

Zeitschrift: IABSE reports of the working commissions = Rapports des commissions de travail AIPC = IVBH Berichte der Arbeitskommissionen

Band: 032 (1979)

Artikel: Stahlbeton-Brückenbau der letzten 50 Jahren

Autor: Menn, C.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-25601>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 22.12.2024

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

Stahlbeton-Brückenbau der letzten 50 Jahre

Fifty Years of Bridge Building in Reinforced Concrete

Construction des ponts en béton armé durant les 50 dernières années

C. MENN

Professor

Eidgenössische Technische Hochschule

Zürich, Schweiz

ZUSAMMENFASSUNG

Einleitend werden zwei typische Brücken aus Beginn und Ende der 50jährigen Entwicklungsperiode bezüglich Tragsystem, Material- und Arbeitsaufwand miteinander verglichen. Diese Gegenüberstellung zeigt deutlich, dass Kostenverlauf, Forschung, Normen, Vorspanntechnik und Modus der Auftragserteilung die Entwicklung am stärksten beeinflusst haben. Anschliessend werden einige markante und richtungsweisende Bauwerke kurz dargestellt.

SUMMARY

Two representative bridges from the beginning and the end of the fifty-year development are compared with respect to structural system, material and work cost. This comparison shows clearly the main influences in the evolution of structural types to be cost development, research, codes, prestressing techniques and the mode of conferring contracts. Finally, several remarkable projects indicative of future trends are briefly discussed.

RESUME

L'auteur présente deux exemples qui reflètent bien l'évolution de la construction des ponts durant les 50 dernières années. On compare les deux ouvrages et en particulier leur système statique ainsi que la quantité de matériaux et de travail nécessaires à leur réalisation. La comparaison fait ressortir clairement que l'évolution des coûts, la recherche, les normes, la technique de la précontrainte ainsi que le mode d'attribution des mandats ont été des facteurs déterminants de l'évolution de la construction des ponts. Enfin d'autres ponts remarquables sont présentés succinctement.



1. EINLEITUNG

Brücken haben im Bauwesen eine besonders grosse Bedeutung. Sie sind als Teile eines Verkehrsträgers ausgesprochene Zweckbauten, die hohe technische Anforderungen stellen. Sie sind zugleich aber auch Repräsentativbauwerke, die wegen ihres markanten Standortes dem Stadt- oder Landschaftsbild oft eine einzigartige Prägung verleihen. Brücken dokumentieren deshalb in der Baugeschichte nicht nur den Stand des technischen Könnens, sondern auch den Willen und die Fähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Aesthetik miteinander zu verbinden. Wie zahlreiche Beispiele zeigen, schliessen sich diese beiden Entwurfsziele nicht aus. Es ist sogar auffällig, dass oft in wirtschaftlich schwachen Regionen besonders schöne und eindrucksvolle Brücken entstanden sind.

Die Entwicklung des Stahlbetonbrückenbaus liesse sich grundsätzlich nach verschiedenen Gesichtspunkten analysieren. Der Stand der Technik käme wohl am deutlichsten in der zu einem bestimmten Zeitpunkt erreichten Grösstspannweite zum Ausdruck. Dabei würden allerdings nur ganz spezielle Bauwerke berücksichtigt, die sich in konzeptioneller Hinsicht kaum mit dem üblichen Brückenbau vergleichen lassen. Im folgenden wird das Hauptgewicht auf die Kostenentwicklung im Brückenbau gelegt, d.h., die für Zweckbauten wichtige Frage, wie sich die Baukosten im Vergleich zu den Lebenshaltungskosten verhielten, und welche Einflussfaktoren hiefür verantwortlich waren. Diese Zusammenhänge sind besonders wichtig für die Beurteilung der Entwicklungstendenz. Es ist selbstverständlich, dass der Kostenverlauf von Land zu Land beträchtliche Unterschiede aufwies. In den hochindustrialisierten Ländern war jedoch die allgemeine Tendenz ungefähr gleich, so dass die den folgenden Untersuchungen zugrunde gelegten schweizerischen Verhältnisse durchaus repräsentativ sind.

Vor 50 Jahren, zu Beginn der betrachteten Entwicklungsperiode, erfolgte die Berechnung und Bemessung von Eisenbetontragwerken in der Schweiz immer noch aufgrund der ersten Eisenbeton-Norm, die aus dem Jahre 1906 datierte als die erste Eisenbetonbrücke in der Schweiz erst 15 Jahre alt war. Die Bemessung beruhte gemäss dieser Norm auf einem Spannungsnachweis bei sehr vorsichtig angesetzten zulässigen Spannungen: Beton-Randspannungen $4,5 \text{ N/mm}^2$; Eisen-Zugspannungen 120 N/mm^2 . Trotz dieser geringen zulässigen Spannungen gelang es allerdings schon damals, Brücken mit beträchtlichen Spannweiten herzustellen. Ein Beispiel hiefür ist die von Mörsch entworfene Gmündertobelbrücke mit einer Gewölbespannweite von 78 m.

Heute sind in der Baustofftechnologie, in der Schnittkraftermittlung von hochgradig statisch unbestimmten Systemen und in der Berechnung der Tragfähigkeit von Stahlbetonquerschnitten zweifellos grosse Fortschritte erzielt worden. Es stellt sich somit die Frage wie sich diese Fortschritte auf die wichtigsten Kostenfaktoren und den Material- und Arbeitsaufwand auswirkten.

Eine erste, wenn auch nur beschränkt aussagefähige, Antwort auf diese Frage erhält man durch einen Vergleich von zwei Brücken aus Anfang und Ende der betrachteten Entwicklungsperiode. Als Beispiel dienen im vorliegenden Fall die 1930 erbaute Salginatobelbrücke und der Pont de Féglise, der 1979 fertiggestellt wird. Beide Brücken überqueren einen relativ tiefen Taleinschnitt und weisen einigermaßen vergleichbare topographische und geologische Gegebenheiten auf. Der Pont de Féglise ist zwar bedeutend länger als die Salginatobelbrücke, seine Feldweiten von 100 m sind jedoch mit dem 94 m weitgespannten Bogen der Salginatobelbrücke durchaus vergleichbar.

