bei verschiedenen Spannweiten. Die Nutzlast für den Bogen (Straßenbrücke) wurde zu 2 t/m und die Temperaturänderung zu  $\pm 25^\circ$  angenommen.

Es wird besonders hervorgehoben, daß die Formeln 3, 4 und 5 nur für Straßenbrücken anwendbar sind. Für Eisenbahnbrücken mit den gleichen Parametern  $\frac{h}{l}$  und  $a^2$  werden die Formeln durch entsprechende Beiwerte abgeändert.<sup>4</sup>

Wenn wir z. B. eine Spannweite von 800,00 m und eine lichte Breite von 16,00 m nehmen, zeigt die Fig. 11, daß der Querschnitt  $\Omega$  eines Bogens von der Standfestigkeitszahl 0,8 bei einer Spannung von 252 kg/cm<sup>2</sup>  $5,90 \times 2 = 11,80$  m<sup>2</sup> haben muß.

Es ist also schon vor der Einführung der neuartigen Verfahren, von denen man ein Anwachsen der Betonfestigkeit erwartet, möglich, auf den üblichen Bauverfahren fußend eine solche Spannweite ins Auge zu fassen.

Da die zulässige Spannung des umschnürten Betons nach Maßgabe des Prozentsatzes der Umschnürung erhöht werden kann, so ist nur noch die Grenze in der 0,6-fachen Bruchfestigkeit des nicht umschnürten Betons zu beachten.

Eine sorgfältige Ausführung gestattet die Garantie einer Mindestfestigkeit von

<sup>3</sup> Siehe 2. Bd. der Abhandlungen der I. V. B. H., Zürich 1934.

<sup>4</sup>  $h$  = Höhe des Querschnitts,  $r$ : Drearm =  $ah$   $\Omega$ : Fläche des Querschnitts,  $J = \Omega \cdot a^2 \cdot h^2$ .

420 kg/cm<sup>2</sup> nach 90 Tagen, welche der obigen Spannung von 252 kg/cm<sup>2</sup> gut entspricht.

Durch die Möglichkeit, die die Leistungsfähigkeit des Materials eröffnet, darf indessen nicht der Blick für die Schwierigkeit der Ausführung verloren werden, bei der das Lehrgerüst die wesentliche Rolle spielt. Diese Frage soll weiter unten behandelt werden.

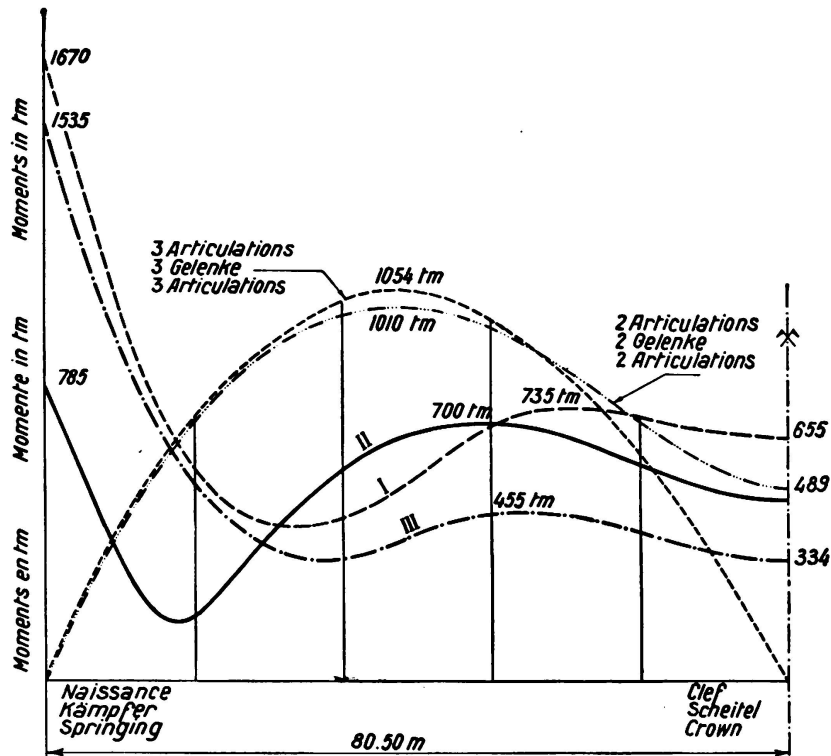


Fig. 12.

Maximalmomentenkurven für die Brücke bei La Roche-Guyon für fünf verschiedene Bogentypen.

### 6. Vergleich mit anderen Bogentypen.

Wir vergleichen den angewandten Bogentyp II (Fig. 12) mit zwei anderen, klar umrissenen Typen:

Dem eingespannten Parabelbogen mit konstantem reduziertem Querschnitt (I), der in allen Abhandlungen der Festigkeitslehre stets angeführt wird,

Der interessanten Bogenform, deren reduziertes Trägheitsmoment vom Scheitel zu dem Kämpfer nach dem Gesetz:

$$J' = \frac{J_{\text{Scheitel}}}{1 - \frac{K-1}{K} m^r}$$

zunimmt. Sie wurde von *Chalos* empfohlen, der auch Tafeln für die Durchführung der schnellen Berechnung angegeben hat (Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau, 2. Band der Abhandlungen, Zürich 1934).  $m$  bezeichnet den Parameter  $\frac{x}{a}$ , das ist das Verhältnis

der Abszisse zur halben Spannweite des Bogens und  $K$  bezeichnet das Verhältnis zwischen den reduzierten Trägheitsmomenten des Kämpfers und des Scheitels.

Für  $K = 1$  geht dieser Bogen in den Typ I über.

Wir haben diese beiden Bogenformen unter denselben Bedingungen wie bei Roche-Guyon entworfen, mit den gleichen Annahmen für Nutzlast und Temperatur.

Um den kleinsten mittleren Querschnitt zu erhalten, haben wir in Bezug auf die Querschnittsform die Studien von *Vallette* auch auf diese Bogen angewendet. Die Bögen haben demnach im ganzen oberhalb der Fahrbahn gelegenen Teil die Form eines rechteckigen Kastens von 1,40 m Breite und verbreitern sich alsdann ständig bis zu den Kämpfern. Diese Verbreiterung wird durch die Notwendigkeit eingeschränkt, für die beiden vorerwähnten Typen am Kämpfer ein fünffach größeres Trägheitsmoment zu erhalten wie bei Roche-Guyon. Dies zwingt zur Beibehaltung eines dicken Querschnittes.

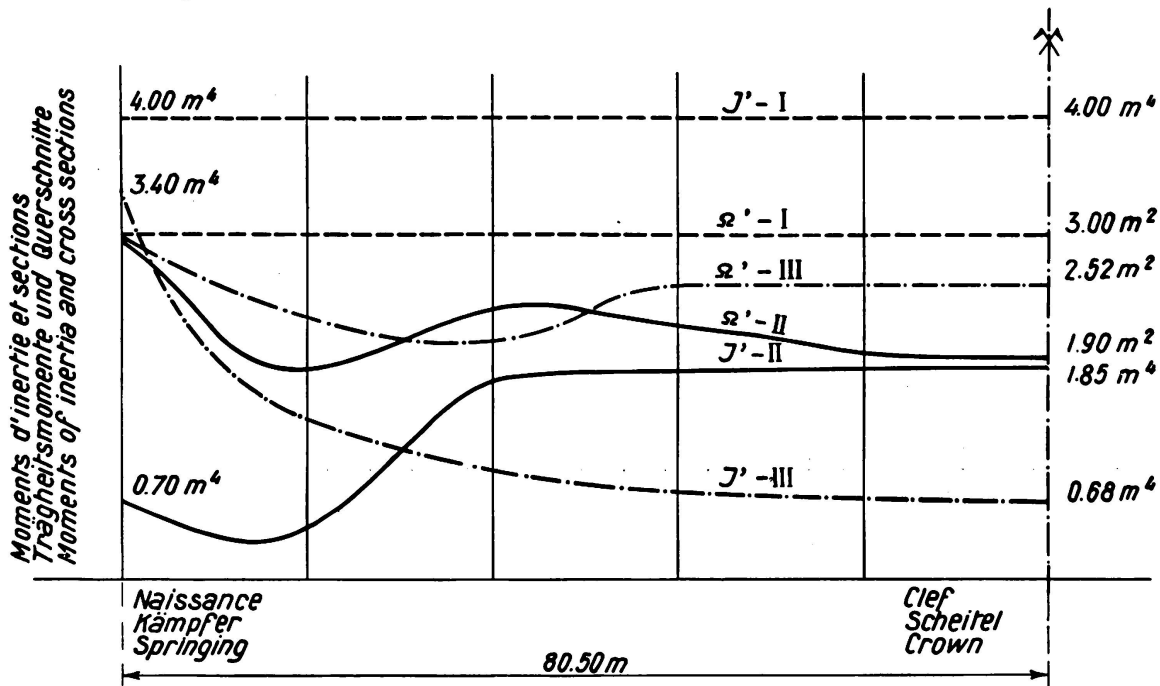


Fig. 13.

Reduzierte Trägheitsmomente und reduzierte Querschnitte in allen Punkten des Bogens von La Roche-Guyon für die Typen I, II und III. Diese Werte dienen zur Aufstellung der Kurven C, Fig. 10, der Maximalmomentenkurven Fig. 12.

Die Fig. 13 zeigt die für die erwähnten Berechnungen der drei Bogenformen verwendeten Kurven der reduzierten Trägheitsmomente  $J'$  und reduzierten Querschnitte  $\Omega'$ .

Unter der für den Bogen von Roche-Guyon gemachten Annahme, daß die Bogenmittellinie die Stützlinie für ständige Last ist und daß die Bogenzusammendrückung ausgeschaltet wird, haben wir nach dem Gesetz der Ähnlichkeit für diese Bogen die Kurven auftragen können, die die Veränderlichkeit des mittleren Querschnittes in Abhängigkeit von der zulässigen Spannung angeben (Fig. 10, Kurve C I und III).

