

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 111/112 (1938)
Heft: 24

Artikel: Ueber Eisenbeton-Brücken mit Rippenbögen unter Mitwirkung des Aufbaues
Autor: Maillart, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-49961>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 17.01.2026

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

INHALT: Ueber Eisenbeton-Brücken mit Rippenbögen unter Mitwirkung des Aufbaues. — Kavitations- und Tropfenschlagerosion. — Wettbewerb für ein evangel. Kirchgemeindehaus St. Gallen-St. Georgen. — Mitteilungen: Die erste elektrische «Micheline». Die neue «Mauretania». Die Rectaflux-Kondensations-Dampfturbine. Die Versenkung einer Ab-

wasserleitung auf den Meeresgrund. Persönliches. Schweiz. Acetylen-Verein. Kunststipendien. Die neuesten amerikanischen Kleinflugzeuge. — Wettbewerbe: Tribüne für das Stadion St. Jakob in Basel. Absonderungshaus des Bezirkskrankenhauses Uznach. — Mitteilungen der Vereine. — Sitzungs- und Vortrags-Kalender. — An unsere Abonnenten.

Band 112

Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich
Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet

Nr. 24

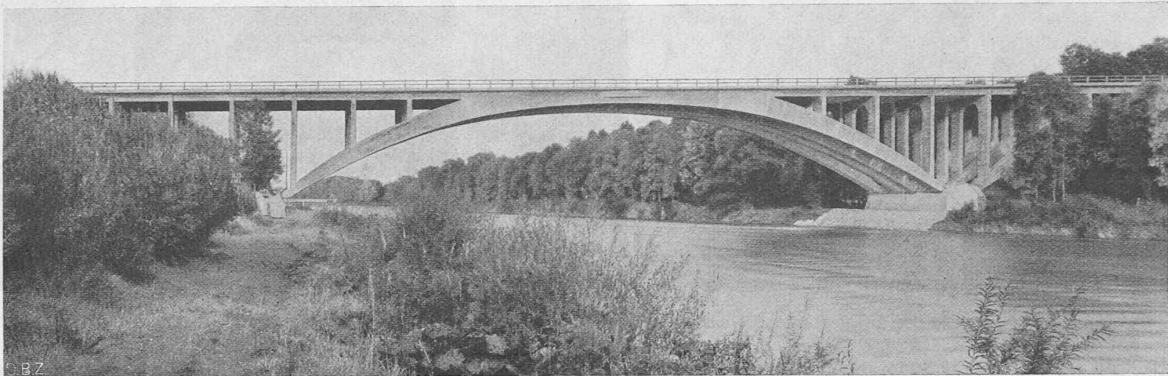


Abb. 1. Brücke über die Donau bei Leipheim, im Zuge der Reichsautobahn Stuttgart-München. Oberste Bauleitung Stuttgart

Ueber Eisenbeton-Brücken mit Rippenbögen unter Mitwirkung des Aufbaues

Von R. MAILLART, Ingenieur

[Ueber «die Mitwirkung des Aufbaues massiver Bogenbrücken» veröffentlicht Prof. Ulrich Fischer (Breslau) in «Beton und Eisen» (Heft 19 vom 5. Okt. d. J.) eine beachtenswerte Entwicklungsübersicht, ausgehend von der von R. Maillart entworfenen und (1903) gebauten Thurbrücke bei Billwil. Jene neuartige Strassenbrücke hatte noch volle Bogenscheiben (vgl. «SBZ», Bd. 44, S. 157*), und bei 35 m Stützweite und 4,0 m Pfeil Gewölbbestärken von 16 cm im Scheitel und 60 cm an den Widerlagern (sie kostete rd. 100 Fr./m² überbrückter Fläche). Als erste derartige Eisenbetonbrücke mit «ausgeschnittenen Bogenscheiben» nennt Fischer die ebenfalls von Maillart gebaute Rheinbrücke bei Tavanasa aus dem Jahre 1905 (Bd. 63, S. 343*; Stützweite 51 m, Pfeil 5,7 m, Baukosten 144 Fr./m²). Als drittes, durch die Mitwirkung der Fahrbahn verwandtes Gebilde nennt Fischer den versteiften Stabbogen, unter Hinweis auf verschiedene von Maillart entworfene und in «SBZ» Bd. 107, S. 157* beschriebene Beispiele¹⁾. Als jüngste Beispiele von Rippenbögen nach Art der Salginatobelbrücke (90 m, Bd. 102, S. 328*) bespricht Fischer die Donaubrücke bei Leipheim der Reichsautobahn und die im Bau begriffene Strassenbrücke bei Backnang, mit 105 m Stützweite die bisher grösste Ausführung. Es sei auf den interessanten Aufsatz verwiesen. Den mehrfach darin enthaltenen anerkennenden Hinweis auf Maillart als Pionier im neuzeitlichen Eisenbeton-Brückenbau finden wir sodann auch in der «Bautechnik» vom 23. Sept. d. J., wo die Donau-

brücke bei Leipheim, als in Anlehnung an die Gedanken Maillarts entstanden, ausführlich beschrieben wird.

Dieser mehrfache Hinweis in der ausländischen Fachpresse auf unsern schweizerischen Kollegen hat uns veranlasst, ihn zu ersuchen, hier über die Leipheimbrücke auszugsweise zu berichten, gleichzeitig über eine ähnliche, vor kurzem von ihm selbst gebaute, die Arvebrücke bei Vessy (Genf) das wichtigste mitzuteilen, und auch einen Vergleich beider zu ziehen. Maillart hat unserm Wunsch entsprochen und berichtet wie folgt. Red.]

I. Die Donaubrücke bei Leipheim im Zuge der Reichsautobahn Stuttgart-München

Für dieses bedeutende, in «Die Bautechnik» vom 23. Sept. d. J. eingehend beschriebene Bauwerk wurde auf Grund je eines Vorprojektes in Eisenbeton und Eisen eine Ausschreibung unter namhaften Unternehmungen Deutschlands vorgenommen, die eine grosse Anzahl eigener Entwürfe zeitigte (in «Bautechnik» ebenfalls dargestellt). Die Prüfung führte zur Ausschaltung der Eisenkonstruktionen sowie der Balken aus Eisenbeton, indem Bogenbrücken aus Eisenbeton als wirtschaftlich und ästhetisch günstiger befunden wurden.

Da der Baugrund aus feinem Sand besteht, was bereits zum Ausschluss steinerner Brücken geführt hatte, war schon als Vorentwurf ein leichter Bau mit Gelenken geplant und alle Entwürfe folgten dieser Begleitung. Sie zeigen Doppelbrücken auf zusammenhängenden Widerlagern. Beide Teile sind im Aufbau vollständig getrennt, also ohne die bei den klassischen Doppel-

brücken Séjournés vorhandene Zwischenkonstruktion²⁾. Dies ist hier zweckmässig infolge der völligen Trennung der beiden Fahrbahnen. Mit einer einzigen Ausnahme, die neben dem über das Flussbett gespannten Hauptbogen kleinere Vorlandöffnungen vorsah, entsprechen die Entwürfe dem Vorentwurf auch hinsichtlich der Pfeilerabstände von 73, 80, 85 und 78 m. Völlig massive Bogen sind nicht vertreten; denn auch ein Rechteckquerschnitt von 8 m Breite der Monierbau A. G. München geht gegen den Scheitel hin in einen Rippenquerschnitt über. Bei diesem Entwurf ist eine vollwandige Ansicht durch dünne Betonplatten erreicht, gleich wie bei einer Anzahl weiterer Entwürfe, die als Tragwerk Bogenrippen benützen. Naturgetreuer ist die Vollwandigkeit bei den

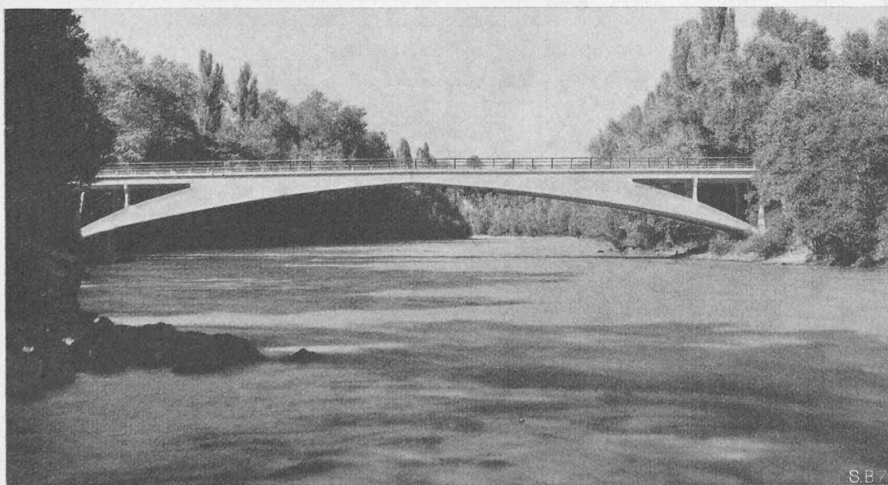


Abb. 9. Brücke über die Arve bei Vessy (Genf), Ing. R. MAILLART (1936/37)

²⁾ Vergleiche z. B. die Pétrusse-Brücke in Luxemburg, «SBZ» Bd. 39, S. 281* (1902); Diskussion der Zwillingsgewölbe Band 58, S. 37* (1911). Red.