Die Erstellungskosten spielten bei beiden Brücken eine entscheidende Rolle. Die Salginatobelbrücke diente der Erschliessung eines kleinen abgelegenen Bergdorfes, und zum Bau der Brücke standen nur sehr beschränkte Mittel zur Verfügung. Das Projekt des Pont de Féglise ging andererseits aus einem Wettbewerb hervor, dessen



Bild 1: Salginatobelbrücke

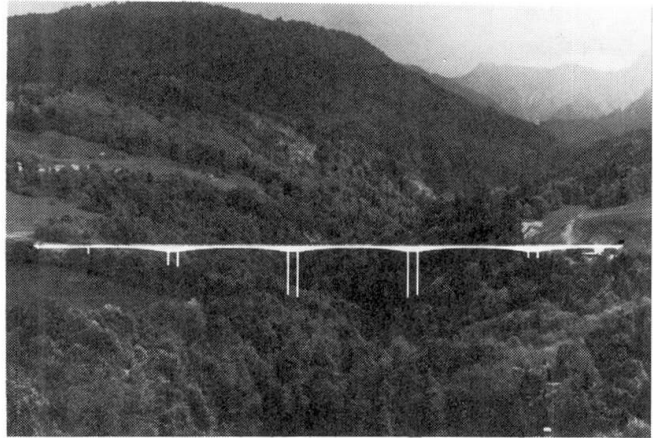


Bild 2: Pont de Fégire

wichtigstes Beurteilungskriterium der Kostenaufwand war. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Bauwerken besteht in der Brückenbreite (Salginatobelbrücke 3,9 m, Pont de Fégire 20,7 m). Die Erschliessung und Installation der Baustelle und die Gewährleistung der Querstabilität des Tragwerks verursachen bekanntlich bei schmalen Brücken zusätzliche spezifische Kosten, die sich bei einer Breite von weniger als 15 m auf den Quadratmeterpreis etwa mit einem Faktor $1,15^{\kappa}$ (wobei $\kappa = \ln 15/B (\ln 2)^{-1}$) auswirken. Demgegenüber wurde der Berechnung des Pont de Fégire eine etwas grössere Verkehrslast zugrunde gelegt, deren Einfluss auf die Querschnittsabmessungen allerdings von geringer Bedeutung ist.

Der Baustoffaufwand pro Quadratmeter Brückenfläche (Bogen und Aufbau bei der Salginatobelbrücke; Pfeiler und Träger beim Pont de Fégire) zeigt folgendes Bild:

Salginatobelbrücke		Pont de Fégire	
Beton	1,05 m ³ /m ²	Beton	0,90 m ³ /m ²
Eisen	103 kg/m ²	Stahl	80 kg/m ²
(Schalung	9.2 m ² /m ²)	Spannstahl	22,5 kg/m ²
		(Schalung	3,9 m ² /m ²)

Daraus lässt sich erkennen, dass der Materialbedarf bei einer Spannweite von 100 m in den letzten 50 Jahren kaum wesentlich gesenkt werden konnte. Im Gegenteil, bezogen auf die Materialfestigkeit, ergäbe sich beim Pont de Fégire sogar ein etwa dreimal grösserer Stahlaufwand. Eine generelle Ueberprüfung der Salginatobelbrücke zeigt zudem, dass auch mit den heute zur Verfügung stehenden Baustoffen und Berechnungsverfahren an diesem Projekt keine ins Gewicht fallenden Materialeinsparungen erzielt werden könnten.

Ein völlig anderes Bild zeigt dagegen der Arbeitsaufwand. Während bei der Salginatobelbrücke pro Quadratmeter Brückenfläche ca. 44 Arbeitsstunden aufgewendet wurden, waren es beim Pont de Fégire nur noch ca. 9 Stunden. Der grosse Arbeitsaufwand bei der Salginatobelbrücke ist fast ausschliesslich auf die komplizierten und umfangreichen Gerüst- und Schalungsarbeiten zurückzuführen.

Interessant und aufschlussreich ist das Verhältnis zwischen Arbeits- und Materialaufwand. Es betrug bei der Salginatobelbrücke 43:57 und änderte sich beim Pont de Fégire nur geringfügig auf 40:60. Dieses 2:3-Verhältnis zwischen Arbeits- und Baustoffkosten ist offenbar eine Konstante, die bei etwa gleichbleibendem Kapitaleinsatz für Installationen und Geräte auch in absehbarer Zukunft eine gute Grundlage für wirtschaftlich optimale Konzeptionen im Brückenbau bleiben dürfte.

In den vergangenen 50 Jahren sind (in der Schweiz) die Materialkosten durchschnittlich etwa um das Dreifache und die Lohnkosten, inkl. Sozialzulagen, etwa um das Zwölfwache gestiegen. Für die Salginatobelbrücke würde das Verhältnis Arbeit/Ma-



terial - selbst bei Berücksichtigung der heute höheren Arbeitsleistung - nicht weniger als 67:33 betragen. Im Vergleich zu den um etwas mehr als das Vierfache angestiegenen Lebenshaltungskosten wäre die Salginatobelbrücke heute etwa 60% teurer. Tatsächlich sind aber die Brückenkosten dank gleichbleibendem Baustoffaufwand, jedoch stark reduziertem Arbeitsaufwand, gegenüber den Lebenshaltungskosten um ca. 40% gesunken.

- Heute würde Maillart für die Salginatobelbrücke bestimmt ein anderes Konzept vorschlagen, wahrscheinlich einen Freivorbau, vielleicht aber auch eine Schrägseilbrücke oder ein Spannband.

2. EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ENTWICKLUNG IM BRUECKENBAU

2.1 Kostenentwicklung

Die Kosten eines Industrieproduktes bestehen im wesentlichen aus den Anteilen Arbeit, Material, Energie und Kapital. Bei ungleichmäßigem Kostenverlauf bei diesen Produktionsfaktoren drängen sich im Hinblick auf optimale Wirtschaftlichkeit Substitutionen auf. Dies ist im Brückenbau nur mit Konzeptionsänderungen und neuen Herstellungsverfahren möglich.

Wie bereits erwähnt, verlief die Kostenentwicklung bei den beiden wichtigsten Produktionsfaktoren Arbeit und Material völlig verschieden. Die Arbeitskosten erhöhten sich im Vergleich zu den Baustoffkosten um etwa das Vierfache. Das Ziel aller neuen Konzeptionen war somit die Verminderung des Arbeitsaufwandes zu Lasten des Material- oder Kapitalbedarfs.

Bei den ausserordentlich arbeitsintensiven Bogenbrücken wurde versucht, dieses Ziel durch einfachere Gestaltung des Ueberbaus zu erreichen: grössere Stützenabstände, Vereinfachung der Tragwerksstruktur bis zum Sprengwerk oder Freivorbau des Bogens. Diesen Massnahmen waren aber enge Grenzen gesetzt. Ins Gewicht fallende Verlagerungen in der Produktionsfunktion liessen sich nur mit einem grundlegend anderen Tragwerkskonzept (Balkenbrücken) und dadurch ermöglichten geschickten Herstellungsverfahren (feldweise Herstellung, Freivorbau, Taktschiebeverfahren, Vorfabrikation, etc.) erreichen. So gelang es z.B., den Arbeitsaufwand für Lehrgerüste von etwa 12 Stunden pro Quadratmeter Brückenfläche bei Bogenbrücken, auf sechs Stunden bei Balkenbrücken und vier Stunden bei Ausführung im Freivorbau zu senken. Dafür musste allerdings hochwertigeres und eventuell auch zusätzliches Material aufgewendet werden. Beim Einsatz mechanisierter Lehrgerüste oder bei Vorfabrikation spielt zudem der Kapitalaufwand eine wichtige Rolle. Voraussetzung für alle diese neuen Tragwerkskonzepte bildeten allerdings die Fortschritte in der Baustofftechnologie und die Vorspanntechnik.