Für Bogen mittlerer Standfestigkeitszahl bestätigt sich eindeutig die Überlegenheit der Bogen mit Momentenausgleich. Praktisch sind sie überhaupt die einzigen, die in Betracht zu ziehen sind; die „schweren“ Bogen sind nicht wirtschaftlich, die „leichten“ dagegen nicht stabil genug. So ergibt sich bei Roche-Guyon bei einer zulässigen Spannung von  $125 \text{ kg/cm}^2$  ein mittlerer Querschnitt von  $2,23 \text{ m}^2$ . Für einen Bogen konstanten reduzierten Querschnitts hätte man  $3,17 \text{ m}^2$  gebraucht und für einen Bogentyp nach *Chalos*  $2,53 \text{ m}^2$  unter Annahme von  $K = 5$  und  $\gamma = 2$ .

Wir unterstreichen, daß wir den letzteren Bogen, um dieses Ergebnis zu erhalten, so abgewandelt haben, daß er bei vollständig gleichbleibender Festigkeit überall die Spannung von  $125 \text{ kg/cm}^2$  besitzt.

Dabei haben wir einen beliebigen Verlauf der Querschnittsflächen gewählt und nur das Gesetz der tatsächlichen Trägheitsmomente genau eingehalten, nämlich

$$J = \frac{J_{\text{Scheitel}}}{\left(1 - \frac{4}{5} m^2\right) \cos \alpha}$$

Dies ist das einzige Gesetz von überwiegendem Einfluß und bedingt die Verteilung der Kraft; die Querschnittsflächen treten nur durch ihren Mittelwert in Erscheinung.

Ist der Vorteil des von uns gewählten Bogentyps im Hinblick auf die Betonkubatur schon groß, so ist er unbestreitbar für die Widerlager. Wie Fig. 12 zeigt, in der wir die Umhüllenden der Größtmomente dargestellt haben, gibt er die kleinsten Momente am Kämpfer. Zum Vorteil in Bezug auf die Momente gesellt sich ein weiterer in Bezug auf die Normalkraft. Es ergeben sich folgende Stützkkräfte:

Typ II	(Roche-Guyon)	. . . . .	M = 785 tm
			N = 1850 t
Typ III	von <i>Chalos</i> , mit beliebigem Querschnittsverlauf		M = 1535 tm
			N = 2060 t
Typ I	mit konstantem reduziertem Querschnitt	. . .	M = 1670 tm
			N = 2200 t.

Es könnte uns entgegnet werden, daß ein Zweigelenkbogen jegliche Momente an den Widerlagern vermieden hätte. Aber wenn man Normalkräfte von 2000 t pro Bogen erreicht, werden die Gelenke entweder zu schwierig für die Ausführung in umschnürtem Beton, denn man brauchte Breiten in der Größenordnung von 5,20 m pro Bogen, oder aber zu kostspielig, wenn man Gußstahlausführungen wählt. Außerdem würde dabei der mittlere Querschnitt stärker als der des von uns verwendeten eingespannten Bogens. Zum Nachweis haben wir die Umhüllende der Größtmomente für einen auf den Fall von Roche-Guyon angewandten Zweigelenkbogen dargestellt (Fig. 12).

Aus dem Vorhergesagten erhellt, daß die Möglichkeit besteht, Bogen zu erhalten, die in allen Querschnitten annähernd die gleiche Spannung haben, wie auch immer der Verlauf der Trägheitsmomente gewählt sei, d. h. man kann immer einen Bogen gleicher Festigkeit des bewehrten Betons erreichen, wenn man Querschnittsform und -fläche verändert. Aber es gibt unter all diesen Bogen

gleichbleibender Festigkeit zwei, die einen Kleinstwert der einzubauenden Massen ergeben: der eine ist der Bogen mit dem vom Scheitel zu den Kämpfern nach dem von *Chalos* angegebenen Gesetz wachsenden Trägheitsmoment, der andere ist der bei Roche-Guyon angewandte Typ mit abnehmendem Trägheitsmoment. Nach Maßgabe des zu verwirklichenden Falles wird der Vorteil bei dem einen oder dem anderen liegen, je nach dem Stich und dem Verhältnis zwischen ständiger Last und Nutzlast. Für den Typ III wird man natürlich  $K$  und  $\gamma$  möglichst vorteilhaft wählen müssen.

Das *Chalos*'sche Gesetz gilt besonders für Bauten mit hochliegender Fahrbahn, für die sich der Vorteil der Verschwächung im Scheitel im Hinblick auf die lichte Höhe mit ästhetischen Wünschen trifft und welche an die schönen Mauerwerksbrücken mit starken Kämpfern erinnern. Natürlich muß der Boden für die auf Pfeiler und Widerlager wirkenden Momente tragfähig sein.

Als Beispiel für nach diesem Gesetz ausgeführte Bauten geben wir an die von der «Société de Constructions Industrielles et de Travaux d'Art» ausgeführte

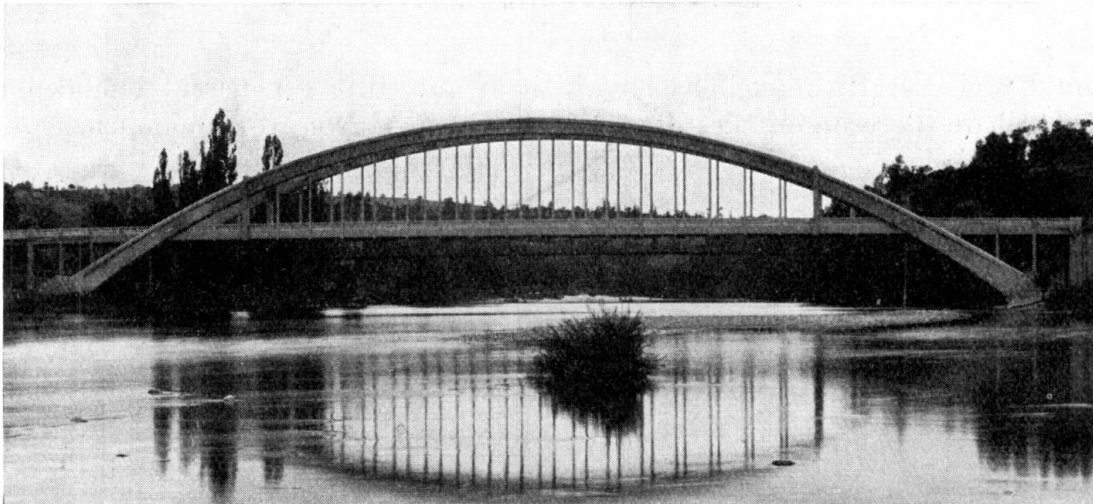


Fig. 14.

Brücke über den Lignon.

Brücke über die Loire in Bas-en-Basset (Fig. 14). Die Spannweite mißt 112,00 m. Die Bogenachse stellt eine Parabel 4. Ordnung dar. Im Scheitel hat der Querschnitt eine Höhe von 1,90 m. Diese Höhe steigt gegen die Kämpfer hin stetig an bis zum Werte von 3,275 m. Man beachte die gute Einfügung dieses Brückensystems ins Landschaftsbild. Die Natur wird durch Bauwerksglieder für Bogen und Fahrbahn nur unwesentlich verdeckt.

Fig. 15 stellt die Brücke über den Lignon dar.

### 7. Berechnung.

Unter Vorbehalt über jenen Wert des Standsicherheitskoeffizienten, den man vorsichtigerweise nicht unterschreiten sollte — wobei zur Ermittlung der Standfestigkeitszahl die Fig. 10 und 11 benutzt werden — sind die leichten Formen die einzigen, die für Bauten großer Spannweiten in Betracht kommen.

Diesem Vorteil wirkt entgegen, daß sie genauere Berechnung als die massiven



Formen verlangen, bei denen das Eigengewicht im Kräftespiel ein ausgleichender Faktor darstellt. Aber das zu erreichende Ziel rechtfertigt den notwendigen Aufwand an Untersuchungen. Die Gesetze der allgemeinen Ähnlichkeit erlauben übrigens, diese Untersuchung nur einmal für alle Bogen eines Typs durchzuführen; Kräfte und Querschnitte eines Bogens gleicher Form, dagegen beliebiger Spannweite, Pfeilverhältniszahl und Materialfestigkeit lassen sich durch einfache Proportionen herleiten.

Wir haben dies gelegentlich der Brücke von Roche-Guyon geprüft.

Ein Idealtyp, der seit einigen Jahren für die gewählte Bogenform aufgestellt worden ist, hat uns durch Anwendung des Gesetzes der Ähnlichkeit die nachstehenden Werte geliefert:

An den Kämpfern . . . . .	M = 796 tm
	N = 1842 t
Im Viertel, 32 m vom Scheitel entfernt .	M = + 710 tm
	N = 1646 t
Im Scheitel . . . . .	M = + 520 tm
	N = 1620 t.

Zum Beweis der Richtigkeit haben wir auch mit Hilfe genauerer Methoden die unmittelbare Berechnung des Bogens von Roche-Guyon vorgenommen.

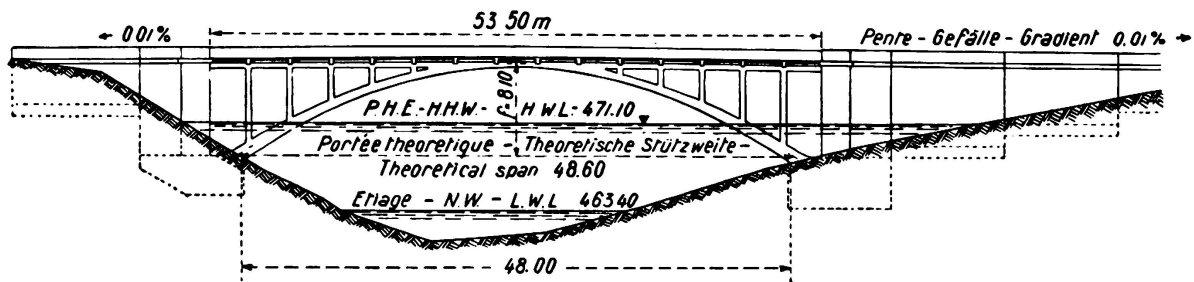


Fig. 15.

Brücke bei Bas-en-Basset.