¹⁾ Aeltere Beispiele des Maillart'schen Stabbogens finden sich in Bd. 90, S. 172* beschrieben (Val Tschiel und Fliengliabach), ferner die im Grundriss gekrümmte Eisenbahnbrücke bei Klosters in Bd. 96, S. 340* u. Bd. 98, S. 36*.

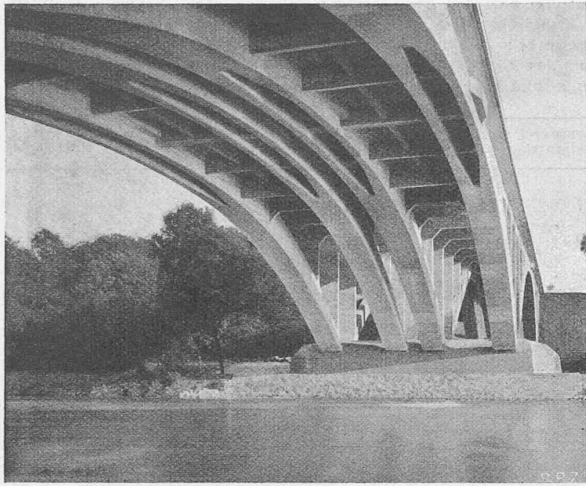


Abb. 2. Untersicht der Donaubrücke bei Leipheim der Deutschen Reichsautobahn. Ausführung WAYSS & FREYTAG

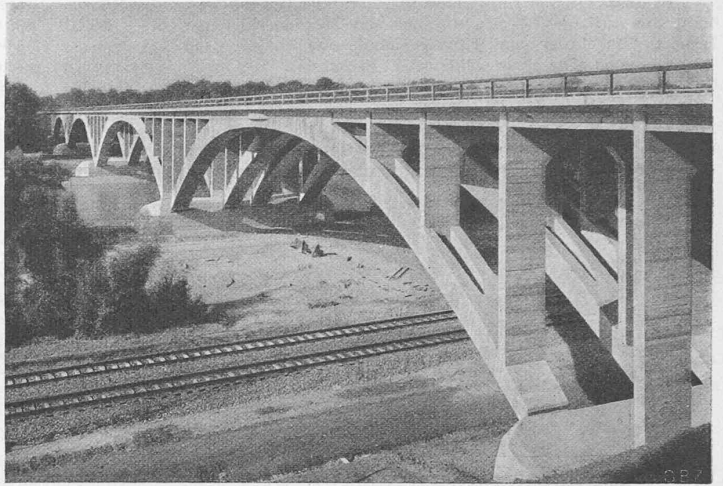




Abb. 3. Streifbild

Entwürfen von Züblin & Cie. und N. B. G. Wayss & Freytag A. G. erreicht, indem als Tragwerk volle Scheiben nach dem Vorbild der Neckarbrücke bei Unterboihingen als Tragwerke angeordnet wurden.

Alle weiteren Entwürfe verzichten auf eine vollwandige Ansicht. Der schon erwähnte Massivbogen zeigt bei Wegfall der Verkleidungshäute das bekannte unbefriedigende Bild, indem sich die leichten Aufbauten gegenüber der Masse des Bogens spielerisch ausnehmen. Entwürfe von Grün & Bilfinger A. G. und Dyckerhoff & Widmann A. G. zeigen die üblichen Tragwerke aus Bogenrippen mit zahlreichen versteifenden Querriegeln. Die Firma N. B. G. Wayss & Freytag allein machte, neben dem schon erwähnten, den Vorschlag, eine untere Bogenplatte mit dem in Scheitelnähe befindlichen Teil der Fahrbahn durch Scheiben zu einem Tragwerk zu vereinigen. Von den Ausführungen, die in der Schweiz seit über 30 Jahren diesen Gedanken verwirklicht haben, weicht der Entwurf insofern ab, als jeder Scheibe nur ein verhältnismässig schmaler Plattenstreifen zugeordnet ist, sodass in den äusseren Vierteln das Tragwerk -förmigen statt -förmigen Querschnitt besitzt. Die dadurch bedingte verhältnismässig geringe Seiten-Steifigkeit machte eine grosse Anzahl durchgehender Querwände nötig, die im Verhältnis zum Haupttragwerk zu schwer wirken.

Die Ausführung des Baues wurde der Verfasserin dieses Entwurfes übertragen auf Grund eines von Dr. Ing. Schächterle

an Hand der Eingaben aufgestellten endgültigen Entwurfes (Abb. 1 bis 8). Der Grundsatz des Entwurfes Wayss & Freytag wird beibehalten, aber der \perp -Querschnitt durch den \perp -Querschnitt ersetzt, der im Kämpfer aus einem Rechteckquerschnitt herauswächst, um gegen den Scheitel hin in einen Kastenquerschnitt und weiter in einen \sqcap -Querschnitt umzukehren, mit einer zwecks Aufnahme des Gelenkes auf 70 cm verstärkten Platte (Abb. 6). Jede Brückenhälfte besitzt zwei derart ausgebildete Tragwerke. Die Querwände sind nur auf Tragwerksbreite durchgehend, womit die Aufbauten in glücklicher Weise aufgelockert sind. Die Wände sind oben durch hohe Riegel verbunden, auf denen die Fahrbahn­längsträger ruhen, wie die Abbildungen 3 und 5 zeigen.

Die innere Leibung der Tragwerke ist die für Gewölbe altgewohnte gleichmässig gekrümmte Bogenlinie. Eine ideale Anpassung der Querschnitte an die Drucklinie ist damit kaum möglich. Während in den Vierteln nach oben beliebiger Spielraum für Querschnittsvergrößerung vorhanden ist, wird er unten durch die gegebene Bogenform eingeschränkt. Um den Viertelquerschnitt trotzdem gut auszunützen, ist es erwünscht, dass die Gelenke tunlichst in den oberen Teil der Querschnitte gerückt werden. Ein symmetrischer Scheitelquerschnitt von der durch die runde Bogenform bedingten Höhe würde damit stark exzentrisch beansprucht, was offenbar den Grund zur Wahl des \square -Querschnittes in diesem Gebiet bildete.