2.2 Forschung und Normen

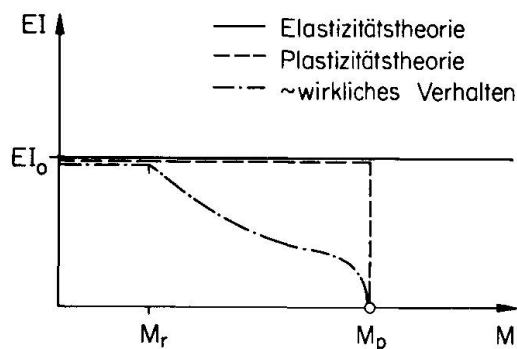


Bild 3: Steifigkeitsverlauf

M_r Rissmoment; M_p plastisches Moment

Der Einfluss der Forschung im engeren Sinne (Ermittlung der Schnittkräfte und des Tragwerk-widerstandes) auf die Reduktion der Baukosten ist schwer erfassbar. Die Verwendung des Computers ermöglichte zwar einen viel besseren Ueberblick über die Schnittkraftverteilung in einem komplizierten Tragwerk. Die Berechnungen beruhen jedoch im allgemeinen auf den Voraussetzungen der Elastizitätstheorie. Der Einfluss der schnittkraftabhängigen Steifigkeit, dem auch die Plastizitätstheorie nur sehr grob Rechnung trägt, wird nicht erfasst, obwohl er von beträchtlicher Bedeutung ist, d.h., eine immer weitergetriebene Verfeinerung der Berechnung auf



relativ groben Voraussetzungen ist kaum sehr sinnvoll.

Die Querschnittstragfähigkeit ist heute, zumindest bei statischer Beanspruchung, gut geklärt. Die dadurch erzielten Einsparungen bei der Bemessung sind allerdings, verglichen mit den bereits vor 50 Jahren üblichen und im wesentlichen von Mörsch entwickelten Grundlagen und Verfahren, relativ bescheiden.

Ausserdem ist zu beachten, dass bei kleineren und mittleren Brücken meistens konstruktive Gesichtspunkte für die Abmessungen der Querschnittselemente massgebend sind. Erfahrungsgemäss beträgt die Minimalbewehrung bei Brückenquerschnitten ca. 50 kg Stahl pro Kubikmeter Beton und die eigentliche statisch erforderliche schlaffe Bewehrung des Brückenüberbaus ist von gleicher Grössenordnung und macht nur ca. 6% der Gesamtbaukosten aus.

Erhebliche Schwierigkeiten bereitet immer noch die Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit bei dynamischer Beanspruchung, ein Problem, das vor allem im Grossbrückenbau (hohe Pfeiler bei Windeinwirkung) eine Bedeutung hat. Oft ist aber die Lösung solcher Probleme auf konzeptionellem Weg zuverlässiger und wirtschaftlicher als umfangreiche Berechnungen, und dies gilt bekanntlich nicht nur im Brückenbau. Die grosse Bedeutung der Forschung liegt denn auch weniger in Untersuchungen mit direkten wirtschaftlichen Zielen, sondern vor allem in der sorgfältigen Abklärung der Grundlagen, die mit der Verwendung neuer Baustoffe, neuer Technologien und neuer Herstellungsverfahren verbunden sind.

Die Aufgabe der Normen besteht grundsätzlich darin, die durch Forschung und Erfahrung gesicherten fundamentalen Regeln der Baukunde, die zur Gewährleistung der Sicherheit und Gebrauchsfähigkeit der Tragwerke notwendig sind, festzulegen. Das immer umfangreichere Prüfwesen, das sich nicht vermeiden lässt wenn Projektverfasser und Unternehmer identisch sind, hat allerdings dazu geführt, dass die Normen mehr und mehr "Spielregeln" enthalten, die zwar für den Vergleich und die Prüfung von Projekten notwendig sind, andererseits jedoch auch den Ermessens- und Verantwortungsbereich des Konstrukteurs stark einschränken. Allzu restriktive Normen hemmen deshalb eine fortschrittliche Entwicklung. Umso wichtiger sind sog. Ausnahmeregelungen, die die Anwendung neuer Technologien und Erkenntnisse ermöglichen und dem Ingenieur die Verantwortung für seine Dispositionen überlassen. Die liberale Form der schweizerischen Normen hat viel dazu beigetragen, dass sich z.B. die Vorspanntechnik sehr rasch durchsetzen und verbreiten konnte, längst bevor sie im Normenwerk verankert war.

2.3 Vorspanntechnik

Die Vorspanntechnik hatte in den vergangenen 50 Jahren den weitaus grössten Einfluss auf die Entwicklung im Brückenbau. Obwohl hochwertige Stahldrähte bereits vor 150 Jahren hergestellt und bei Hängebrücken verwendet wurden, kamen nach vielen zögernden Versuchen die ersten ingenieurmässig klar durchdachten und formulierten Ideen und Vorschläge für die Verwendung hochwertiger Stahldrähte als Bewehrungselement im Massivbau erst in den dreissiger Jahren auf. Ob der Wunsch, höchstwertigen Stahl zu verwenden oder Zugspannungen im Beton zu vermeiden zur Vorspanntechnik führte, lässt sich heute kaum mehr mit Sicherheit beantworten.

Vor allem französische und deutsche Ingenieure leisteten zur Entwicklung der Vorspanntechnik hervorragende Pionierarbeit. Aber auch in der Schweiz wurde die grosse Bedeutung der neuen Technik rasch erkannt und fand, nicht zuletzt dank des zuverlässigen BBRV-Systems, eine grosse Verbreitung. Der eigentliche Durchbruch der Vorspanntechnik im Brückenbau erfolgte allerdings erst nach dem Krieg.

Obwohl die grössten Bogenbrücken damals bereits Spannweiten von nahezu 300 m aufwiesen, liessen sich mit schlaff bewehrten Balkenbrücken höchstens Spannweiten bis zu 80 m erreichen. Mit der Vorspanntechnik gelang es jedoch mühelos in den Spann-



weitenbereich von 100 bis 200 m vorzudringen, der bis anhin dem Stahlbau vorbehalten war. Ebenso wichtig wie die Vergrößerung der Spannweite war jedoch auch die herstellungstechnisch günstige einfache Formgebung und die Möglichkeit, Spannbetonbrücken jeder beliebig gekrümmten Linienführung anzupassen.