Wir haben dabei die gebundenen Formeln und das Verfahren der zeichnerischen Bestimmung angewendet, die *Vallette* in der *Annales des Ponts et Chaussées* beschrieben hat (VI 1925).

Das zeichnerische Verfahren gibt als einziges deutlich den Weg an, auf dem die Annahmen abgewandelt werden müssen, um eine bestimmte Kräfteverteilung zu erhalten. Es ist auch das einzige, welches Unregelmäßigkeiten der Querschnitte, wie etwa die ziemlich rasche Änderung des Trägheitsmomentes in gewissen Punkten, vollständig in Rechnung zu setzen erlaubt.

Darüber hinaus sind bei seiner Anwendung alle Fehlerquellen praktisch ausgeschlossen. Die Empfindlichkeit ist so beträchtlich, daß die Berichtigung der Kurve des Horizontalschubes auf wenigstens 0,5 % möglich war.

Im Gegensatz zur Auffassung verschiedener Autoren kann es auf die gesamte Bogenspannweite angewendet werden. Es ist nicht nötig, die Berechnung zu wiederholen, um die Wirkungen einer in der Nähe der Kämpfer angreifenden

Last zu erhalten. Man braucht das Verfahren für diese Punkte nur durch die Annahme verschiedener Bezugslinien für die Abszissen anzupassen, wodurch verschiedene Konstanten noch genauer bestimmt werden können.

Momente, Normal- und Querkkräfte sind unmittelbar durch Auswertung der Auflagerkräfte bestimmt worden, indem jede Kraftecke gerade über einer Hängestange angenommen wurde.

Es sind die inneren Kräfte für die geradzahligen Hängestangen, die Kurven der Teilpunkte und die Umhüllenden der Stützkräfte (Fig. 16) wiedergegeben. Diese Darstellung ist so empfindlich, daß es unmöglich ist, einen Fehler in der Lage der Stützkräfte zu machen. Diese sind nämlich bestrebt, ohne unregelmäßige Ausschläge aufeinander zu folgen. Sie ergeben eine Umhüllungskurve und schneiden auf dem Widerlagersenkrechten Abschnitt ab, die nach einem stetigen und bestimmten Gesetz wachsen.

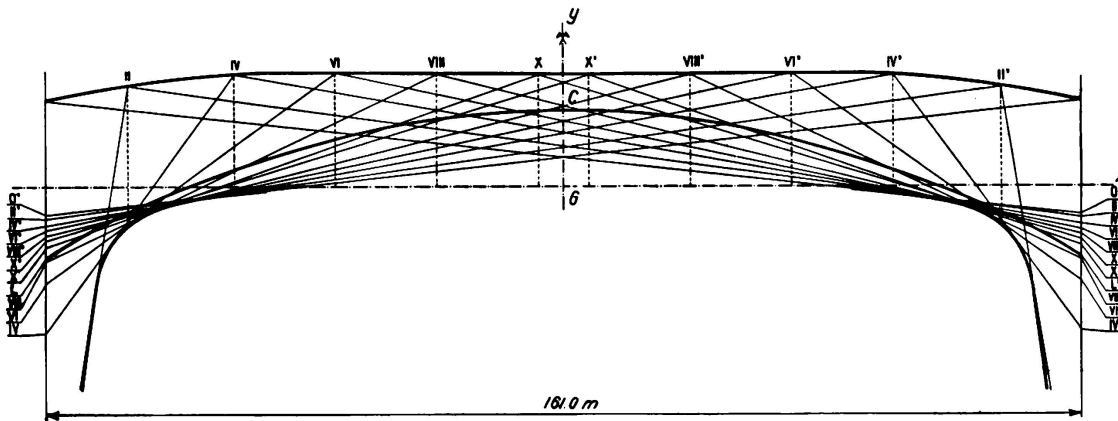


Fig. 16.

Kämpferkraftlinie und Umhüllungskurve für die Bogen der Brücke bei La Roche-Guyon.

Wir haben angenommen, daß für alle Punkte die Größtspannung durch das Größtmoment in Verbindung mit der ihm entsprechenden Normalkraft gegeben sei. Diese Hypothese wird der Wirklichkeit sehr nahe kommen.

Die nach dieser Methode ermittelten Kräfte sind:

Am Kämpfer . . . . .	$M = - 785 \text{ tm}$
	$N = 1842 \text{ t}$
Im Viertel, 32,0 m vom Scheitel entfernt .	$M = + 702 \text{ tm}$
	$N = 1641 \text{ t}$
Im Scheitel . . . . .	$M = + 490 \text{ tm}$
	$N = 1615 \text{ t}$

Wenn wir sie mit den durch das vorher angegebene Gesetz der Proportionalität ermittelten Werten vergleichen, können wir feststellen, daß dieses zu einer genügend genauen Bestimmung des Bogens genügt hätte, und daß die ausschließliche Verwendung dieses Rechenverfahrens gerechtfertigt ist, selbst bei den unvermeidlich kleinen Abweichungen in der Form (Seileck für ständige Lasten), die immer zwischen zwei Bogen bestehen.

Die einzige Unbestimmtheit der Rechnung für die Bestimmung der Wirkungsweise des Bauwerkes könnte in dem Wert des Elastizitätsmoduls des Betons stecken. Bevor wir aber noch für Roche-Guyon an den Ausgleich der weiteren Kräfte aus Schwinden und aus Lasten der Fahrbahn gingen, hatten wir uns über die Größe dieses wichtigen Faktors unterrichtet.

Dazu haben wir sehr interessante Versuche an der Brücke l'Oued Chiffa, im Zuge der Bahnlinie Algier—Oran angestellt.

Jeder der mit vibriertem Eisenbeton erstellten Bögen hat die Form eines rechteckigen Kastens von 5,00 m Breite. Es wurde die Form des Bogens mit vom Scheitel zu den Kämpfern abnehmendem Trägheitsmoment ausgeführt; die Brücke ist bemerkenswert durch das große Pfeilverhältnis, die beträchtlichen Wirkungen der Nutzlast (Lokomotiven) und die in Algerien sehr bedeutenden Temperaturunterschiede.

Um genau arbeiten zu können, haben wir zuvor das Lehrgerüst abgesenkt, denn wir hatten bei anderen ähnlichen Arbeiten gemerkt, daß die Genauigkeit der Beobachtungen dadurch verfälscht wurde, daß das Nachlassen der Zusammenpressung des Holzes die Abstützung des Bogens auf dem Lehrgerüst in der Gegend der Viertelspunkte aufrecht erhält. Das Maß, um das man die Bogen überhöhen müßte, um sie von dieser Abstützung zu befreien, ist bedeutend größer als jenes, welches der gewünschten Zusammendrückung bei der Ausrüstung und Ausgleichung entspricht, und dadurch werden die bedeutenden Biegemomente in der Gegend des Scheitels längs des freitragenden Bogenstückes verursacht.

Nachdem das Gerüst mit Hilfe von Spindeln abgesenkt worden ist, genügt es, diese entsprechend zu betätigen, um die theoretischen Verformungen zu erhalten und den Bogen in eine solche Lage zu bringen, daß die Stützzlinie genau mit der Mittellinie übereinstimmt. Nunmehr ist der Bogen frei von überflüssigen Nebenspannungen. Wir bezeichnen diese Lage mit „Neutralzustand“ des Bogens. Diesen Zustand erhält man, wenn der Bogen mit Hilfe von Spindeln in die Lage, die er ursprünglich auf dem Lehrgerüst innehatte, zurückgeführt wird (abzüglich der Senkung  $\int N \frac{ds}{E\Omega} \times \frac{dy}{ds}$ , die den Zusammendrückungen entspricht, und in diesem Fall immer vernachlässigt werden kann). Der Fugenquerschnitt erleidet dabei keine Verdrehung.

Da wir nun den Horizontalschub, der im „Neutralzustand“ mittig wirkt, ferner die wirkliche Bogenverkürzung  $\epsilon$  kennen, besitzen wir sichere Grundlagen zur Bestimmung des Elastizitätsmaßes  $E$ . Wir haben diesen Modul für den ersten Bogen zu  $2,1 \cdot 10^6 \text{ t/m}^2$  und für den zweiten zu  $2,3 \cdot 10^6 \text{ t/m}^2$  gefunden. Die Untersuchungen wurden 18 Tage nach Beendigung der Betonierung jedes Bogens angestellt. Dies gilt für einen Beton mit 400 kg Zementgehalt. Wir konnten also mit Recht für Roche-Guyon, wo das Mischungsverhältnis das gleiche ist, den Wert  $2,2 \cdot 10^6$  wählen.

Aus dem zweiten Teil dieses Berichtes, der sich auf die Ausführung von Bauwerken bezieht, ersieht man, wie dieser Wert durch genaueste Beobachtungen bestätigt worden ist, die man während der Ausrüstung der einzelnen Lamellen und des vollendeten Bogens und auch während des Ausgleiches angestellt hat.

## II. KAPITEL.

*Dreigelenkbogen.*

Die Berechnung dieser Bogenform ist sehr einfach, weil die Schnittkräfte sich ohne Berechnung der elastischen Deformationen ergeben und weil Temperatur und Schwinden ohne Einfluß bleiben.

Wir haben zum Vergleich in der Fig. 12 die Kurve der Größtmomente für einen Bogen eingezeichnet, der die gleiche Form wie Roche-Guyon, aber drei Gelenke besitzt.

Die Fläche  $M \cdot dx$ , welche die Größe des mittleren Momentes angibt, ist größer als die der Bogentypen II und III, dagegen kleiner als die der Bogen I und IV. Die ungleiche Verteilung der Momente, die zwischen Null und einem Größtwert liegen, entsprechend nicht einer guten Materialausnutzung. Dem Vorteil, welcher diesem Bogentyp wegen des Fehlens jeglicher Momente an den Widerlagern zuzukommen scheint, steht die Verwendung kostspieliger Gelenke gegenüber, die uns für große Spannweiten wegen der großen örtlichen Pressungen nicht geeignet erscheinen. Wenn für die gewählte Standfestigkeitszahl Arbeitsspannungen von mehr als  $125 \text{ kg/cm}^2$  für die laufenden Querschnitte zulässig und berechtigt erscheinen, wird man nur mit Mühe andere als sorgfältig konstruierte Stahlgußgelenke verwenden können, um die Unbestimmtheit des Angriffspunktes der Stützkkräfte in den Berührungsflächen in engen Grenzen zu halten.