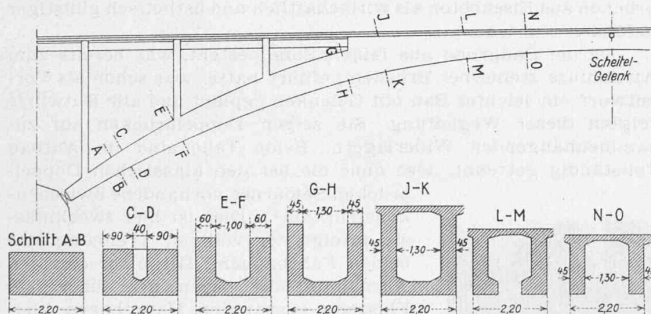


Abb. 6. Querschnitt-Verlauf des Rippenbogens. — 1:200

Abb. 4 bis 8 nach «Bautechnik» 1938, Nr. 40/41

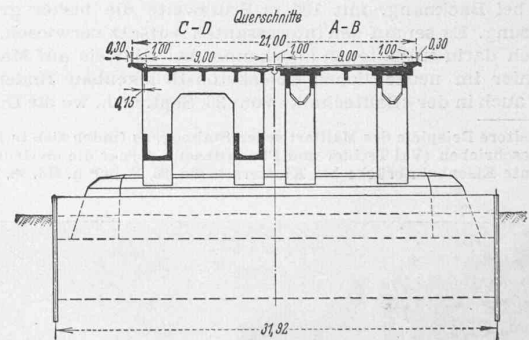


Abb. 5. Querschnitte zu Abb. 4. — 1:500

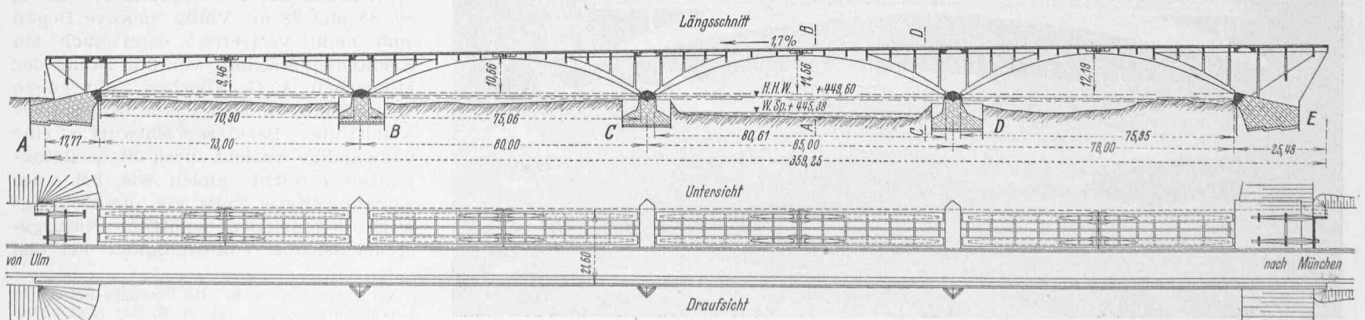


Abb. 4. Donaubrücke bei Leipheim. OBERSTE BAULEITUNG STUTTGART der Reichsautobahn. — Masstab etwa 1:1900



Abb. 10. Strassenbrücke über die Arve bei Vessy, Kanton Genf. Ausführung E. FAVRE

Es sind Wälzgelenke aus Stahl angeordnet worden, die Scheiteltgelenke eingeschachtelt und sorgfältig verdeckt (Abb. 7, S. 290), die Kämpfertgelenke dagegen frei und sichtbar, «sodass die Zusammenschnürung der Kräfte in den Gelenken sinnfällig zum Ausdruck kommt» (Bautechnik). Die Kämpfertgelenke sind ziemlich breiter ausgeführt, als statisch nötig gewesen wäre, wofür schönheitliche Gründe angeführt werden. Die Abdeckung und Dichtung sowohl der mittleren Längsfuge als auch der Quertfugen sind bis ins Feinste durchgearbeitet (Abb. 8, S. 290).

Die Druckbeanspruchung der Tragwerke erreicht 90 kg/cm^2 , wobei die Zementbeimischung von 325 kg/m^3 Festigkeiten bis über 400 kg/cm^2 ergab. An der Oberkante der Rippen errechneten sich Zugspannungen von 23 kg/cm^2 .

Das Lehrgerüst, eine gefällige, gut durchgebildete Konstruktion, ist nur für die Tragwerke berechnet worden in der Absicht, die beidseitigen Aufbauten erst zu erstellen, nachdem das Gerüst abgelenkt war, um es in der Paralleloeffnung ein zweites Mal verwenden zu können. Nachdem das Tragwerk lamellenweise — stets ein Stück Platte mit Rippen zusammen — betoniert und erhärtet war, wurde indes der Aufbau bei noch vorhandenem Gerüst vorgenommen. Als Hauptgrund für diese Umstellung wird angeführt, es sei die zuletzt betonierte Oeffnung noch nicht «ausrüstungsreif» gewesen, sodass mit den Aufbauten sogar in der ersten Oeffnung hätte zugewartet werden müssen. Da nun das Gerüst nicht für die Gesamlast berechnet war, fürchtete man dessen Ueberlastung. Auch den Ausweg, das Gerüst durch teilweise Absenkung zu entlasten, wagte man nicht zu betreten; man behelf sich daher mit künstlicher Belastung der beim Bogenscheitel schon ausgeführten Fahrbahnplatte, wodurch das Gerüst zwar dort eine Mehrsenkung, jedoch gegen die Kämpfer hin eine Entlastung erfuhr, sodass es nun die den Aufbauten entsprechende Mehrlast aufnehmen konnte. Schliesslich wurden die Lehrgerüste alle gleichzeitig abgelassen.

Auf die Fahrbahnplatte kam eine doppelte Gewebeisolierung auf Glattstrichunterlage, darüber eine Dachpappe, eine Asphalt-

schuttschicht und schliesslich Kleinpflästerung, mit Bitumen vergossen, umrandet von 50 cm breiten, mit Gussasphalt auf Beton belegten Streifen. Die Randsteine sind aus Kunststein mit weissem Vorsatz.

Schwierig war die Fundamentierung in dem bis in grosser Tiefe vorhandenen feinen Sand; sie führte auch zu Grundbrüchen. Unter diesen Umständen erschien es nicht angebracht, die von eisernen Spundwänden umschlossenen Fundamente besonders tief zu führen. Dagegen wurde der Baugrund durch später vorgenommene Zementeinpressungen verfestigt. Immerhin erscheinen die Fundamentdrücke von 45 kg/cm^2 für die Widerlager — bei den Pfeilern betragen sie nur $3,4$ bis $3,8 \text{ kg/cm}^2$ — reichlich hoch und rechtfertigen die Anwendung von Gelenkbogen. — Die Ausführung erfolgte in den Jahren 1935/37. Ueber die Baukosten liegen leider keine ziffernmässigen Angaben vor.

Es ist erfreulich, bei diesem Bauwerk ein Abgehen von ausgetretenen Pfaden feststellen zu können. Statt der vom Mauerwerksbau über-

nommenen Anordnung, wonach Gewölbe und Aufbauten statisch als Einheiten mit selbständigem Verhalten ausgebildet werden (ohne dass es möglich ist, die oft schädliche gegenseitige Einwirkung berechnen zu können), ist hier ihre der Natur des Eisenbetons besser entsprechende Verschmelzung mit Erfolg verwirklicht worden.

II. Brücke über die Arve bei Vessy (Kt. Genf)

Schon seit langem beabsichtigten die Besitzer der jenseits der Oertlichkeit «Bout du Monde» an der Arve gelegenen Grundstücke, diese der Behauung zugänglich zu machen. Da ein öffentliches Interesse an dieser Verbindung nur in beschränktem Masse bestand, musste sie grossenteils aus eigenen Mitteln bestritten werden. Demgemäss ist die 1936/37 ausgeführte Bogenbrücke als Kastenträger Bauart Maillart in einfacher und sparsamster Art, jedoch, was die Belastungen anbetrifft, als Brücke I. Klasse ausgeführt worden. Sie besteht aus drei Tragwerken von je 2,1 m Breite mit zwei 1,9 m weiten Zwischenräumen. Starke Querträger und Verbindungsriegel bei den Gelenken bewirken ein gutes Zusammenarbeiten der Tragwerke und der drei Fundamentkörperpaare (Abb. 9 bis 15). Die Dreiteilung auch der Fundamente hat den praktischen Vorteil, dass die schmalen Schlitz für Einbau und Wasserhaltung günstiger sind, als ausgedehnte Baugruben. Aber auch in statischer Hinsicht ist sie vorteilhaft, indem anzunehmen ist, dass schon in ganz geringer Tiefe unter Fundamentsohle dank dem geringen Abstand und der an den Seitenflächen wirkenden Reibung auch die Grundfläche der Zwischenräume sich an der Lastaufnahme voll beteiligt. Bei gleichbleibenden Kantenpressungen in extremen Belastungsfällen wird auch der Aushub- und Betonkubus kleiner, als bei durchgehenden Fundamenten, indem das in der Längsrichtung nötige Widerstandsmoment mit einer kleineren Fundamentfläche erreicht wird. Unter Berücksichtigung aller dieser Umstände wurde der rechnungsmässige Druck auf den guten, kiesig-lehmigen Baugrund zu $3,6 \text{ kg/cm}^2$ im Mittel und zu $5,2 \text{ kg/cm}^2$ im Maximum angenommen.