2.4 Auftragserteilung

Das Vorgehen bei der Auftragserteilung ist von Land zu Land verschieden. Die Struktur bezüglich Planung, Projektierung und Ausführung sowie die Grösse des Bauwerks spielen dabei eine wichtige Rolle. Die gebräuchlichsten Verfahren bei der Auftragserteilung sind:

- a) Direkter Projektierungsauftrag; Unternehmerofferten ohne Varianten.
- b) Offizielles Projekt mit Aufforderung an die Unternehmer Sondervorschläge auszuarbeiten.
- c) Projektwettbewerb
 - c 1) Ausschreibung des erstprämiierten Projektes
 - c 2) Ausschreibung mehrerer Projekte
- d) Wettbewerb für Projekt und Ausführung (Submissionswettbewerb) mit verbindlichem Preis für die Herstellung des Bauwerks.
- e) Auftragserteilung für grössere Abschnitte; Trasse und Kunstbauten.

Modell a) eignet sich vor allem bei kleinen und mittleren Brücken. Es ermöglicht einer breiten Schicht projektierender Ingenieure, mit der Technik des Brückenbaus vertraut zu werden. Meistens werden jedoch bekannte und bewährte Lösungen vorgeschlagen, und der Einfluss auf die Entwicklung ist deshalb relativ klein.

Wettbewerbe bieten den grössten Innovationsanreiz. Bei sog. Submissionswettbewerben spielt der Preis eine entscheidende Rolle und der Bauherr gelangt meistens zur wirtschaftlichsten Lösung. Sein Einfluss auf das Projekt ist aber gering und es kommt leider oft vor, dass gute und interessante Projekte wegen einer ungünstigen Unternehmerofferte nicht zur Ausführung gelangen.

Bei Projektwettbewerben ist der Bauherr in der Wahl des Projektes wesentlich freier. Da Risiken und Kosten neuer Lösungen jedoch schwer abzuschätzen sind, hält sich die Jury oft an bewährte Systeme. Einen Ausweg aus dieser Schwierigkeit bringt das Vorgehen c 2). Hier hat die Jury die Möglichkeit, einer traditionellen Lösung neue Ideen gegenüberzustellen. Der finanzielle und zeitliche Aufwand ist allerdings sehr gross und erfordert eine gute und langfristige Planung. Im Interesse der Entwicklung sollte aber dieser Weg häufiger eingeschlagen werden.

Bei der Auftragserteilung für ganze Abschnitte besteht bei den Unternehmern die Tendenz, möglichst einfache, rationelle und universell anwendbare Tragsysteme und Bauverfahren zu wählen, d.h. im wesentlichen vorfabrizierte einfache Balken. Es ist deshalb auch verständlich, dass in Ländern mit diesem Auftragsverfahren mehr Wert auf die Entwicklung leistungsfähiger Geräte als qualitativ hochwertiger Tragwerke gelegt wird.

Wenn auch Wettbewerbe vor allem zur Förderung der Entwicklung durchgeführt werden, steht der teilnehmende Ingenieur doch immer in einer gewissen Konfliktsituation zwischen Tradition und Innovation, denn Unternehmer und Jury wirken in bezug auf neue Ideen als Filter; Der Unternehmer, weil er aufgrund seiner Erfahrung und Geräte traditionelle Lösungen zu einem günstigeren Preis offerieren kann und bei neuen Ideen u.U. einen erheblichen Risikozuschlag macht; die Bauherrschaft oder Jury, weil sie oft festgefahrene Ansichten über Aesthetik und Qualität hat, oder weil ihr ganz einfach die Verantwortungsbereitschaft fehlt.

Aus diesen Gründen gelangen neue Ideen oft erst mit grosser Verzögerung zum Durchbruch und bei grossen Bauwerken lässt sich immer wieder feststellen, dass Extrapolationen Innovationen vorgezogen werden. So wurden z.B. traditionelle Freivorbaubrücken bis zu 300 m Spannweite vorgeschlagen, obwohl im Spannweitenbereich über 200 m, wie die Entwicklung zeigt, Schrägseilbrücken in Spannbeton wirtschaftlicher sind.

Besonders bedauerlich ist es, dass sich traditionelle Ansichten über Aesthetik oft ausserordentlich hemmend auf die Entwicklung neuer Strukturen auswirken. Dies führt dazu, dass Konzeptionen, die sich bei mittleren Brücken wohl gut eignen, auch auf ganz aussergewöhnliche Bauwerke übertragen werden, obwohl hier andere Systeme vorteilhafter wären. Bei einer sehr hohen Brücke wäre zum Beispiel ein seilverspanntes Band auf massiven, biegesteifen Pylonen einer traditionellen Balkenbrücke mit schlanken, windempfindlichen Pfeilern und einem Parallelträger bestimmt überlegen.

Das seilverspannte Band, das zwar nicht den heutigen Vorstellungen über Aesthetik im Brückenbau entspricht, weist nämlich folgende grundlegende Vorteile auf:

- Die Biegebeanspruchung infolge Eigengewicht ist sehr klein.
- Die Biegebeanspruchung infolge Verkehrslast wird nicht in den schwierig herzustellenden horizontalen Tragwerkselementen aufgenommen, sondern auf die sehr einfach ausführbaren und durch Eigengewicht "vorgespannten" Pfeiler übertragen.
- Die massiven Pfeiler sind in bezug auf Windlasten unempfindlich.
- Das aus einer massiven Platte bestehende Band lässt sich im Freivorbau sehr einfach und schnell herstellen.
- Das Tragsystem weist auch im Bauzustand eine hohe Stabilität auf.

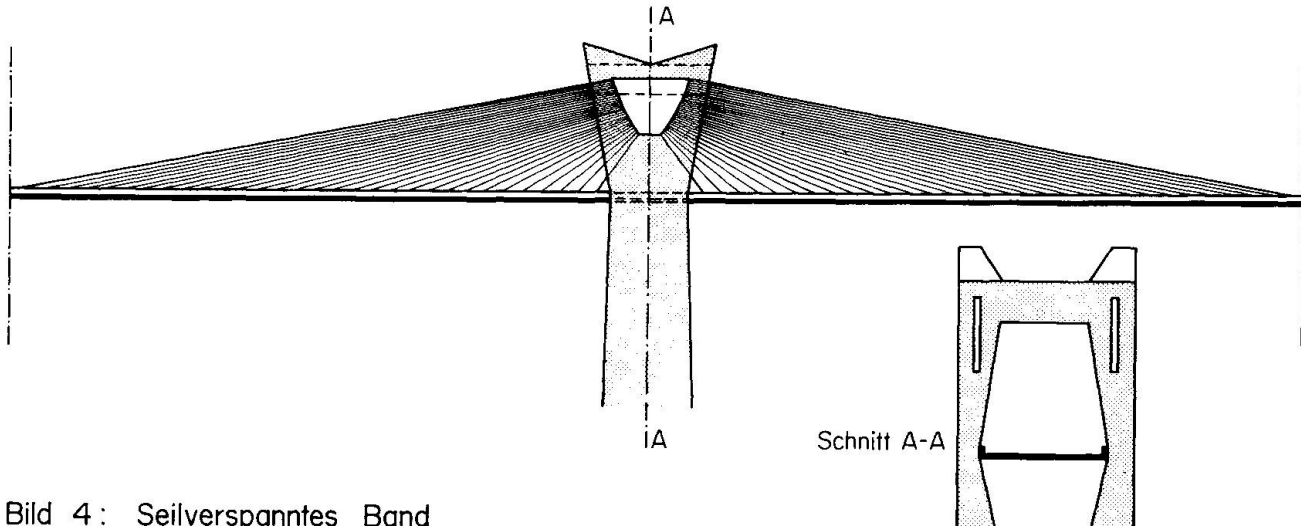


Bild 4: Seilverspanntes Band

3. RICHTUNGWEISENDE STAHLBETONBRUECKEN

Eine Uebersicht über die Entwicklung des Stahlbetonbrückenbaus in den letzten 50 Jahren wäre unvollständig ohne die Erwähnung einiger bemerkenswerter und richtungweisender Bauwerke.