Bei großen Spannweiten muß man seine ganze Aufmerksamkeit auf etwaige Verlagerungen dieses Punktes richten. Wenn man die bekannte Anordnung des Abwälzens einer konvexen Fläche auf einer konkaven von größerem Krümmungsradius oder auf einer ebenen Fläche benutzt, kann diese Verlagerung unter der Einwirkung des Schwindens zuzüglich der Temperatur eine nicht mehr zu vernachlässigende Größe annehmen. Ferner ist ein anderer Einfluß mit einzurechnen, nämlich der des Kriechens des Betons, auf den der Ingenieur *Freyssinet* seit einigen Jahren die Aufmerksamkeit der Konstrukteure gelenkt hat. Die Bestimmung seiner Gesetzmäßigkeit ist der Gegenstand eingehender Untersuchungen.

Für die Dreigelenkbogen erlangen die obenerwähnten Erscheinungen wegen der ungehinderten Winkeldrehung eine größere Wichtigkeit. Für ein Schwindmaß von  $0,22 \text{ mm/m}$ , mit dem man nach der Ausrüstung rechnen muß, senkt sich der eingespannte Bogen von Roche-Guyon um  $0,0548 \text{ m}$ , während sich ein Dreigelenkbogen gleicher Spannweite und gleichen Pfeilverhältnisses um  $0,067 \text{ m}$  senken würde. Dieser Wert entspricht einem Temperaturabfall von  $20^\circ$ .

Wenn besondere Umstände zur Ausführung von Dreigelenkbogen großer Spannweite und von großem Pfeilverhältnis führen sollten, würden wir uns vorsichtigerweise die Möglichkeit vorbehalten, nach einiger Zeit des Betriebes die zur Ausrüstung verwendeten Pressen wieder ansetzen zu dürfen, um den Bogen nach Einwirkung des Schwindens oder nach Einwirkung des Kriechens des Betons wieder in seine alte Lage zurückzubringen.

Man muß gerechterweise anerkennen, daß der Dreigelenkbogen bis zu Spannweiten von  $100 \text{ m}$  interessante Lösungen aufweist. Eine der letzten Anwendungen erfolgte bei zwei Brücken von  $97,00 \text{ m}$  Spannweite und  $9,00 \text{ m}$  Stichhöhe über die Meuse nach Plänen der Société Charles Rabut et Cie. (Fig. 17 und 18).

Der Entwurfsbearbeiter hat mit Recht den Vorteil ausgenutzt, den ein unter der Fahrbahn angeordneter Bogen bietet. Die Fahrbahnplatte dient beiderseits des Scheitels bis zu jenem Punkt als Druckplatte, von wo aus sich sowohl vom wirtschaftlichen als vom Standpunkt der Schönheit aus die Verwendung aufgelöster Tragwände und Begrenzung der Steghöhe empfiehlt. Von da ab haben die Bögen eine der Krümmung folgende eigene Druckplatte.

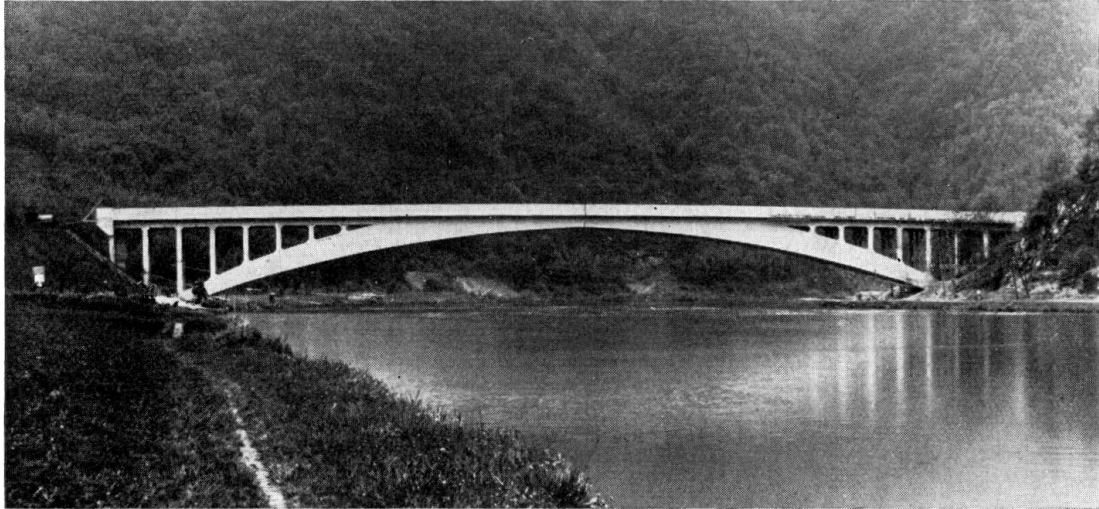


Fig. 17.

Dreigelenkbogenbrücke von 97,00 m Stützweite über die Maas in Laifour.

Der Entwurfsbearbeiter hat seiner Meinung nach auf diese Weise die Standfestigkeit des Bogens, dessen Höhe im Viertelpunkt 3,50 m, d. h. ungefähr  $\frac{1}{28}$  der Spannweite ist, vergrößert. Er hat sich damit vor der Unbestimmtheit der Lage der Stützkräfte innerhalb der Bogendicke von 0,42 m, die er ihm in den Gelenken geben mußte, gesichert.

Für die zusätzliche Senkung aus den Einwirkungen der von uns besprochenen Erscheinungen wurde eine Überhöhung von 0,15 m vorgesehen.

Es ist interessant, für das Dreigelenkbogensystem einen Entwurf anzuführen, der mit parabolischen Fachwerkbalken große Spannweiten zu überwinden hofft.

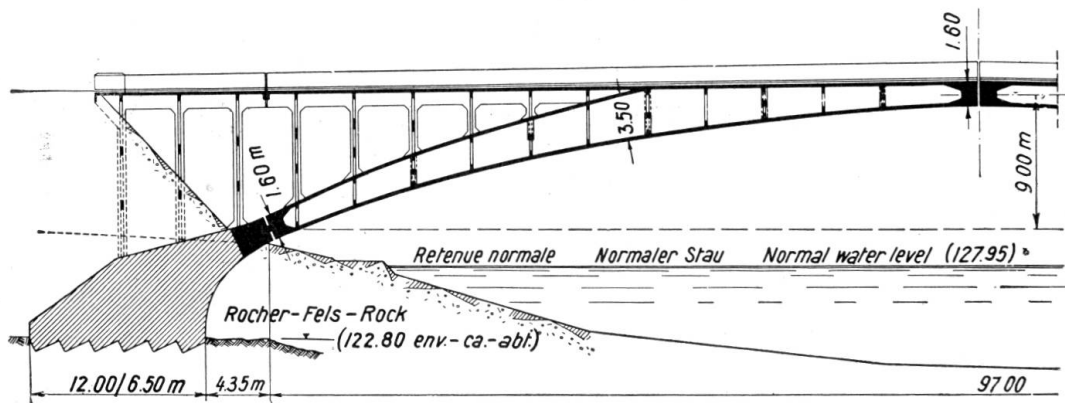


Fig. 18.

Brücke bei Laifour. Längsschnitt.

Dies wird durch die Verminderung, ja selbst die Aufhebung der Zuggurtbeanspruchung ermöglicht, und zwar durch Neigung der Stützkkräfte mit Hilfe einer unter der Fahrbahn befindlichen Pendelstütze (Fig. 19). Die drei Gelenke befinden sich in A, B und C.

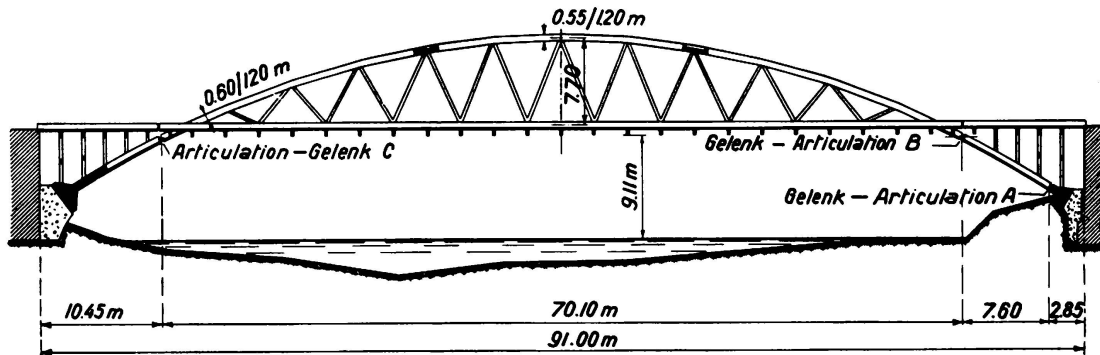


Fig. 19.

Brücke von 91,00 m Stützweite über den Lot bei Port d'Agres.  
Drei Gelenke unter der Fahrbahn.

Die Pendelstütze A—B legt genau die Richtung der Stützkraft auf der einen Seite und damit auch auf der gegenüberliegenden Seite fest. Der parabolische Balken wird ebenso behandelt wie ein Balken mit senkrechter Stützkraft nur mit dem Unterschied, daß die Kraft im Zuggurt durch einen Schub auf die Kämpfer ersetzt wird. Die durch die senkrechte Komponente der Auflagerkräfte bestimmten Kräfte in den Streben sind die gleichen.

Die erste Anwendung dieses Vorschlages haben wir im Jahre 1925 beim Entwurf der Brücke von 91,00 m Spannweite über den Lot bei Port-d'Agres gemacht, deren allgemeine Anordnung Bild 19 wiedergibt. (Génie Civil vom 18. Februar 1928).