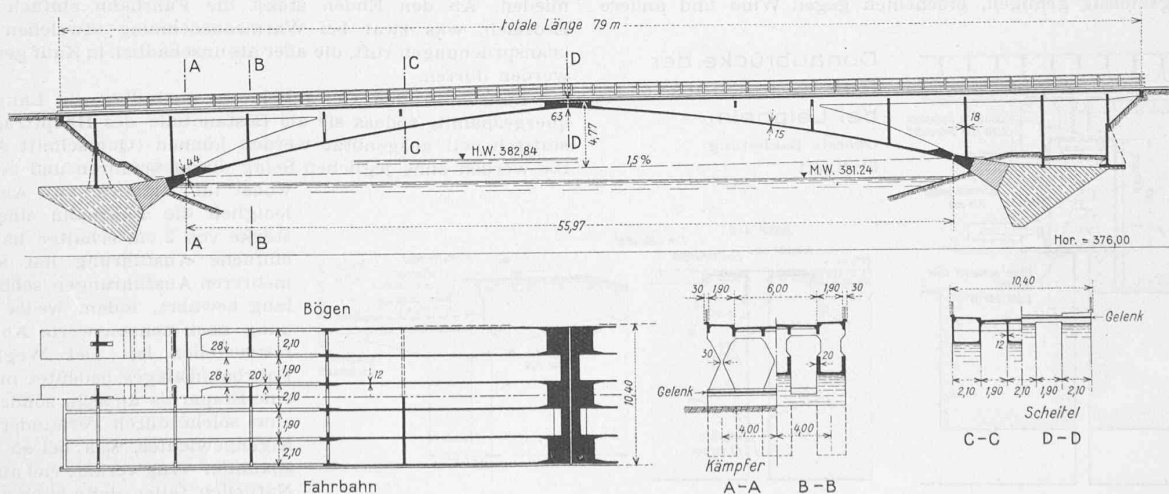


Abb. 11. Arvebrücke bei Vessy (Genf). Entwurf Ing. ROB. MAILLART. — Baukosten (1936/37) rd. 100 Fr./m². — Masstab 1 : 500.

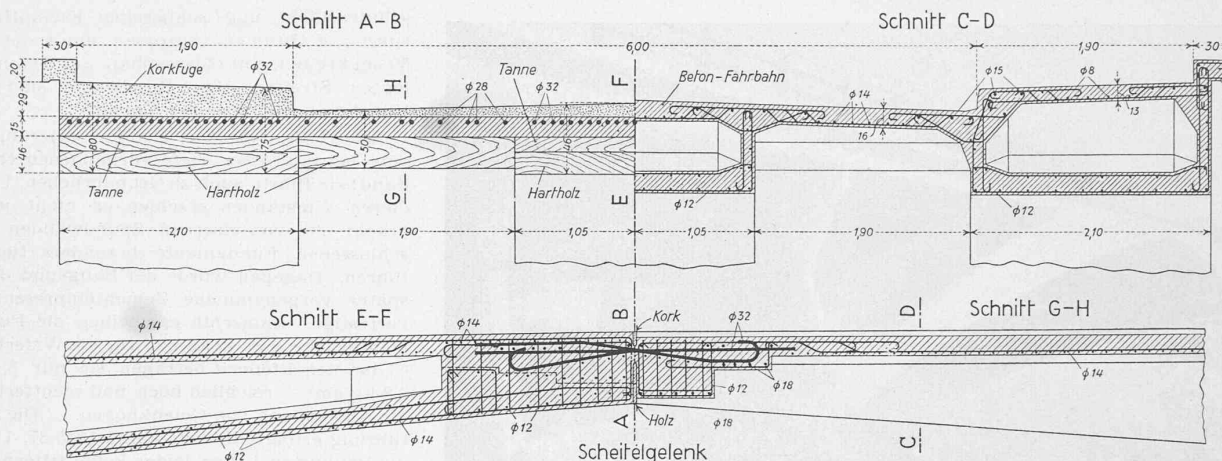


Abb. 12. Arvebrücke bei Vessy von Ing. Rob. Maillart. — Längs- und Querschnitte der Scheitelpartie, 1:60

Die Form der Scheiben ergab sich aus rein statischen Rücksichten: Verminderung der Querschnitte auf das zulässige Minimum bei den Gelenken und starke Spreizung in den Vierteln zur tunlichsten Verminderung des Einflusses der Veränderlichkeit der Lage der Drucklinie sowie der Vibrationen, die sonst bei Bogen mit Gelenken stärker sind, als bei eingespannten. Die Forderung gleichmässiger Randbeanspruchungen bestimmte die Form der Innenleibung, die sich damit als stumpfer Spitzbogen ergibt.

Die grösste Randbeanspruchung beträgt 92 kg/cm^2 , wobei sich nach 28 Tagen Würfelestigkeiten des 350 kg/m^3 Zement enthaltenden Betons von $3 \div 400 \text{ kg/cm}^2$ ergaben. Im Haupttragwerk treten keine Zugspannungen auf. Die Fahrbahnplatte, mit Schlagkies und 400 kg/m^3 Zement erstellt, wurde mit Plattenvibratoren behandelt; die Würfel zeigten hier nach 8 Tagen 363 kg/cm^2 und nach 37 Tagen 564 kg/cm^2 Druckfestigkeit.

Die Funktion der Gelenke braucht dank der Spreizung im Viertel-Querschnitt (was Unempfindlichkeit gegen etwaliche Abweichungen von der rechnerischen Lage der Drucklinie verbürgt) nicht ganz exakt zu sein, sodass einfache Einschnürung der Betonquerschnitte hier genügt (Abb. 12 und 13). Diese Anordnung ist einfach ausführbar, billig, schliesst Unterhaltskosten aus und die etwaliche Hemmung der freien Drehbarkeit wirkt dämpfend auf die Vibrationen. Die durch die Gelenkfuge geführten Eisen genügen zur Aufnahme des ganzen Schubes ohne Ueberschreitung der Quetschgrenze. Um den Druck in den Gelenken zu mildern, erstrecken sie sich auch auf die Zwischenräume, was durch die schon erwähnten Querriegel erreicht wird.

Für die Formgebung der Bauelemente, die die Fahrbahn dort zu tragen haben, wo diese nicht mit den Längswänden verbunden ist (Abb. 11, 13, 15), waren folgende Gesichtspunkte massgebend: Die schmalen Haupttragwerke, wenn sie auch auf Seitenknickung rechnungsmässig genügen, erscheinen gegen Wind und andere

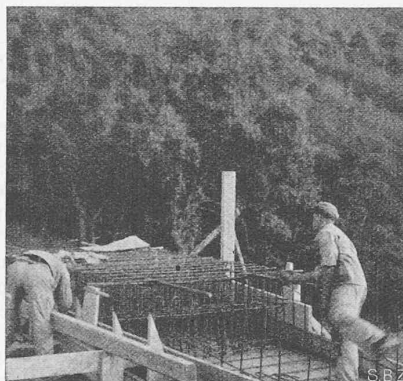


Abb. 14. Armierung im Scheitel

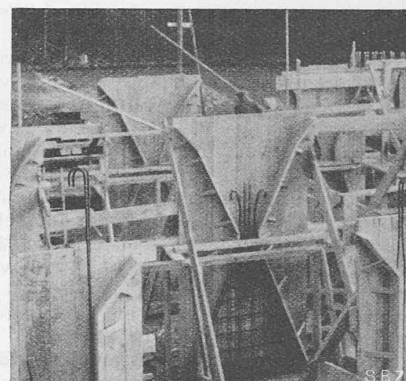


Abb. 15. Armierung der seitlichen Stützen

mögliche Horizontalkräfte empfindlich, während die Fahrbahn eine grosse Quersteifigkeit darbietet. Die Horizontalkräfte gehen sonach in die Fahrbanntafel über und es sind deshalb seitensteife Ständer auf den Widerlagern erwünscht, um diese Kräfte aufzunehmen. Die üblichen Pfeiler mit Riegeln sind dafür nicht zweckmässig, wohl aber Querwände oder Andreaskreuze; die gewählte Konstruktion ist ein Mittelding. Bei weniger Materialaufwand und leichterem Aussehen gegenüber Wänden ist sie noch einfach auszuführen und harmonisiert besser mit den Zwickelflächen der Hauptträger, als gekreuzte Stäbe. Die Einschnürung eignet sich auch gut zur Einschaltung von Gelenken, die eine freie Längsdehnung der Fahrbahn ermöglichen und so die Vermeidung jeglicher Fugen auf die ganze Brückenlänge (mit Ausnahme der Scheitelfuge) gestatten. Der Wegfall aller offenen Fugen ist schon wegen ihrer Kosten für Bau und Unterhaltung willkommen. Auch wird dadurch die direkte Ueberleitung der Seitenkräfte in die Widerlager ermöglicht, also eine Mehrbeanspruchung der äusseren Tragwerke und Kämpfergelenke vermieden. An den Enden stösst die Fahrbahn einfach an das Erdreich, was zwar bei Wärmeausdehnung etwelchen Druckbeanspruchungen ruft, die aber als unschädlich in Kauf genommen werden dürfen.