Zu Beginn der dreissiger Jahre hatte der Bau von Bogenbrücken bereits einen beachtlichen Standard erreicht. Das Tragsystem bestand üblicherweise aus einem kräftigen Gewölbe und einem leichten stark aufgelösten Aufbau, der relativ kleine Spannweiten aufwies. Das wohl kühnste Beispiel aus dieser Zeit ist die von Freyssinet ent-

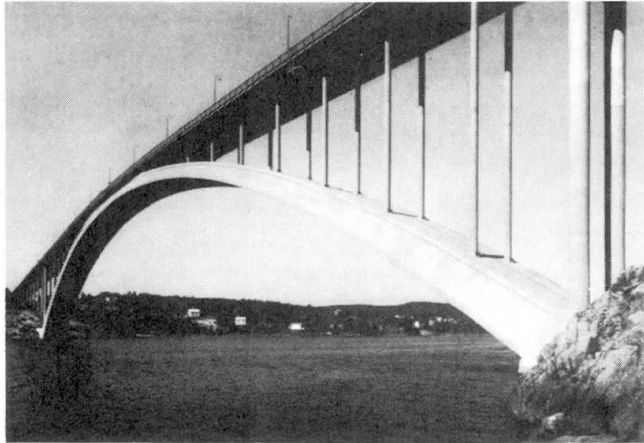


Bild 5: Sandö-Brücke (Schweden)



Bild 6: Schwandbachbrücke (Schweiz)

worfene und in den Jahren 1927 bis 1930 ausgeführte Brücke über den Elorn bei Plougastel, die drei gleiche Bogen mit Spannweiten von 186 m aufweist.

Einen Höhepunkt erreichte der Bogenbrückenbau 1940 mit der Erstellung der 260 m weit gespannten Sandö-Brücke in Schweden. Hier zeigte sich auch, dass die technischen Schwierigkeiten bei derart weitgespannten Brücken nicht in der Berechnung und Bemessung des eigentlichen Tragwerks, sondern in der Bauausführung, d.h. in der Lehrgerüstkonstruktion, lagen.

Mit der Erkenntnis, dass Bogen und Aufbau als Rahmensystem zusammenwirken, setzte sich allmählich die Tendenz durch, das Gewölbe leichter auszubilden und die Biegung infolge Verkehrslast gleichzeitig durch Bogen und Fahrbahnträger aufzunehmen. Bei der Sitterbrücke in St. Gallen kommt diese integrale Tragwirkung in der konstruktiven Gestaltung der Brücke voll zum Ausdruck.

Maillart hat als besonders begabter Konstrukteur dieses integrale Tragverhalten schon viel früher erkannt und bei den von ihm entworfenen Brücken ausgenutzt. Mit seinen ausserordentlich leichten Dreigelenk- und Stabbogensystemen gelang es ihm, die Lehrgerüstkosten auf ein Minimum zu reduzieren.

Nach dem Krieg verloren die Bogenbrücken an Bedeutung. Die Vorspanntechnik ermöglichte auf einfache Weise den Bau von Balkenbrücken, bei denen die Gerüst- und Schalungskosten stark gesenkt werden konnten. Trotz Vereinfachung des Tragsystems und der damit verbundenen Verminderung der Schalungskosten waren Bogenbrücken nur noch bei ganz speziellen topographischen Verhältnissen wirtschaftlich. In jüngster Zeit wurde versucht, die Konkurrenzfähigkeit der Bogenbrücken durch Freivorbau zu verbessern. Einige schöne und interessante Beispiele für diese Herstellungstechnik finden sich in Oesterreich, Deutschland und in der Schweiz.

Im Gegensatz zu dieser Technik dürfte die Herstellung des Bogens aus vorgefertigten Elementen, wie sie bei der Gladesville-Brücke in Australien erfolgte, kaum wirtschaftliche Vorteile bieten, da sie auch ein Gerüst erfordert, das zudem ungünstig belastet wird und für das gesamte Bogengewicht bemessen werden muss.

Im Vergleich zu den Bogenbrücken war die Bedeutung der Balkenbrücken in den dreissiger Jahren relativ klein. Spannweiten über 40 m waren sehr selten. Das weitaus interessanteste Bauwerk aus dieser Zeit ist die Brücke über den Rio do Peixe in Brasilien, die eine Spannweite von 68,5 m aufweist und im Freivorbau erstellt wurde. Leider fehlen nähere Angaben über das Verhalten dieser Brücke. Wahrscheinlich liessen sich die Verformungen kaum befriedigend beherrschen, jedenfalls fand dieses Beispiel, das einer grossen Entwicklung weit voraus war, keine Nachahmung mehr.

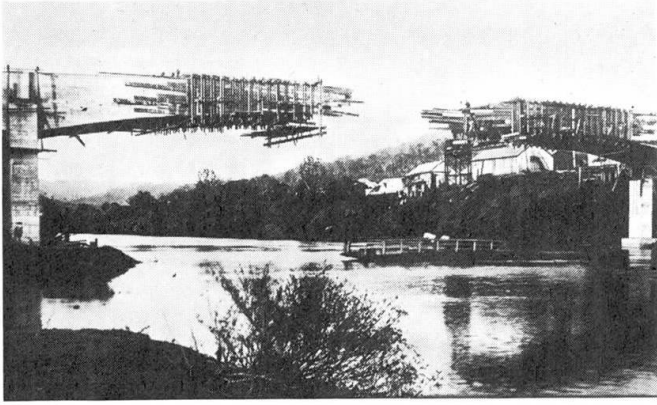


Bild 7: Brücke über den Rio Peixe
(Brasilien)