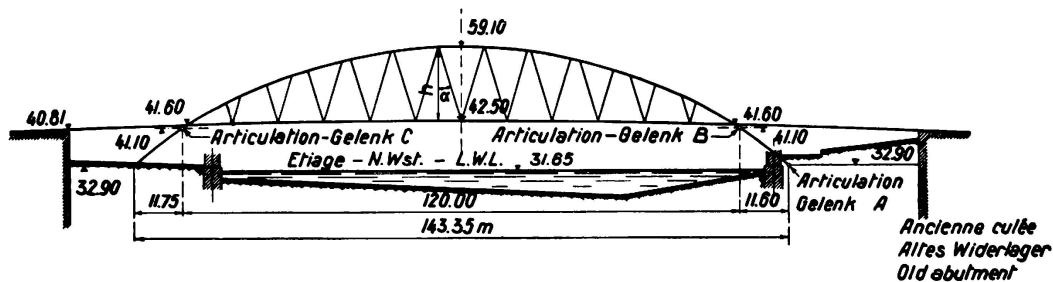


Fig. 20.

Brücke von 143,00 m Stützweite über den Lot bei Castelmoron.  
Drei Gelenke unter der Fahrbahn.

Die Firma Christiani & Nielsen hat vor kurzem eine noch bedeutendere Ausführung über eine Spannweite von 143,0 m über denselben Fluß bei Castelmoron (Fig. 20) gemacht, mit dem Unterschied, daß die Hängestreben nicht ummantelt sind.

Die Aufhängung der Fahrbahn am Obergurt durch Streben verursacht in denselben Zugspannungen, die bei der ungünstigsten Stellung der Verkehrslast von Druckspannungen überlagert werden.

Die Konstrukteure schreiben nun, daß bei der Brücke von Castelmoron die Zugspannung immer vorherrschend ist, so daß niemals irgendeine Strebe ausfällt.

Bei der Brücke von Port-d'Agrès ist fast in allen Streben eine Druckspannung vorhanden, deren Wert jedoch so klein ist, daß jede Knickgefahr ausgeschlossen blieb.

Das Vorherrschen der Zugspannung muß in starkem Maße mit der Vergrößerung der Spannweite verschwinden, weil die Druckspannung infolge der Nutzlasten der Spannweite proportional ist, während die Zugspannung infolge der Fahrbahnlasten nahezu konstant bleibt.

Die Umhüllung langer Hängestreben zur Erzielung ihrer Druckfestigkeit, sowie die zur Vermeidung des Ausknickens notwendigen Vorkehrungen bereiten Erschwerungen, welche es als sicher erscheinen lassen, daß die parabelförmigen Träger für große Spannweiten nicht die wirtschaftlichste Lösung sind.

Oberhalb einer gewissen Grenze muß man sie aus einem bestimmten Grund verwerfen. Da die Hängestreben eine große Länge haben und einen kleinen Winkel miteinander einschließen, weil ja die Grundlinie der Dreiecksteilung durch die Spannweite der Längsträger begrenzt ist, rufen die Verlängerungen und Verkürzungen dieser Stangen unter dem Einfluß der Nutzlasten Verformungen hervor, denen Obergurt und Fahrbahn schlecht folgen können. Die dadurch entstehenden Biegemomente sind so groß, daß man für Spannweiten von 150 m, wenn nicht schon früher, dem in sich stabilen Bogen ohne die dreieckförmige Verbindung mit der Fahrbahn den Vorzug geben wird.

Im Hinblick auf den hohen Grad der inneren statischen Unbestimmtheit, der dem System anhaftet, haben die Konstrukteure der Brücke von Castelmoron dafür Sorge getragen, daß eine der beiden Hängestreben jedes Knotenpunktes infolge von Druckspannungen wirkungslos werden kann. Die Verwendung der in Spannung bleibenden schrägen Hängestangen ist interessant, wenn sie sich mit den ästhetischen Forderungen verträgt. Die Momente eines Bogens mit senkrechten Hängestangen werden um das Moment  $\frac{P \cdot h}{\operatorname{tg} \alpha}$  der Horizontalkomponente verringert (Fig. 20).

## ZWEITER TEIL.

### Bauausführung.

Man beschäftigt sich in steigendem Maße mit dem Studium von Verfahren für Bauausführungen großer Bogenbrücken und in erster Linie mit den Lehrgerüsten, für die man, ohne die Sicherheit zu gefährden, wirtschaftliche Ausführungen finden muß, wenn die Wahl des Eisenbetons eine gute Lösung sein soll.

In einem ersten Kapitel machen wir Angaben über kürzlich verwendete Lehrgerüste und beschreiben das bei Roche-Guyon angewandte Lehrgerüst wegen seiner Neuartigkeit ziemlich ausführlich.

Im zweiten Kapitel beschreiben wir kurz, die in der letzten Zeit verwendeten Verfahren in der Bauausführung.

## I. KAPITEL.

*Lehrgerüste.*

Schon immer haben die Brückenbauer das Lehrgerüst, auf welchem die Bauelemente bis zur Erlangung ihrer Tragfähigkeit aufrufen, wie ein Kunstwerk zu behandeln getrachtet.

Für Brücken in Mauerwerk gibt es eine Fülle von Beispielen, in denen viel Wissen und Kunstfertigkeit für das Lehrgerüst verwandt wurde.

In gleicher Weise muß dies bei der Lösung großer Probleme mit Hilfe des Eisenbetons, der den Mauerwerksbau abgelöst hat, der Fall sein.

Trotz der Größe des Bauwerkes wird man in der Geschichte der Baukunst bei der Erwähnung der Brücke von Plougastel niemals das Lehrgerüst vergessen, welches zu ihrer Errichtung gedient hat. Die Ingenieure werden es immer für eines der besten Beispiele für die Anwendung der Hilfsmittel halten, welche die Natur uns bietet, und ferner für die Vorteile, die ein geschickter Konstrukteur aus den uns sonst feindlichen Elementen ziehen kann.

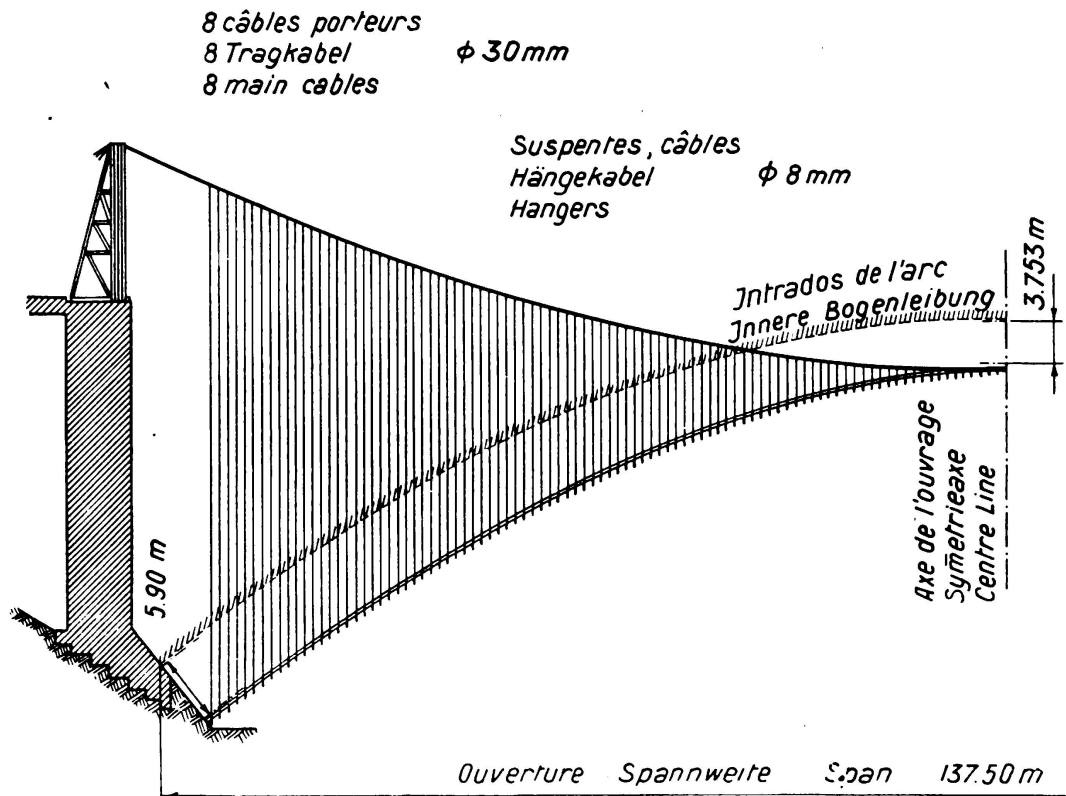


Fig. 21.

La Caille-Brücke, 137,50 m Spannweite. Aufstellung des Lehrgerüsts mit Tragkabeln.

Diejenigen, die das gleiche Projekt zu bearbeiten hatten, waren von der Gezeitschwankung in dieser Flußöffnung und der scheinbaren Unmöglichkeit, eine Unterstützung zwischen den beiden nahezu 600 m voneinander entfernten Flußufern zu schaffen, beeindruckt worden. Und doch hat die Woge, durch den Chef gemeistert, bereitwilligst dreimal das 150 m weitgespannte Lehrgerüst bei Flut getragen und bei Ebbe wieder auf seine Widerlager abgesetzt.

Gewiß waren zur Nutzung so großer Naturkräfte gewaltige und kostspielige Einrichtungen notwendig, aber sie rechtfertigen sich durch ihre dreimalige



Benutzbarkeit. Schwierige, aber fein durchdachte Bauvorgänge waren auszuführen, mußte man doch auf alles im Voraus Bedacht nehmen, um in dem durch Gezeitenwechsel streng vorgeschriebenen Zeitabschnitt erfolgreich arbeiten zu können. Aber die Firma Limousin hatte durch die Anwendung der Verfahren *Freyssinets* schon manches Mal bewiesen, daß sie keineswegs in der Bewältigung schwierigster Konstruktionsprobleme zögerte.

Auch die Verhältnisse bei der Pont de la Caille genannten Brücke von Usse (Hoch-Savoyen) verdienen, daß man die Sonderanordnungen für das Lehrgerüst studiert. Die ungefähr 150 m tiefe Schlucht bot keine Möglichkeit zur Auflagerung der Joche des Lehrgerüsts, wodurch sich eine lichte Öffnung von 140 m ergab.