Fahrbahn- und Gehwegplatten sind über die Längswände quergespannt, sodass sie als Bestandteile des Haupttragwerkes statisch voll ausgenützt werden können (Querschnitt Abb. 12). Sie werden ohne jeglichen Belag direkt befahren und begangen,

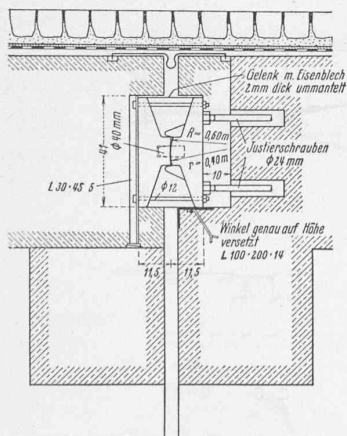


Abb. 7. Scheitelgelenk 1 : 25

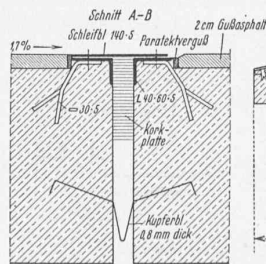
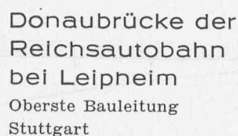
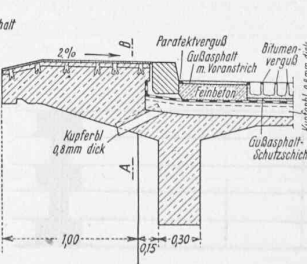


Abb. 8. Fugenausbildung, links 1:10, rechts 1:50



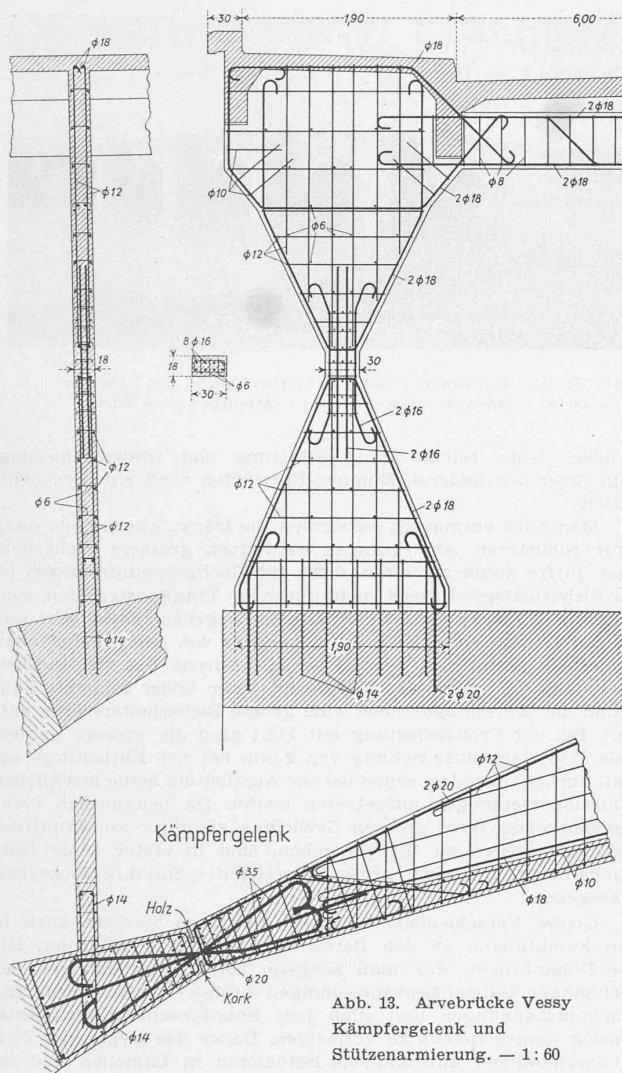


Abb. 13. Arvebrücke Vessy
Kämpfergelenk und
Stützenarmierung. — 1: 60

lichen Dichtungsschichten weg. Sie sind insofern unnütz und sogar schädlich, als sie den Beton hindern, Feuchtigkeit aufzunehmen. Feuchtigkeit ist aber dem Beton günstig und bewirkt eine Verminderung und teilweise Rückgängigmachung des Schwindens. Ueberall da, wo vorzüglicher Beton verwendet wurde, sind trotz Einfluss von Feuchtigkeit Frostschäden bei Bauwerken auch in grosser Höhenlage nie beobachtet worden. Dass die Betonfahrbahn zum Befahren die beste ist, wird heute allgemein anerkannt und es liegt deshalb nahe, sie zu benutzen, wenn die Konstruktion sie anbietet. Die Entwässerung der Oberfläche erfolgt durch eine grössere Anzahl kleiner, am Fahrbahnrand einbetonierter Röhren, die sich dank dem Zwischenraum der Tragwerke direkt in den Fluss entleeren.

Die Dreiteilung des Haupttragwerkes hätte die mehrfache Verwendung eines 2 m breiten Obergerüsts gestattet. Die Unternehmung zog es vor, gleich deren drei zu erstellen, was zum Teil mit dem geringen Holzbedarf, zum Teil aus dem Wunsch nach einer raschen Ausführung sich erklärt. In der Tat war das Gerüst nur für die Gewölbeplatte von 15 cm Stärke zu berechnen. Diese wurde samt den Kämpfergelenken zuerst betoniert, während die Betonierung des Scheitelfeldes erst mit den Längswänden erfolgte. In die untere Scheitelfuge wurde zur vorläufigen Druckübertragung ein Hartholzbrett eingelegt, während an den Kämpfern unten, gleich wie später im Scheitel oben, Korkplatten angeordnet wurden. Etwa fünf Tage nach Betonierung der Platten wurde jeweils das Gerüst abgelassen, aber nur so weit, bis es sich im Scheitel gerade zu lösen begann; alsdann wurden die inzwischen eingeschalteten und armierten Längswände erstellt. In diesem Stadium hatte die Platte schon als Gewölbe zu wirken, wobei allerdings die Drucklinie stark von dessen Mittellinie abwich, wenn nicht das Gerüst die diese Abweichung bewirkenden Lasten samt dem Gewicht der Rippen aufzunehmen in der Lage wäre, was infolge der erwähnten ersten Absenkung und daraus erfolgter Entlastung nun ohne weiteres der Fall ist. Nach Er-

härtung der Längswände ist das Tragwerk völlig stabil und kann die später auszuführenden Fahrbahnteile ohne weiteres tragen.

Nach Fertigstellung dieser Tragwerke nebst Stützen, Quer- und Längsträgern wurden zuerst die Gehwegplatten betoniert. Zum Schluss war die Fahrbahn auszuführen. Ihr grosses Gewicht musste für den Mittelträger eine gegenüber den fertigen und damit steiferen Randträgern vergrösserte Einsenkung ergeben, was schädliche Formänderungen mit Rissbildung befürchten liess. Deshalb erhielt der Mittelträger eine provisorische Belastung mit steinigem Material, derart bemessen, dass die daraus folgende Einsenkung der erwähnten Einsenkungsdifferenz entsprach. Dann wurde das Lehrgerüst gelüftet und hierauf die Fahrbahnplatte betoniert; dem Betonierungsfortschritt entsprechend wurde die Belastung entfernt. Den Beton der Fahrbahn hat man mit Plattenvibratoren verdichtet und mit einer dem Fahrbahnprofil entsprechenden Querbohle gestampft, wobei das Aufliegen auf der Gehwegkante die richtige Höhenlage ergab. Dass die Scheitelpartie zeitlich getrennt in zwei Schichten — untere Platte, Gelenkkörper mit Fahrbahnplatte — betoniert worden ist, wurde durch starke Querarmierungen berücksichtigt und erklärt, warum der Scheitel etwas stärker ausgefallen ist als der in einem Guss erstellte Kämpfer.