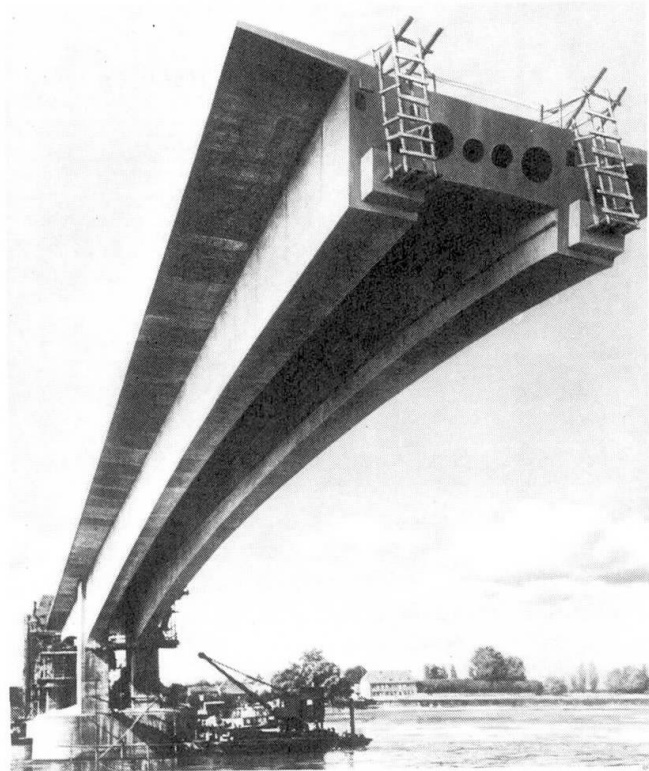


Bild 8: Rheinbrücke Worms
(Bundesrepublik Deutschland)

Spannweiten von gleicher Grössenordnung wie die Brücke über den Rio do Peixe wiesen die Waterloo-Brücke in London (65 m) und die Seinebrücke bei Villeneuve, St. George (78 m) auf. Bei diesen beiden in den Jahren 1939 bis 1941 erstellten Brücken beträgt die Trägerhöhe über den Zwischenpfeilern $1/10$ der Spannweite; wegen der extrem starken Betonung der Vouten sehen diese Dreifeldträger wie auskragende Bogen mit obenliegendem Zugband aus, ein System, das Finsterwalder bereits 1930 für den Bau der Dreirosenbrücke in Basel vorgeschlagen hatte.

Es könnten vor allem diese Brücken gewesen sein, die Finsterwalder zum Freivorbau in Spannbeton inspirierten. Entscheidend war denn auch die Idee, das "Zugband" bzw. die Zugzone des Voutenträgers vorzuspannen, denn damit liessen sich nicht nur die Verformungen reduzieren, sondern auch die im Stahlbeton unvermeidliche Rissbildung vermeiden. Finsterwalder konnte seine grossartige Idee aber erst 1950 mit dem Bau der Lahnbrücke Balduinstein realisieren. Doch bereits ein Jahr später gelang ihm der grosse Wurf mit dem Bau der Rheinbrücke in Worms, der ersten Spannbetonbrücke über den Rhein und gleichzeitig auch der ersten Balkenbrücke, die Spannweiten über 100 m aufwies. Das schönste Beispiel für diese neue Technik im Brückenbau dürfte auch heute noch die Rheinbrücke in Bendorf mit einer Mittelöffnung von 208 m sein.

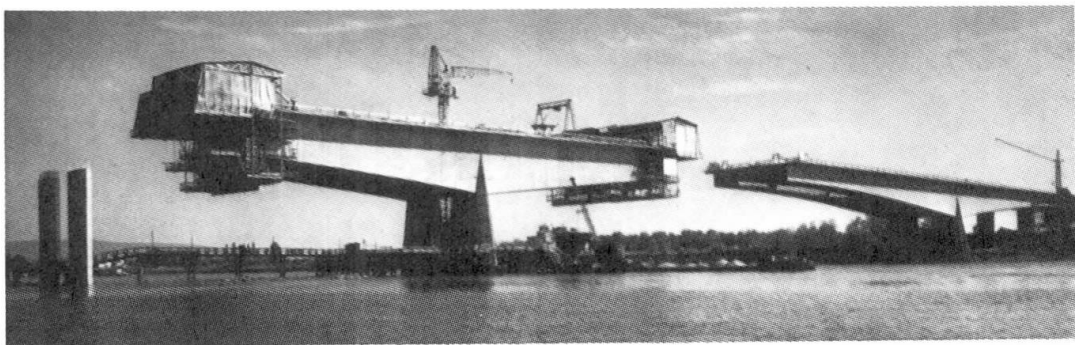


Bild 9: Rheinbrücke Bendorf (Bundesrepublik Deutschland)

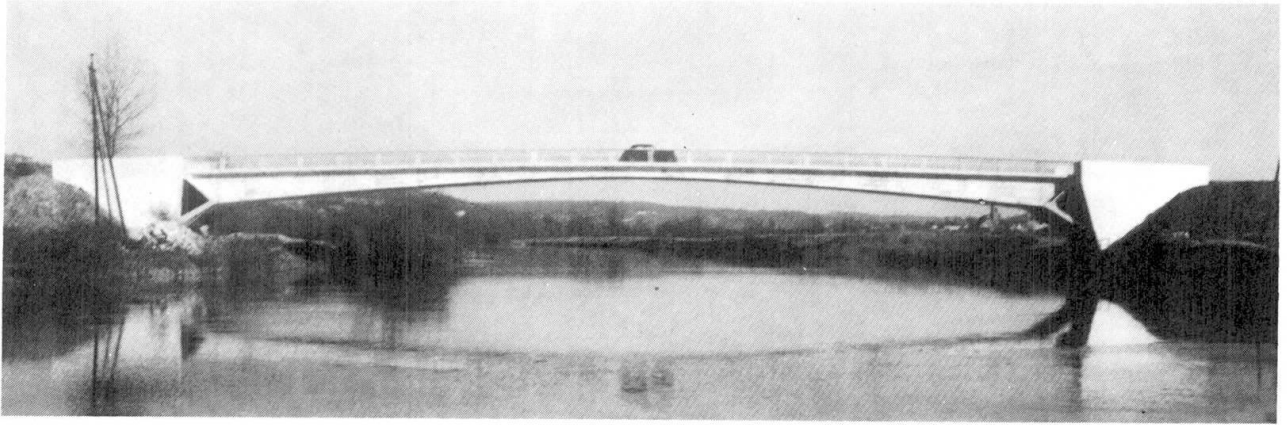


Bild 10: Marnebrücke Ussy (Frankreich)

Lange bevor der Freivorbau den Grossbrückenbau eroberte waren aber schon mehrere kleinere Spannbetonbrücken ausgeführt worden. Dischinger schlug vorerst die Vorspannung ohne Verbund vor, um durch Nachspannen der Spannglieder Kriechverluste zu kompensieren. Dieses 1936 bei der Stadtbrücke in Aue verwendete Verfahren bewährte sich allerdings nicht. Die Vorspannung in den Stahlseilen war mit 200 N/mm^2 zu gering und erforderte einen dauernden Unterhalt.