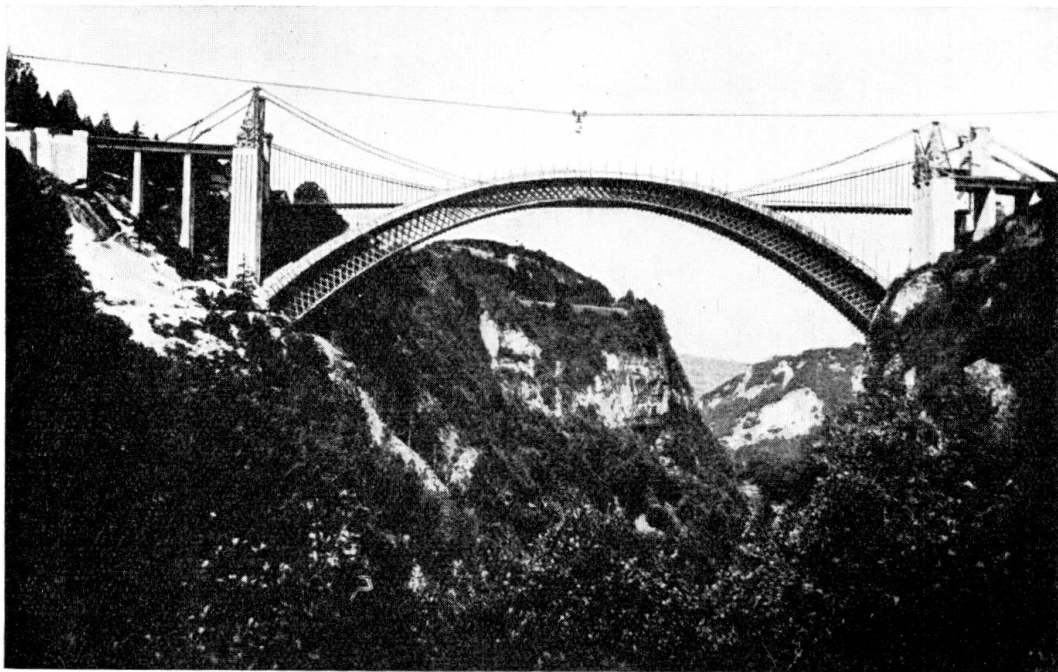


Fig. 22.

La Caille-Brücke.

Die von dem Ingenieur *Caquot* gewählte Lösung stellt ein wertvolles Verfahren zum Bau von Lehrgerüsten über freie Öffnungen mit Hilfe von Hängenkabeln dar (Fig. 21 und 22).

Gleich nach der Zusammensetzung der ersten Tragwerksteile kann mit der Verstärkung des Lehrbogens in jedem gewünschten Maße begonnen werden, um ihn für die Abstützung des ersten Betonringes instandzusetzen, ähnlich wie es eine Holzbrücke tun würde. Die notwendige Steifigkeit wird durch Vergitterung der Tragwerksteile untereinander erreicht.

Diese Lösung ist eine gute Anwendung der Hängebrücken für den Bau der Lehrgerüste für große Tragwerke; wir haben den Eindruck, daß sie immer für große Spannweiten, die der Eisenbeton berechtigterweise anstrebt, eine gute Lösung darstellt.

Bei Roche-Guyon wurden wir beim Studium des Lehrgerüsts zu den gleichen Schlußfolgerungen geführt. Schon die Spannweite von 161 m ist die größte, die

jemals mit Hilfe eines Bogens mit angehängter Fahrbahn überbrückt worden ist. Und dieser Typ wird immer in Frage kommen, wenn es sich um die Überbrückung großer Flüsse handelt, denn man wird selten unter der Fahrbahn das Pfeilverhältnis für einen großen Bogen unterbringen.

Es wäre nicht gerechtfertigt gewesen, auf Gründungen im Flusse zu verzichten. Wir fanden die von uns angestrebte günstigste Lösung, indem wir nur drei Brückenjoche im Flußbett in einem Achsabstand von 43,0 m vorsahen.

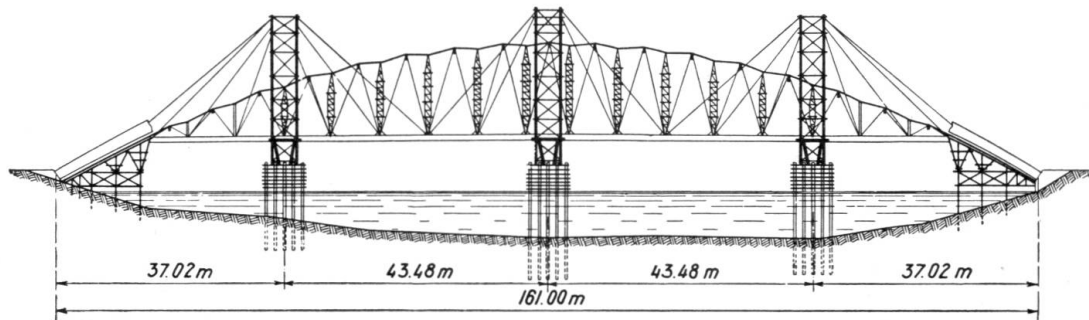


Fig. 23.

Brücke bei La Roche-Guyon. Schema des Arbeitsgerüsts.

Wir beabsichtigten zuerst, daß diese Joche nur zum Tragen der Eigengewichtslasten der horizontalen Plattform des Lehrgerüsts und des Lehrbogens dienen sollten, die ihrerseits nach erfolgter Montage zusammen das Gewicht des Betonbogens allein tragen (Fig. 23 und 24). Doch wollten wir diese Gedanken bei der ersten Ausführung über den größten schiffbaren Fluß Frankreichs ohne

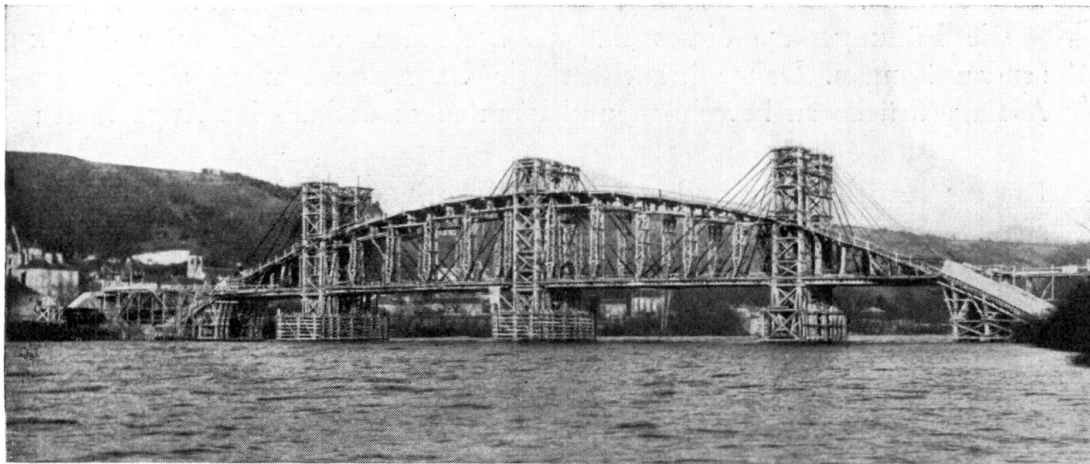


Fig. 24.

Brücke bei la Roche-Guyon. Gesamtansicht des Lehrgerüsts.

vorherige Prüfung ihrer Durchführbarkeit nicht anwenden und haben deshalb die Unterrüstung für die Aufnahme der Gesamtlast berechnet, für den Fall, daß irgendwelche Umstände dies erforderlich machen sollten.

Der Bauvorgang war folgender:

Montage der Joche.

Vorschieben der horizontalen Plattform unter Verwendung von schrägen Zugseilen, gleichzeitig nach beiden Seiten der Joche, und zwar unterhalb der später zu errichtenden Fahrbahn.

Montage des Lehrbogens auf dieser Plattform.

Vorher waren die Anläufe der Bögen bis über die Fahrbahn mit Hilfe nebeneinanderstehender Stützen von geringer Höhe über der Böschung hergestellt worden.

Eine wesentliche Bedingung für die Ausführung leichter Bögen, deren Dicke kaum  $\frac{1}{80}$  der Spannweite beträgt, besteht in der peinlich genauen Einmessung der Mittellinie und in der Sicherheit, daß sie sich während der Betonierung nicht verlagern kann.

Es genügte nicht, wie *Caquot* es bei der Brücke von Usses getan hat, die Stöße der Kranzhölzer mit Zementmörtel zu verfüllen. Man muß außerdem vorher die Zusammendrückung des Holzes und das Einfressen der Verbindungen erzeugen. Diese Zusammendrückung wurde mit Hilfe von im Scheitel angesetzten Pressen ausgeführt.

Das Eigengewicht der Plattform und des mit ihr verbundenen Lehrbogens würde es gestatten, einen Horizontalschub von 280 t auszuüben. Wir haben diesem Horizontalschub eine Größe von 170 t zugewiesen, um den Lasten ein Übergewicht zu verleihen, das jegliche Störung des Lehrgerüsts verhindert.

Die Wirkung dieses Horizontalschubes ist in verschiedener Hinsicht vorteilhaft:

- a) Er erzeugt Druckkräfte in den Kranzhölzern, welche die Biegungszugspannung infolge der beträchtlichen Windkräfte übertreffen. Wir haben daher den Lehrbogen wie einen Balken von 130 m Spannweite zwischen den Anschnitten der Bogen an der Plattform berechnen können, unterhalb welcher die volle Eisenbetonscheibe als Windverband wirkt.

Die Füllungsstäbe dieses Balkens bestanden aus sich unter  $45^\circ$  kreuzenden Zangen. Daher brauchten wir die Pylonen nicht auf waagrechte Auflagerdrücke zu berechnen und konnten es deshalb ins Auge fassen, sie leichter zu gestalten, wenn nicht gar zu beseitigen.