Ein einfaches Eisengeländer ist der einzige nicht aus Beton oder Eisenbeton bestehende Teil des Bauwerkes, wenn man von einer Anzahl unter der Fahrbahn angebrachter Bügel absieht, die zur späteren Aufnahme von Leitungen dienen sollen. — Das Bauwerk enthält 386 m³ Eisenbeton mit rd. 50 t Eisen. Die Unternehmung Ed. Favre übernahm den Bau zum Pauschalpreis von rd. 76 000 Fr., während die anderen Angebote über 80 000 Fr. lagen. Den Verhältnissen aber wohl besser entsprachen. Der Preis pro m² Grundriss von 820 m² kann also zu rd. 100 Fr.³⁾ angenommen werden.

Die Ergebnisse der Probelastung am 21. Juli 1937 sind im Bericht Nr. 99 der Eidg. Materialprüfungs-Anstalt vollständig enthalten; hier sei nur deren Zusammenfassung wiedergegeben:

«1. Die Dreigelenk-Bogenbrücke in Eisenbeton über die Arve in Genf von Champel nach Vessy, ein Dreigelenk-Bogen Maillart-scher Bauart, mit einer Stützweite von 56 m und einer Pfeilhöhe von 4,78 m, zeigt trotz der sehr hohen Probelastung von insgesamt 112 t ein praktisch elastisches Verhalten.

2. Die grösste gemessene, lotrechte Durchbiegung im Scheitel für einen Lastenzug von zehn Lastwagen im Gesamtgewicht von 112 t, bzw. 600 kg/m², beträgt nur 5,7 mm, somit $\frac{1}{9800}$ der Stützweite. Sie ist als gering zu bezeichnen.

3. Die Verformungs- und Spannungszustände zeigen, den jeweiligen Laststellungen entsprechend, einen normalen, der Elastizitätstheorie entsprechenden Verlauf.

4. Die Grösstwerte der (durch die Probelast bewirkten) Spannungen erreichen im Mittel
im Gewölbe: 14 kg/cm² Druck und 8 kg/cm² Zug,
in den Fahrbahn-
längsträgern: 7 kg/cm² Druck und 26 kg/cm² Zug,
an den schmalsten Stellen in der Mitte der Stützen über dem Widerlager Champel: 36 kg/cm² Druck.

Die Gesamtspannungen aus Eigengewicht und Verkehrslast überschreiten die zulässigen Spannungswerte nicht.

5. Die Grösstwerte der Stosszuschläge für das Befahren der Brücke durch zwei Lastwagen mit Fahrgeschwindigkeiten von ~ 23 km/h bewegen sich in durchaus normalen Grenzen, nämlich zwischen 19 und 22 ‰.

6. Die Nachrechnung der bei den Belastungsversuchen der Dreigelenkbogenbrücke Vessy-Champel festgestellten Verformungen — Durchbiegungen, Drehungen, Spannungen — zeigt eine sehr befriedigende Uebereinstimmung zwischen der Rechnung (Theorie) und der Messung (Wirklichkeit). Berücksichtigt man noch folgende durch die statische Berechnung nicht erfassten Einflüsse: a) keine vollständige Starrheit der vorkragenden Widerlager; b) keine vollkommene Wirkung der Kämpfer- und Scheitel-Flachgelenke; c) Nichtberücksichtigung der Aufbauten; d) Auslösung von Widerständen der Auflager und der Fahrbahn, sowie von Gelenkreibungen durch die erstmalige hohe und auch alle nachfolgenden Belastungen der Brücke, so darf geschlossen werden, dass die Brücke ein sehr regelmässiges elastisches Verhalten aufweist.

7. Die Messung ergibt, in Uebereinstimmung mit der Nachrechnung, keine anormal hohen oder unerklärlichen Verformungen. Die Tragfähigkeit (Bruchsicherheit) ist zufolge der konstruktiven Eigenheiten und der hochwertigen Betonqualität (Prismen-Druckfestigkeit $p_{\beta d} = 350 \text{ kg/cm}^2$, $E_{\beta} \approx 380\,000 \text{ kg/cm}^2$) in hohem Masse gewährleistet.

³⁾ Der «Schweiz. Ingenieurkalender» gibt den Preis von Eisenbeton-Bogenbrücken grösserer Spannweite zu 450 bis 700 Fr./m² überbrückte Fläche an!

Die Brücke darf, auch auf Grund der Ergebnisse der gemessenen Verformungswerte und des Vergleiches mit der Nachrechnung, vorbehaltlos dem öffentlichen Verkehr übergeben werden.» —

III. Vergleichung der beiden Brücken

Es ist wohl gestattet, zwei ihrer Bedeutung nach so verschiedene Bauwerke vergleichend zu betrachten. Die Bezugnahme in der «Bautechnik» auf meine Bagedanken bei der Leipheimbrücke, sowie die bei gleichem konstruktivem Grundgedanken vorhandenen Verschiedenheiten reizen dazu.

In der Kühnheit darf sich die kleine Arvebrücke immerhin neben der grossen Donaubrücke sehen lassen. Ist auch ihre Stützweite geringer, so ist doch das «Kühnheitsverhältnis» l^2/f grösser, nämlich 6570, während sich für die vier Öffnungen der Donaubrücke entsprechende Werte von 4720 bis 5620 ergeben. Auch in den Belastungsannahmen dürfte kein grosser Unterschied bestehen. Dieser liegt vielmehr in der ganzen Aufmachung. Ohne jede andere Rücksicht als die Anpassung an die verfügbaren geringen Geldmittel wurde der Arveübergang errichtet, als Nutzobjekt sachlichster Art. Die Donaubrücke dagegen kennzeichnet sich als Teilstück eines Monumentes, nämlich der deutschen Reichsautobahn, die in der Tat nicht als reines Nutzobjekt, sondern auch als repräsentatives Wahrzeichen deutscher Baukunst gedacht ist. Die «Schönheit» ist hier gewollt, was durch die Herbeiziehung des Architekten Prof. P. Bonatz zur Gestaltung des Bauwerks bestätigt wird; die Konstruktion hatte sich also diesen Schönheitswünschen anzupassen. Dass hier die Wirtschaftlichkeit nicht das Ausschlaggebende war, ist auch aus dem Fehlen zahlenmässiger Angaben über die Baukosten zu schliessen.

Der wichtigste Schönheitswunsch war offenbar die Beibehaltung der im Gewölbebau üblichen gleichmässig gekrümmten Innenleibung. Dass aber eine vom Scheitel zum Kämpfer gestrecktere Form, die zum «Spitzbogen» führt, zweckmässiger ist, muss einleuchten. Sie gestattet eine wesentliche Ermässigung der Druckspannungen und die völlige Ausmerzungen von Zugbeanspruchungen im Haupttragwerk. Im Scheitel der Donaubrücke beansprucht das Auflager der Stahlgelenke 41 cm Höhe, sodass ein Betonquerschnitt von 60 cm Höhe ausgereicht hätte, wogegen der Rundung, also der «Schönheit» wegen das Doppelte vorhanden ist (Abb. 7). Die Notwendigkeit, das Gelenk oberhalb der Mitte dieses Masses zu setzen, führte zu der etwas komplizierten, für klaren Kräfteverlauf nicht eben günstigen Ausbildung der Scheitelpartie. Man darf sich deshalb wohl fragen, ob die Beibehaltung der Scheitelform nicht zu teuer erkaufte ist. Und ist sie wirklich aus Schönheitsgründen nötig? Auch ich war anfänglich dieser Ansicht und meine eigenen früheren Ausführungen dieses Brückentyps zeigen noch die stetige Bogenkrümmung (Abb. 16). Wir anerkennen den Spitzbogen der Gotik, trotzdem er den statischen Erfordernissen ins Gesicht schlägt. Können wir ihn dann nicht auch dort ertragen, wo er konstruktiv gerechtfertigt ist, und, wie beim Kämpfergelenk der Donaubrücke betont wird, dem Wunsche entspricht «die Zusammenschnürung der Kräfte sinnfällig zum Ausdruck zu bringen»? Warum soll für den Scheitel nicht gelten, was im Kämpfer gut ist?