Im Gegensatz zu Dischinger schlug Freyssinet von Anfang an jene Verfahren vor, die sich schliesslich als zweckmässig erwiesen und im Spannbetonbrückenbau durchsetzten: Träger mit hoher Vorspannung der Stahleinlagen und sofortigem oder nachträglichem Verbund. Zunächst wurden nach seinen Vorschlägen in Frankreich und Deutschland einige kleinere Brücken gebaut, die aus im Spannbett hergestellten, vorfabrizierten Trägern bestanden. Richtungweisend für die Entwicklung war jedoch sein Projekt für die Marnebrücke bei Luzancy. Sein Entwurf aus dem Jahr 1941 wurde allerdings erst nach dem Krieg ausgeführt. Das Verfahren diente als Vorbild für die Erstellung von fünf weiteren Brücken über die Marne, die als die berühmte Serie von Esbly in die Baugeschichte eingingen. Wenige Jahre später wurde in Belgien nach dem Spannverfahren von Magnel der erste vorgespannte Durchlaufträger über zwei Öffnungen hergestellt.

Nach diesen hervorragenden Leistungen war der Weg für die Anwendung der Vorspanntechnik im Brückenbau frei. Es wurden verschiedene neue Spannsysteme entwickelt, die neben dem Freivorbau auch noch andere interessante Bauverfahren ermöglichten. Vor allem die abschnittsweise Herstellung eines Durchlaufträgers mit Wiederverwendung von Gerüst und Schalung gewann immer mehr an Bedeutung. Interessante Beispiele hierfür sind die 1952 ausgeführte Donautalbrücke Untermarchtal und in der Schweiz die Weinlandbrücke in Andelfingen, die 1956 dem Verkehr übergeben werden konnte.

Von den arbeitssparenden Methoden, die in den sechziger Jahren wegen der rasch wachsenden Lohnkosten eine entscheidende Bedeutung erlangten, können im folgenden nur noch einige wenige richtungweisende Beispiele erwähnt werden.

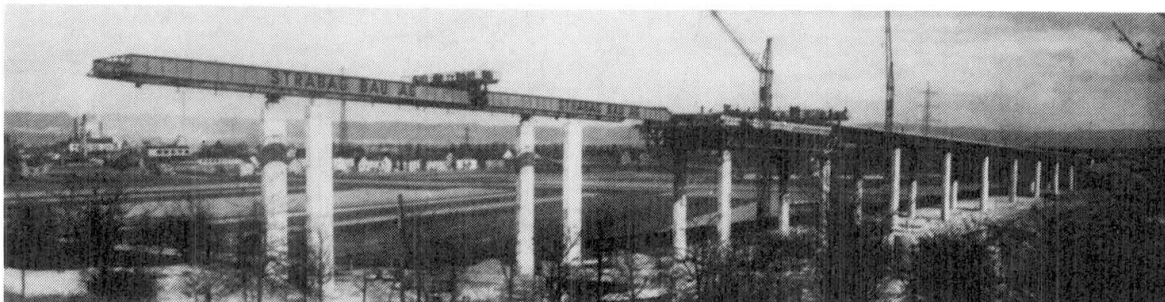


Bild 11: Brücke am Kettiger Hang (Bundesrepublik Deutschland)

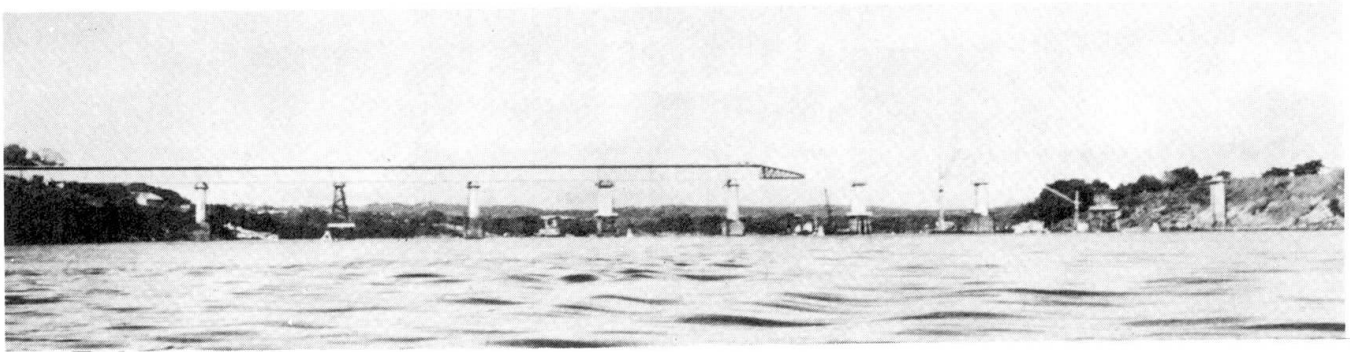


Bild 12: Brücke über den Rio Caroni (Venezuela)

Bei langen Brückenzügen mit gleichmässigen Feldweiten von 40 bis 50 m setzte sich die feldweise Herstellung mit mechanisierten Gerüsten durch. Zum ersten Mal wurde dieses Verfahren bereits 1955 im Zuge der Autobahn Bonn - Koblenz beim Bau der Brücke am Kettiger Hang erprobt. Die Investition für das teure Gerüst war bei der relativ kurzen Brückenlänge allerdings unverhältnismässig hoch. Der Einsatz der über 600 Tonnen schweren Stahlrüstungen lohnte sich erst bei Brückenlängen von über 800 m. Bahnbrechend für die feldweise Herstellung mit Vorbaurüstung war die im Jahre 1964 fertiggestellte Krahenbergbrücke.

Vom Stahlbau inspiriert ist das von Leonhardt entwickelte Taktschiebeverfahren. Erstmals angewendet für den Bau einer 500 m langen Brücke über den Rio Caroni in Venezuela, erlangte diese elegante und wirtschaftliche Methode, die nur geringe Investitionen erfordert, bei geraden und gleichmässig gekrümmten Brücken bald eine grosse Verbreitung.

Ein Herstellungsverfahren mit denkbar geringem Aufwand war immer die Vorfabrikation. Das Versetzen einzelner Träger und deren Verbindung zu einem Brückenquerschnitt ist wohl die einfachste Baumethode, die schon sehr früh angewendet wurde. Technische Probleme ergaben sich erst beim "Vorkopfeinbau" schwerer Elemente mit Spannweiten von 30 bis 50 m. Besonders beliebt und hochentwickelt ist diese Technik vor allem in Italien, aber auch in der Schweiz konnten mit diesem Verfahren einige ausserordentlich wirtschaftliche Brücken gebaut werden.