- b) Die den Lehrbogen mit der Fahrbahn verbindenden Streben erhalten Zugspannungen nach Maßgabe des Gewichtes der Fahrbahn, welches der eingeführte Horizontalschub zu tragen vermag. Die Fig. 25 zeigt, daß durch die ergänzenden Streben ein parabolischer Balken von 130 m Spannweite entsteht. Sie bestehen aus Rundeisen, um dem Wind die kleinstmögliche Angriffsfläche zu bieten; das Fehlen der geringsten Knicksteifigkeit fordert, daß sie immer Zugkräften unterliegen, ferner daß die Anfangsspannungen immer größer sind als die durch ungleichen Betonierungsvorgang entstehenden Druckspannungen. Meist wird der Anteil der zu tragenden Fahrbahnlast genügen; wenn erforderlich, versieht man diese noch mit Ballast.

Aus Gründen der Vorsicht, die wir, wie schon geschildert, für eine erstmalige Ausführung als angebracht erachteten, haben wir alle 8,00 m zusätzliche Stützen eingebaut. Diese können, falls erforderlich, die gesamte Last tragen und sie an die von den Pylonen ausgehenden Hängeseile abgeben. Die Vorpressung gestattet, die Zahl dieser Stützen, und damit die windbeaufschlagte Fläche, zu vermindern. Die Kranzhölzer haben eine gebrochene Linienführung und bilden

auspringende Winkel in der Mitte zwischen zwei Stützen. Die Vorpressung verursacht nach oben gerichtete Kräfte, die größer als das Bogengewicht von 5000 kg/lfdm sind.

Der einspringende Winkel über den Stützen bedingt eine gleichmäßige Druckkraft, die eine Verstärkung der Stützen erfordert. Die Verstärkung war jedoch vorteilhafter als eine Verdopplung der Zahl der Stützen mit all ihrem Strebenwerk. Diese hätten dem Wind eine große Angriffsfläche geboten und es wäre bei einer Höhe von 40 m über dem Einspannpunkt zu schwierig geworden, die Standfestigkeit gegen die horizontalen Kräfte herzustellen.

Durch die erwähnte Anordnung wurde die Spannweite der Kranzhölzer von 8,00 m auf 4,00 m verringert. Wir konnten diese Bauteile daher in gangbaren Größen ohne Benutzung zusammengesetzter Balken ausführen, die in Hinsicht auf den Windangriff den gleichen Nachteil gehabt hätten, wie die Vermehrung der Stützen.

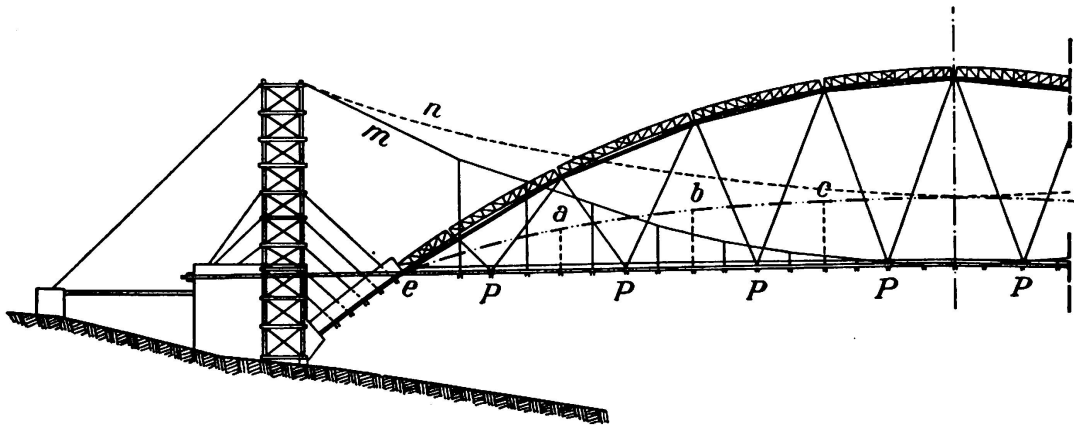


Fig. 25.

Erstellung des Lehrgerüsts mit Tragkabeln.

Unsere Vorüberlegungen wurden gut bestätigt:

Lehrbogen, Fahrbahn und Streben hatten zusammen die Tragwirkung eines Balkens von 130 m Spannweite. Die größte während des Betonierens beobachtete Durchsenkung betrug 8 mm; und dabei hatten wir uns noch von dem Brauch befreit, den Bogen in gleichmäßig über den Bogen verteilten Elementen zu betonieren. Wir begannen mit dem Betonieren auf beiden Seiten außen und haben laufend gegen den Scheitel zu gearbeitet. Es wird betont, daß wir in aufeinanderfolgenden Abschnitten betoniert haben, wie wir noch später sehen werden.

Ein weiterer Vorteil der Anordnung von Pressen im Scheitel des Lehrbogens liegt in der leichten Ausrüstung durch Nachlassen der Pressen.

Die Ergebnisse dieser ersten Ausführung zeigen, daß es möglich wäre, wie wir es ursprünglich beabsichtigten, bei großen Spannweiten die Zahl der Joche zu verringern, ja selbst ihre völlige Unterdrückung in Erwägung zu ziehen, wenn die örtlichen Verhältnisse dies gestatten.

Schon die Brücke von Caille ist, wie wir gezeigt haben, das Beispiel eines solchen Verzichtes, wobei für die Montage ein Kabel verwendet wurde. Wenn dieses Verfahren die Errichtung zu hoher Pylonen über den Flußufern bedingt, kann die Montage des Lehrbogens auch mit einem geringeren Stich, etwa der

punktierten Linie der Fig. 25 entsprechend, durchgeführt werden, und zwar entweder mit einer an einem Kabel m hängenden Plattform oder mit Hilfe eines besonderen Kabels n. Dann wird der Lehrbogen mit Hilfe von in den äußeren Punkten e angesetzten Pressen gehoben. Während dieses Hochhebens, das durch die Gelenke a, b und c ermöglicht wird, liefert das Gewicht der Fahrbahn die notwendige Festigkeit und erhält damit die Form des Lehrbogens. Es genügt, die Bewegung dieser Gelenkpunkte a, b und c im Verhältnis der Größe der Ordinaten des Lehrbogens zu regeln. Wir wollen nicht weiter auf diesen Punkt eingehen, der in das Gebiet der Mechanik fällt und für den uns mehrere Lösungen brauchbar erscheinen.

Bei einer Brücke mit oberliegender Fahrbahn kann die Regelung der Bewegung der gleichen Punkte durch Verankerungen im Talboden oder Flußbett vorgenommen werden.

Während der Montage müssen die Druckkräfte im Lehrbogen immer genügend groß sein, um die Windkräfte aufnehmen zu können. Wenn nötig, müssen hierzu die Lasten P vergrößert werden.

Nach beendigter Montage heben die zur Verstärkung des Lehrbogens einzubauenden Streben die Gelenkwirkung in den Punkten a, b und c auf.

Die Ausführung bei Roche-Guyon hat bewiesen, daß man diese Gedanken mit aller Sicherheit verwirklichen kann. Wir sind der Überzeugung, daß große standfeste Lehrbogen wirtschaftlich durchgebildet werden können. Damit eröffnet sich ein weites Blickfeld für den Bau großer Eisenbetontragwerke.

## II. KAPITEL.

### *Bauverfahren.*

Wir behandeln hier nur jene Verfahren, die zur Ausführung von großen Spannweiten wichtig sind und die im Zusammenhang mit dem Lehrgerüst stehen. Dagegen beschäftigen wir uns nicht mit den Vervollkommnungen der Eisenverlegung und Betoneinbringung, welche in gleicher Weise auch für alle anderen Bauwerke gelten.

Sowohl aus Gründen der Wirtschaftlichkeit als auch der Sicherheit sollten die Lehrbögen nur fortschreitend belastet werden und zwar so, daß sie durch die Festigkeit der zuerst ausgeführten Lamellen unterstützt werden. Seit langem, wenn nicht schon immer, werden Mauerwerksbrücken durch aufeinanderfolgendes Mauern der Wölbringe errichtet. Die geringen zulässigen Spannungen dieses Baustoffes gestatten, die Spannungserhöhung in den unteren Ringen infolge des Gewichtes der oberen Wölbringe zu vernachlässigen.

Die Brücke von Caille mit ihrer Spannweite von 140 m ist ein großartiges Beispiel für dieses Verfahren, denn es bedeutet schon viel, einen Lehrbogen dieser Spannweite für nahezu 13 t/lfdm Belastung zu entwerfen und es war besser den Boden des kastenförmigen Balkenquerschnitts, der den ersten Ring bildet, zur Tragwirkung heranzuziehen. Um Spannungserhöhungen auszuschließen, haben die Konstrukteure einen sehr sinnreichen Gedanken des Obergeringieurs *Baticle* angewandt. Der Beton wurde zwischen 0,18 m dicke, vorher hergestellte Eisenbetonformsteine gegossen, deren Kubatur ungefähr ein Drittel der Gesamtmasse betrug. Da in jedem Wölbring nur der gegossene Beton dem Schwinden unterworfen ist, während die Betonsteine bereits geschwunden waren, genügte es,

diese in den drei Ringen derartig zu verteilen, daß die Unterschiede in den Längenänderungen der Betonringe Winkeldrehungen hervorrufen, welche die untere Laibung entlasten. Dieses Verfahren bedarf einer genauen Berechnung und ist sehr wirksam gewesen. Es sind keinerlei Störungserscheinungen an dieser zudem unbewehrten Betonmasse festgestellt worden.

*Freyssinet* hat bei der Brücke von Plougastel die gleiche Betonierung in Wölbringen angewandt. Die Kompensation wurde durch das Ansetzen von Pressen im Scheitel nach dem Ausrüsten jedes Bogens durchgeführt. Die auszuübende Zusammendrückung wird auf Grund einer Schätzung der Lastverteilung auf das Lehrgerüst und den ersten Betonring ermittelt.