Aber auch in der übrigen Ausstattung hat man den Eindruck, dass die Wirtschaftlichkeit hinter den Grundsatz, es sei für einen Monumentalbau nur das Beste gut genug, zurückzutreten hat. Deshalb wohl die kostspieligen Stahlgelenke und die fast raffiniert sorgfältige Fugenausbildung. Bei der Arvebrücke sind diese Kosten und Umständlichkeiten vermieden und es ist auch, zur Ersparnis von Kosten und Gewicht, der Konstruktionsbeton der Witterung und dem Rad offen ausgesetzt, während bei der Donaubrücke eine recht schwere Fahrbahndecke auf dem durch mehrfache Isolierschichten geschützten Beton aufgebracht ist.

Es muss auffallen, dass bei ungefähr gleicher Betonbeanspruchung die Arvebrücke sehr viel kleinere Abmessungen aufweist. Einmal ist dies durch die gute Ausnützbarkeit des stark gespreizten Viertelquerschnittes zu erklären. Einseitige Verkehrslast gibt damit keinen Anlass zu grossem Mehraufwand an Material. Von massgebendem Einfluss ist dann die bleibende Belastung und da wirkt sich die schwere Pflasterung der Donaubrücke ungünstig aus. Denn diese Mehrbelastung ruft weiterer Mehrbelastung infolge notwendig vergrösserter Querschnitts-Abmessungen. Damit wird der grosse Unterschied im Betonbedarf, auf den Quadratmeter berechnet, erklärlich. Wenn man nämlich die Öffnung der Donaubrücke von $85 \times 10,8$ m Grundfläche mit dem rd. $60 \times 10,4$ m messenden Mittelteil der Arvebrücke vergleicht, so ergibt sich für die erstgenannte ein Betonbedarf von $0,80 \text{ m}^3 \text{ m}^2$ gegenüber $0,48 \text{ m}^3 \text{ m}^2$ für die Arvebrücke. Der Minderbedarf beträgt also 40 %, bei einem um 20 % grösseren Kühnheitsverhältnis. Und dabei wurde bei der Leipheim-

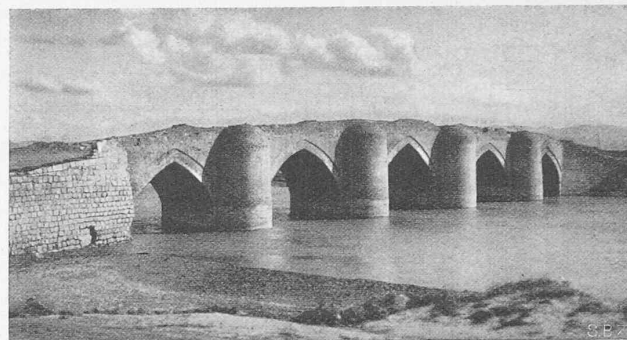


Abb. 17. Alte Karawanenbrücke in Azerbeïdian, in der Nähe des Urmiasees. — Nach A. v. Graefe: «Iran», Atlantis-Verlag Zürich

Brücke, trotz reichlicher Ausstattung und Dimensionierung, gegenüber den anderen Eingabe-Entwürfen noch eine Ersparnis erzielt.

Man wird vermutlich einwenden, die Donaubrücke biete dank ihrer robusteren Abmessungen eben doch grössere Sicherheit. Dies dürfte kaum zutreffen, denn für flachgespannte Bogen ist der Sicherheitsgrad meist nicht durch die Tragkonstruktion, sondern durch die Fundamentverhältnisse gegeben. Diese sind nun bei der Donaubrücke doch nicht so, dass von einer mehrfachen Sicherheit gesprochen werden kann, während der viel bessere, aber dank der leichten Konstruktion kaum höher belastete Baugrund der Arvebrücke noch eine grosse Sicherheitsreserve enthält. Bei der Probelastung mit 112 t ging die grösste gemessene Widerlagerausweichung von 2 mm bei der Entlastung auf Null zurück, nachdem schon bei der Ausrüstung keine merklichen Widerlagerseetzungen aufgetreten waren. Da bekanntlich mehr Bogenbrücken ihres grossen Gewichtes als ihrer konstruktiven Schwäche wegen zu Grunde gehen, sind in erster Linie feste Fundamente und nicht grosse Querschnitte für ihre Sicherheit massgebend.

Grosse Verschiedenheit der Auffassungen herrscht auch in den Zumutungen an den Beton während der Ausführung. Bei der Donaubrücke war man sorgsam bemüht, Erhöhungen der rechnermässigen Beanspruchungen infolge Konstruktions- und Schwindspannungen und auch jede Beanspruchung verhältnismässig jungen Betons zu vermeiden. Daher das wegen der Zwischenschalungen umständliche Betonieren in Lamellen und die langen Ausschalungsfristen, die sogar zur Umstellung der beabsichtigten Bauausführung führten.

Bei der Arvebrücke sind zwecks einfacher, rascher und billiger Bauausführung solche Rücksichten unbeachtet geblieben. So wurde die Bogenplatte schon nach fünf Tagen mit etwa 14 kg/cm^2 beansprucht, nachdem die Druckfestigkeit zu mindestens 150 kg/cm^2 angenommen werden durfte. Gewiss hat dies eine Erhöhung der rechnermässigen Spannungen in der Platte des fertigen Bauwerks um etwa 6 kg/cm^2 zur Folge, aber angesichts des grossen Sicherheitsfaktors dürfte dies unbedenklich in Kauf genommen werden. Man darf auch der Ansicht sein, diese kleine Spannungserhöhung schade angesichts der in einem Guss erfolgten Betonierung sowohl der Platten von Gelenk zu Gelenk als auch ganzer Rippen weniger, als die Anordnung einer ganzen Anzahl von Arbeitsfugen, wo doch trotz aller Sorgfalt fehlerhafte Stellen möglich sind.

Der Unterschied beider Auffassungen dürfte bildlich etwa so ausgedrückt werden, dass man bei der Donaubrücke den Beton sozusagen als Schonungsbedürftigen behandelt hat, von dem fast jeder Luftzug sorgfältig fernzuhalten ist, während der Beton der Arvebrücke als starkes und gesundes Wesen betrachtet wurde, dem in jungen wie in späteren Jahren einige Ueberan-

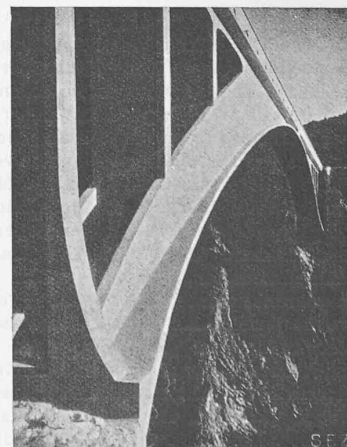


Abb. 16. Brücke über das Salginatobel von R. Maillart (1930). Stützweite 90 m

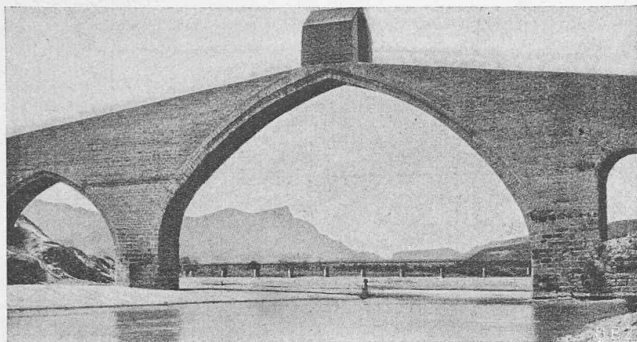


Abb. 18. Alte Teufelsbrücke über den Llobregat bei Martorell, etwa 20 km oberhalb (nordwestlich) Barcelona

strengungen und sogar Grobheiten nichts schaden. Wenn man sich, wie dies ja bei den Bauten der Deutschen Reichsautobahn selbstverständlich ist, von der guten Ausführung des Betons überzeugt hat — allerdings nur dann — kann man ihm wohl mehr zutrauen, als es gewöhnlich mit Rücksicht auf zweifelhafte Ausführung geschieht. R. M.