Neue Wege in der Vorfabrikationstechnik beschritten 1964 die Franzosen beim Bau der 3 km langen Brücke zur Insel Oléron und die Holländer mit der 5 km langen Oosterscheldebrücke. Bei beiden Brücken wurden Querschnittselemente im Freivorbau aneinandergefügt; beim Pont d'Oléron relativ leichte Teile, deren Stossfugen geklebt wurden, bei der Oosterscheldebrücke bis zu 275 Tonnen schwere Elemente mit Fugen aus Ortsbeton. Beide Brücken wiesen einen aussergewöhnlich raschen Baufortschritt auf: der Pont d'Oléron bis zu 30 m pro Tag, und bei der Oosterscheldebrücke konnten in drei Wochen zwei Felder von 95 m Länge hergestellt werden. Noch nie zuvor wurden so grosse Spannweiten in so kurzer Zeit ausgeführt. Nach dem gleichen Konzept wie der Pont d'Oléron wurde in der Schweiz der 2,4 km lange Viadukt von Chillon gebaut.

Ein einfaches Verfahren zur Senkung der Gerüstkosten bei hohen Autobahnbrücken ist die phasenweise Ausführung eines Einzelquerschnittes für beide Fahrrichtungen. Dabei wird der Querschnittskasten, eventuell sogar nur der Querschnittstrog, auf dem eigentlichen Gerüst vorgezogen, und die weitausladenden Konsolen werden später in kurzen Etappen auf einem unabhängigen Nachlaufgerüst hergestellt. Dieses Tragwerkskonzept bietet nicht nur wirtschaftliche, sondern auch ästhetische Vorteile, da die grosse Brückenbreite dank der schmalen Einzelpfeiler nicht mehr erkennbar ist. Dieses in der Schweiz bereits bei mehreren grossen Autobahnbrücken angewendete Verfahren wurde auch bei der Kochertalbrücke in Deutschland, der höchsten Brücke Europas, übernommen.



Bild 13: Brücke über die Oosterschelde
(Holland)

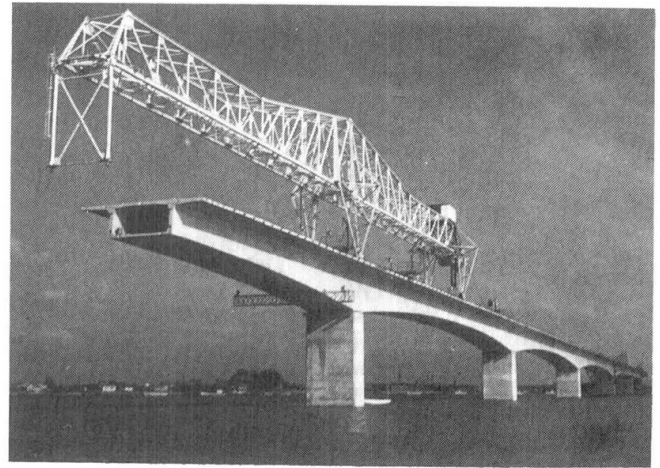


Bild 14: Brücke zur Insel Oléron
(Frankreich)

Die Entwicklung im Spannbetonbrückenbau ist noch längst nicht abgeschlossen. Mit Schrägseilbrücken dringt der Massivbau nun auch in den Spannweitenbereich von 200 bis 500 m vor. Bei den konzeptionellen Grundlagen: Anzahl der Seilebenen, Verankerungsabstände an Träger und Pylon und Verhältnis zwischen Pylonhöhe und Trägerspannweite zeichnet sich bis jetzt noch keine einheitliche Tendenz ab, und die materialtechnischen und konstruktiven Probleme wie Korrosionsschutz, Verankerungen und Dämpfung der Seilschwingungen sind ebenfalls noch nicht restlos abgeklärt.

Das erste markante Beispiel für diese Bauart ist die 1959 von Morandi entworfene 8 km lange Maracaibo-Brücke, die fünf abgespannte Hauptöffnungen von 235 m Spannweite aufweist. Inzwischen sind bereits mehrere grosse Schrägseilbrücken in Spannbeton ausgeführt worden. Besonders schöne Beispiele sind u.a. die 267 m weit gespannte Walbrücke Tiel in Holland und die elegante Donaukanalbrücke in Wien. Den Spannweitenrekord hält zur Zeit der ausserordentlich kühne Pont de Brotonne über die Seine in Frankreich mit 320 m. Das Tragsystem dieser Brücke ist allerdings relativ weich, da die Biege- und Torsionssteifigkeit der Hauptträgererelemente bei der Aufnahme exzentrisch wirkender Lasten eine wichtige Rolle spielen. Die nur 20 m weniger weit gespannte Columbia River Brücke in den USA weist mit zwei Seilebenen und konzentrierten Seilverankerungen am fixierten Pylonkopf ein wesentlich klareres und direkteres Tragverhalten auf.

Abschliessend kann gesagt werden, dass der Spannbeton-Brückenbau ein hohes Niveau erreicht hat, und dass mit Verbesserungen an traditionellen Konzepten kaum noch wesentliche wirtschaftliche Vorteile erzielt werden können; dagegen ist zu erwarten, dass vor allem Fortschritte in der Materialtechnologie schon bald neue Impulse auslösen werden.

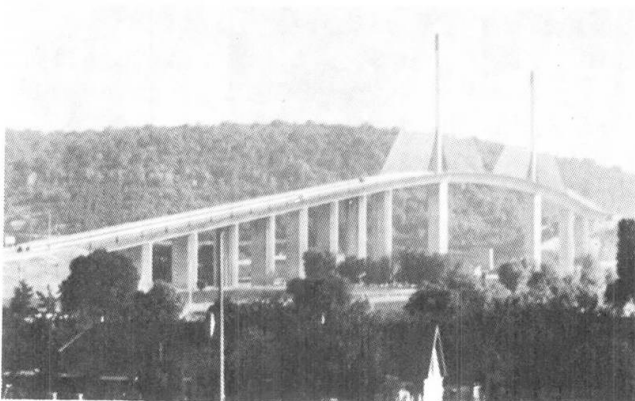


Bild 15: Pont de Brotonne (Frankreich)

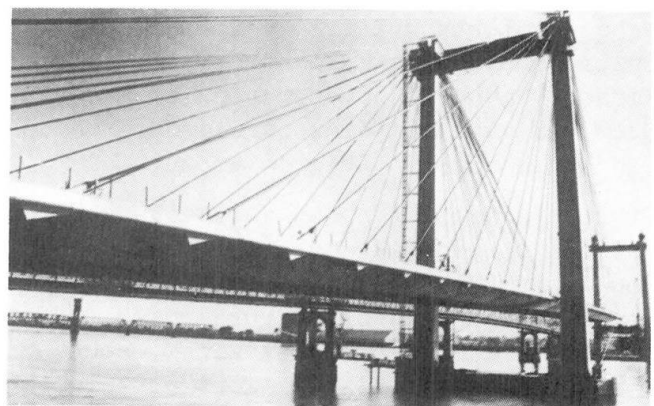


Bild 16: Columbia River Brücke (USA)