Alle, die sich mit dem Studium noch weitergehender Pläne befassen — und wir hören von Spannweiten von 300 m und mehr, welche im Eisenbeton Spannungen hervorrufen, denen man beim heutigen Stande der Zementherstellung und -verwendung ruhig entgegensehen kann, müssen die Kosten des Lehrgerüsts beschränken, wenn sie mit anderen Ausführungen, im besonderen den Hängebrücken, in Wettbewerb treten wollen. Ohne die Verdienste der Fachmänner dieser Konstruktionen verkennen zu wollen, wird man anerkennen müssen, daß der Eisenbeton die vorteilhafteste Ausführung darstellt, wenn die örtlichen Verhältnisse die leichte Aufnahme des Horizontalschubes gestatten. Nach unserer Meinung wird dies aber nur durch Unterteilung der Ausführung der großen Bogen in einzelne Abschnitte möglich sein, wobei das Gewicht pro laufenden Meter auf jenes Maß verringert wird, das in Hinblick auf die Notwendigkeit der sicheren Haftung zwischen den Teilstücken und auf die Eigensteifigkeit bis zur gegenseitigen Verbindung noch vertretbar ist. Wir verstehen darunter nicht nur eine Auflösung in einzelne Wölbringe sondern auch durch Vertikalschnitte. Der letztere Fall soll besonders der Unterteilung von Gliedern großer Breite dienen, sowohl bei vollwandigen als auch bei gegliederten Bogen, vorausgesetzt, daß die Querschnittshöhe diese letztere Ausführungsform rechtfertigt.

Falls man in einzelnen Wölbringen arbeitet, verfährt man so, daß man diese mit Hilfe von Pressen gleichzeitig mit der fortschreitenden Ausrüstung in Spannung setzt (erst Wölbring 1, dann 1 und 2, dann 1, 2 und 3 u. ff.). Auf diese Weise führt man zusätzliche Kräfte ein, die man aber nach vollkommener Ausrüstung ausgleichen kann, wie wir es bei der Brücke bei Roche-Guyon getan haben.

Die Ausführung mit senkrechten Unterteilungen erfordert diesen Ausgleich nicht. Bei Roche-Guyon haben wir mit Erfolg Meßeinrichtungen benutzt (feste Marken und Spindeln), um die Einwirkungen der Betonierung in Wölbringen und die Wirksamkeit des vorgenommenen Ausgleichs zu prüfen.

Dies war im Hinblick auf eine allgemeine Anwendung dieses Verfahrens bei großen Spannweiten notwendig und etwa keineswegs überflüssig, da es sich um „leichte“ Bogen von geringer Querschnittshöhe handelte, für die eine Verlagerung der Stützlinie eine beträchtliche Erhöhung der ohnehin schon hohen Spannungen bedingt hätte.

Man beobachtete also bei jeder Teilausrüstung die durch die Pressen erzeugten Kräfte und die Bewegungen des Bogens. Bei der Schlußausrüstung hat man schließlich das richtige Gleichgewicht der Kräfte des freien Bogens hergestellt, indem man einen derartig außermittigen Horizontalschub einführte, daß die Ver-

lagerung der Stützlinie zu Null wurde. So erhielt man den „Neutralzustand“ des Bogens (ohne merkbare Biegemomente), d. h. den Zustand, in dem alle durch die gegenseitige Wechselwirkung der getrennt belasteten Wölbringe entstandenen inneren Momente genau ausgeglichen sind; wir konnten eine völlige Übereinstimmung mit den Berechnungen feststellen. Weiter zeigte sich, mit welcher Genauigkeit dieses Verfahren durchgeführt werden kann. Denn wenn man erst einmal den „Neutralzustand“ erreicht hat, genügt die Einführung eines zusätzlichen Horizontalschubes von nur 1 t im Schwerpunkt des Scheitelquerschnitts, um eine Öffnung der Fuge von 14,4 mm und ein Steigen des Scheitels von 29 mm zu erreichen.

Bei allen diesen Arbeiten hat sich das Elastizitätsmaß eindeutig ergeben; es wurde zu  $2,10 \div 2,20 \cdot 10^6 \text{ t/m}^2$  gefunden, und deckt sich mit den bei Oued Chiffa erhaltenen Ergebnissen.

Für die Brücke bei Castelmoron, von der weiter oben die Rede gewesen ist, hat Generalinspekteur *Mesnager* (†), beratender Ingenieur der Firma Christiani & Nielsen, auf eine andere Art die Entlastung des Lehrbogens erreicht.

Der Betonierung des parabolischen Balkens ging das Verlegen von vorher hergestellten Einzelelementen eines Kernes auf dem Lehrbogen voraus. Für den Scheitelquerschnitt von  $1,00 \times 1,20 \text{ m}$  betrug der Kernquerschnitt  $0,55 \text{ m} \times 0,80 \text{ m}$ .

Wir begreifen, daß die Konstrukteure sich an der Spannungserhöhung, die in diesem Bauteil durch die Last des Betons entsteht, nicht störten, denn die Umschnürung hat ihm eine zusätzliche Festigkeit verliehen. Es ist unbedenklich, daß der Kern eines Querschnitts eine höhere Spannung hat, da er von der ihn umgebenden Masse eingeschnürt wird; übrigens entspricht die Erhöhung der Spannung nicht ganz der Last des Betons, da der Lehrbogen und der Kern zusammen tragen.

### Schlußfolgerungen.

#### 1. Die Materialfestigkeit betreffend:

Selbst beim gegenwärtigen Stand der Zementherstellung und bei den geläufigen Verfahren der Betonbereitung bei Anwendung der Vorschriften für die Kornzusammensetzung und des Rüttelns des Betons kann man bei Eisenbetonbrücken Spannweiten bis zu 800 m ins Auge fassen.

#### 2. Die Berechnung betreffend:

Die neuzeitlichen Verfahren sind genau genug, um längs des ganzen Bogens die größtmögliche Leichtigkeit zu erhalten, die sich mit der Standfestigkeit vereinbaren läßt, für welche ein Schaubild in der Art der Fig. 10 die Größenordnung angibt. Die Standfestigkeit läßt sich leicht prüfen, wenn man die Nutzlast mit einem Vergrößerungsbeiwert, z. B. 2, multipliziert und sich dann vergewissert, daß die Stützlinie im Kern des Querschnitts bleibt, wobei dann die Eisen nur zulässige Spannungen erhalten.

Der Grad der Unbestimmtheit der Elastizitätszahl ist bei Verwendung gerüttelten Betons und bei einer guten Kornzusammensetzung gering.

Dank dem Gesetz der Ähnlichkeit können die Berechnungen sehr schnell durchgeführt werden. Das Herumtasten beim Beginn hat aufgehört, da eine einfache Beziehung die Bestimmung des mittleren Querschnitts unter Zugrundelegung einer zulässigen Spannung gestattet.

### 3. Die Bauausführung betreffend:

Die schwierigste Frage bei der Verwirklichung großer Spannweiten liegt in der Lösung für das Lehrgerüst und für seine Aufstellung. Die Kosten dafür können durch Verringerung der durch das Lehrgerüst aufzunehmenden Lasten in tragbaren Grenzen gehalten werden. Diese Verringerung wird durch das Betonieren in Teilabschnitten erreicht, die nacheinander durch Verwendung von Pressen ausgerüstet werden. Es hat sich bestätigt, daß es möglich ist, die Einwirkung eines Bogenteils auf den darunter liegenden bei einem Vollwandbogen streng auszugleichen. Bei der Betonierung in durch senkrechte Schnitte geteilte Abschnitte, besonders für aufgelöste Bogen, ist dieser Ausgleich nicht notwendig.

4. Der Vergleich des eingespannten Gewölbes mit vom Scheitel zu den Kämpfern abnehmendem Trägheitsmoment mit Gewölben von gleichbleibendem Trägheitsmoment und mit Gewölben mit vom Scheitel zu den Kämpfern wachsendem Trägheitsmoment fällt zu Gunsten des ersteren aus, vor allem bei größeren Pfeilverhältnissen, infolge des kleinen mittleren Querschnittes und der geringeren Beanspruchung der Widerlager.

Die Verwendung statisch bestimmter Systeme für große Spannweiten wird wegen der schwierigen Gelenkausbildung hintangehalten. In Hinblick auf eine durch die Anordnung der Gelenke ermöglichte Sonderform fügen wir hinzu, daß für Spannweiten über 150 m der Aufnahme der Biegemomente durch einen Dreiecksverband zwischen den Bögen und der Fahrbahn keine Bedeutung mehr zukommt. Diese Spannweite sollte durch in sich stabile vollwandige oder gegliederte Bogen überwunden werden.

5. Es ist wirtschaftlich, durch Umschnürung hohe Festigkeiten zu erzielen. Dieser Grundsatz kann für große Spannweiten bis zur äußersten Grenze angewendet werden; die Längsbewehrung wird entsprechend verringert, bzw. auf die Verbindung der Spiralen und Bügel beschränkt. Bei der Brücke von Roche-Guyon ist ihr Prozentsatz schon auf 0,5 verringert worden, während der der Bügel und Spiralen zusammen 1,3 beträgt.

Diese Verringerung zerstört alle Bedenken in Bezug auf die erhöhte Druckbeanspruchung der Bewehrung infolge Schwindens und der noch nicht ganz klargestellten Wirkung der plastischen Verformung des Betons.

Ein weiterer Vorteil der Umschnürung ist die große Gleichmäßigkeit der Festigkeit.



### Zusammenfassung.

Im ersten Teil der Abhandlung arbeitet der Autor die Anordnungen und Berechnungen der großen Eisenbetonbrücken aus. Zahlreiche Einzelheiten sind für die statisch unbestimmten Bogen in Betracht zu ziehen: die Veränderlichkeit der Trägheitsmomente, Wahl des Pfeilverhältnisses, Wahl der Querschnittsform und die Wahl der Spannung. Im Folgenden bearbeitet der Autor die Grenzspannweite von Bogen mit dem Brückenbogen von Roche-Guyon, von welchem er die Resultate der Berechnungen angibt. Er beschreibt weiters einige Dreigelenkbogenbrücken, die in den letzten Jahren in Frankreich ausgeführt worden sind.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Bauausführung und in erster Linie mit den Lehrgerüsten; der Autor gibt als Beispiele diejenigen an, welche bei Roche-Guyon verwendet worden sind. Im Weiteren führt er eingehender die in der letzten Zeit angewandten Verfahren in der Bauausführung an.