*

Nachschrift der Redaktion. Die Bezugnahme Maillarts auf den Schönheitsbegriff veranlasst uns zu einer kurzen Bemerkung. Dass bei der Donaubrücke Leipheim die stetige Bogenleibung dem bei dieser Eisenbeton-Konstruktion statisch richtigen Spitzbogen vorgezogen worden ist, entspricht, wie Maillart ja selbst sagt, dem Schönheitsbegriff des heutigen Deutschland. Zu der Monumentalität der Reichsautobahnbrücken gehört unweigerlich eine gewisse Schwere; zierliche Leichtigkeit aus Gründen der Sparsamkeit würde aus der künstlerischen Gesamthaltung dieses Riesenwerkes herausfallen. Dass aber auch Spitzbogen-Brücken monumental wirken können, das mögen unsere beiden Bildchen jahrhundertealter Brücken zeigen: eine massig-schwere und eine erstaunlich leichte, die ihrer zusätzlichen «Einzellast» im Scheitel aus statischen Gründen kaum entraten könnte. Dass die unverhüllte Offensichtlichkeit statisch-konstruktiver Notwendigkeit auch von den deutschen Brückenbauern nicht grundsätzlich abgelehnt wird, zeigen die Kämpfergelenke der Donaubrücke und ihre textliche Rechtfertigung.

Wie sehr übrigens diese Frage zeitgebunden und daher ihre Beantwortung wandelbar ist, das beweist das Bild vom Palazzo Pitti, einem Monumentalbau von allgemein anerkannter «klassischer» Schönheit, trotzdem das Gewölbe, dessen Scheitel stärker ist als die Kämpfer, «den statischen Erfordernissen ins Gesicht schlägt», um Maillarts eigenen Ausdruck zu gebrauchen. — Merkwürdig: je älter ein Bauwerk ist, umso mehr wird im Allgemeinen seine «Schönheit» bewundert, sodass die heterogensten Dinge gleichzeitig belobigt werden. Ob sich da nicht unbewusstermassen oft Nachsicht und Ehrfurcht vor dem Alter in das künstlerische Werturteil mischt und seine Sachlichkeit trübt? Heimatschutz! Was für Gut und Böse segelt da nicht einträchtig unter dieser ideologischen Flagge. Jedenfalls ist man bei alten Bauwerken um vieles toleranter als gegenüber neuen Formen, mögen sie ihre Rechtfertigung noch so klar in sich tragen. Solches Vorurteil muss aber notwendigerweise fortschrittshemmend wirken.

Dass Maillart hier auch die «Schönheit» des Rippenbogens mit sichtbarem Scheitellgelenk zur Diskussion stellt, geht natürlich in erster Linie unsere Schweizer Brückeningenieure an, die seinem «Spitzbogen» bisher, aus Schönheitsgründen, ablehnend gegenüber stehen. Bei uns — im Gegensatz zur Unternehmung der Reichsautobahn — sehr gespannten Geldverhältnissen ist es aber mehr als fraglich, ob nur wegen eines ästhetischen Vorurteils es verantwortet werden kann, die «Schönheit» mit solchem Aufwand an

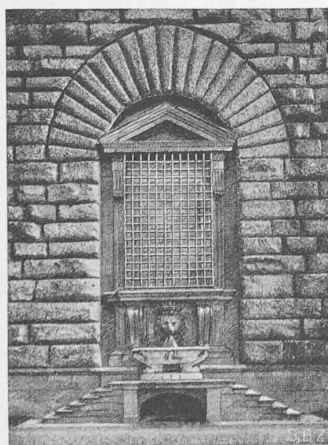


Abb. 19. Fenster am Palazzo Pitti in Florenz, von Filippo Brunelleschi

Geldmitteln zu erkaufen, wie es bei uns nicht selten geschieht. In diesem Zusammenhang mag es unsere Schweizer Kollegen interessieren, dass das «Royal Institute of British Architects» vor Jahresfrist den Schweizer Ingenieur Rob. Maillart zusammen mit seinem französischen Kollegen E. Freyssinet, als erste ausländische Ingenieure, zum Ehrenmitglied ernannt hat, ferner, dass das «Journal of the R. I. B. A.» der Maillartschen Konstruktions-Architektur im Sept. d. J. eine ausführliche und mit vielen Bildern ausgestattete Würdigung hat zuteil werden lassen. Diese Hellsichtigkeit der doch als konservativ geltenden englischen Architekten in bezug auf die *Schönheit* der Konstruktionen Maillarts möge auch in der Heimat unseres Kollegen nicht ohne Eindruck bleiben.

Kavitations- und Tropfenschlagerosion

Anlässlich der Diskussionstagung über Korrosionsfragen vom 28. Okt. 1938 in der E. T. H. gab Dr. Ing. P. de Haller vom Institut für Aerodynamik in einem kurzen Referat Aufschluss über den heutigen Stand der Forschung auf diesem Gebiet. Die Wirkungen der Kavitations- und Tropfenschlagerosion, wie sie an hydraulischen Maschinen beobachtet werden können, sind identisch mit korrosiver, d. h. also chemischer Zerstörung des Materials, führen sie doch gleichermassen zu einer schwammartigen Gestaltung der Oberflächen; sie sind hingegen die Folge rein mechanischer Angriffe ohne Oxydation. Ausserlich unterscheidet sich die Erosion von der Korrosion durch eine Lokalisierung der Angriffstellen, während sich die chemische Zerstörung über der ganzen, von der aggressiven Flüssigkeit benetzten Oberfläche zeigt.

In Peltonschaufeln sind neben den Erosionen durch mechanische Verunreinigung des Wassers, die glatte Schiffe liefern, örtliche schwammartige Ausfressungen zu beobachten, die auf Tropfenschlag infolge Streuung des Strahles zurückzuführen sind. Die bekannten Tropfenschlagversuche der Firma Escher Wyss haben gezeigt, dass die Intensität des Angriffes mit der Tropfengrösse wächst, wegen der Vergrösserung der Angriffsdauer.

An Stellen hoher Geschwindigkeit und niedrigen Druckes tritt in hydraulischen Apparaten und Maschinen die sog. Kavitation mit Dampfblasenbildung auf. Eine Zerstörung des Materials ist gebunden an den Ort, wo die Dampfblasen verschwinden, und zwar ist sie um so intensiver, je grösser die Blasen waren. Versuche haben bestätigt, dass sich von einer kondensierenden Blase aus eine Druckwelle ausbreitet, deren Amplitude die Grössenordnung von einigen Hundert Atmosphären erreichen kann. Der Umstand, dass Glas der Kavitationserosion in gleicher Weise unterliegt wie Metall, bestätigt den rein mechanischen Charakter dieser Erscheinung.

Eine neue Prüfmethode ist in Amerika entwickelt worden, wobei ein Nickelstab durch Hochfrequenzströme in Longitudinalschwingungen versetzt wird. Das eine Ende des Stabes ist eingespannt und das andere trägt das zu prüfende Material, das in Wasser oder in eine andere Flüssigkeit eintaucht. Weil zur Beschleunigung der Flüssigkeit nur die atmosphärische Pressung zur Verfügung steht, vermag sie dem schwingenden Metall nicht zu folgen, sodass unter günstigsten Umständen die Relativgeschwindigkeit zwischen Flüssigkeit und Prüfmaterial den doppelten Wert der Absolutgeschwindigkeit erreichen kann. Dank der hohen Frequenz der Schwingungen wird die Oberfläche des Materials sehr rasch durch Erosion verändert, ähnlich wie bei Kavitationserosion. In allen drei Fällen nimmt die Widerstandsfähigkeit gegen Erosion zwar allgemein mit der mechanischen Festigkeit der Materialien zu, doch kann kein eindeutiger Zusammenhang gefunden werden.

Das Institut für Aerodynamik an der E. T. H. hat eine Versuchseinrichtung zur Erzeugung von Stosswellen in Flüssigkeiten geschaffen. Schläge auf den äusseren Teil eines Kolbens lösen in der eingeschlossenen Flüssigkeitssäule Stosswellen aus, die gegen das zu prüfende Material prallen, mit dem Erfolg, dass auch hier eine Zerstörung der Oberfläche eintritt. Wesentlich ist dabei der Stosscharakter, d. h. die Steilheit der Wellen; bloss periodische Druckveränderungen haben auch bei wesentlich grösserer Amplitude keine nachteilige Wirkung auf das Material. Bei dieser Prüfmethode steht die Flüssigkeit ständig unter Druck, Kavitation tritt also nicht auf. Tropfen werden auch keine losgelöst, und trotzdem ist der Charakter der Zerstörung wesensgleich mit der Kavitations- und Tropfenschlagerosion. Auch hier wird Glas angegriffen, z. T. sogar unter der Oberfläche, wobei die entstandenen Lunker nicht bis zur Oberfläche sich erstrecken.

Bei allen den genannten Prüfmethoden beträgt der auftretende, durch Messung und Rechnung überprüfte Druck nur