steine und ihre Beziehungen zu den petrographischen Eigenschaften und zur Geologie der Lagerstätten.

6. Geoelektrik: Die modernen Verfahren zur Untersuchung der geologischen Struktur des Untergrundes, zur Feststellung der Grundwasserverhältnisse und der Beschaffenheit des Baugrundes mit Hilfe von elektrischen Feldern sind zuerst in Ländern mit bedeutenden nutzbaren Lagerstätten entwickelt worden. In den letzten beiden Jahrzehnten haben sie auch in der Schweiz Eingang gefunden. In Zürich werden sie vor allem von W. Fisch und von O. Münger und H. Knecht für Fragen der praktischen Geologie verwendet und ausgebaut. Trüb, Täuber & Co. hat eine geoelektrische Gleichstromapparatur entwickelt.

7. Die Geophysik an den Zürcher Hochschulen: Da die Geophysik als selbständige wissenschaftliche Disziplin noch kein halbes Jahrhundert alt ist, mögen die nachfolgenden Daten von Interesse sein. Sie geben in knappen Zügen ein Bild von der Entwicklung dieser Disziplin als Lehrfach an den Zürcher Hochschulen.

1912—1926	A. de Quervain, Vorlesungen über Erdbebenkunde an der Universität und an der ETH.
seit 1928	F. Gassmann, Vorlesungen und Übungen über allgemeine und angewandte Geophysik an der ETH.
1934	Gründung des Institutes für Geophysik an der ETH und Einführung der Geophysik als Wahlfach für Vermessungsingenieure.
1937	Einführung der Geophysik als Diplomfach an der Abteilung für Ingenieur-Geologen und Ingenieur-Petrographen der ETH.
1942	Errichtung einer a. o. Professur für Geophysik an der ETH mit Ausbau des Institutes für Geophysik zu einem Lehr- und Forschungs-Institut, verbunden mit Begutachtungs- und Beratungsstelle für die Praxis.
1944	Einführung der Geophysik als Diplomwahlfach an der Abteilung für Mathematik und Physik der ETH und als empfohlenes Fach für Bauingenieure.

Die Entwicklung der Bauingenieurwissenschaften in den letzten 50 Jahren

Von

FR. STÜSSI (Zürich)

(Mit 2 Abbildungen im Text)

Baustatik und Brückenbau

Bis in die ersten Jahrzehnte des 19. Jahrhunderts wurden die Brücken auf Grund von empirischen Regeln gebaut; als Baustoffe wurden Holz und Stein verwendet. Es darf wohl hier der reizvolle Zufall erwähnt werden, dass auf empirischer Grundlage sowohl die Kunst des Holzbrückenbaues wie des Steinbrückenbaues durch schweizerische Baumeister auf einen Stand

entwickelt wurden, der mit den gleichen Mitteln nicht mehr übertroffen werden konnte. So verdanken wir dem Zimmermeister Ulrich Grubenmann aus Teufen (1707—1783) eine Reihe von Meisterleistungen im Bau hölzerner Brücken, während Rodolphe Perronnet (1708—1794), der Sohn eines Schweizer Offiziers in französischen Diensten, den Steinbrückenbau zu einem vorläufigen Abschluss entwickelte. Mit dem Anwachsen von Zahl und Grösse der Bauaufgaben und mit der Verwendung des neuen Baustoffes Eisen im Bauwesen wurde es notwendig, dem konstruktiven Gefühl ein objektives Instrument, die Baustatik, beizugeben, um sicher und wirtschaftlich bauen zu können.

Die Grundlagen der Baustatik sind einerseits die Gesetze des Gleichgewichts, wie sie die Mechanik entwickelt hat, andererseits die Erfahrung, die Beobachtung der Baustoffe unter der Einwirkung von Belastungen (Materialprüfung) und die Beobachtung von ausgeführten Bauwerken im Laufe der Zeit.

Im Gegensatz zur Mechanik aber, die die Aufgabe hat, unsere Beobachtungen über die Bewegung von Körpern zu ordnen und zu erklären und die Bedingungen aufzuzeigen, unter denen sich diese Körper im Gleichgewichtszustand befinden können, hat die Baustatik eine ganz bestimmte numerische Problemstellung zu beantworten; sie frägt nicht mehr nach den Bedingungen, unter denen das Gleichgewicht zustande kommen kann, sondern sie geht vom Gleichgewichtszustand als einem gegebenen Ausgangszustand aus, um die im Innern eines Tragwerks wirkenden Kräfte und Beanspruchungen zu bestimmen, die dann mit den für das gegebene Baumaterial durch die Erfahrung als zulässig ausgewiesenen Beanspruchungswerten verglichen werden müssen. Die Problemstellung der Baustatik ist auf den gegebenen Einzelfall, das zu erstellende Tragwerk, orientiert. Die Baustatik benötigt somit nicht in erster Linie allgemeine Lösungen zur Darstellung von mechanischen Zusammenhängen, sondern numerische Methoden, die auf jeden Einzelfall angewendet werden können. Die Notwendigkeit der Handhabung baustatischer Methoden durch den Konstrukteur schliesst den Verzicht auf schwierige mathematische Sondermethoden in sich ein. Daraus und aus dem grundsätzlich verschiedenen Charakter der Problemstellung zwischen Mechanik und Baustatik ist es wohl teilweise zu erklären, dass grundlegende Arbeiten der Mechanik erst verhältnismässig spät zur Bemessung von Tragwerken ausgewertet wurden. Die Notwendigkeit einer Synthese von «Theorie und Praxis» hat wohl als erster der grosse französische Ingenieur Louis Navier (1785—1836) erkannt; seine beiden Hauptwerke «Résumé des leçons sur l'application de la Mécanique à l'Etablissement des Constructions et des Machines» 1826 und «Rapport et Mémoire sur les ponts suspendus» 1823 bedeuten die Begründung der heutigen Baustatik.

Die unvergängliche Leistung Carl Culmann's (1821—1881), des ersten Lehrers für Baustatik und Brückenbau an der 1855 eröffneten Eidgenössischen Polytechnischen Schule besteht darin, dass er zeichnerische Methoden

in die Baustatik eingeführt hat. Culmanns «Graphische Statik» ist 1866 in erster Auflage erschienen; die zweite Auflage von 1875 enthält nur noch den ersten (allgemeinen) Teil, und es war Culmann nicht mehr vergönnt, auch den zweiten Teil (Anwendungen) selbst neu zu bearbeiten. Die Bedeutung der graphischen Statik Culmanns liegt darin, dass sie in der eigentlichen Sprache des Ingenieurs, in der Zeichnung, geschrieben ist und dadurch für den Ingenieur anschaulich und übersichtlich ist. Wenn wir auch heute die rechnerische Behandlung baustatischer Aufgaben der rein zeichnerischen im allgemeinen wieder vorziehen, so ist doch der heutige Ausbau der Baustatik ohne die graphische Statik von Carl Culmann nicht denkbar.

Damit gelangen wir zum Beginn der eigentlichen Berichtsperiode unseres Überblickes. Dieser Beginn fällt zeitlich zusammen mit der Einführung des Flusseisens in den Brückenbau durch G. C. Mehrtens beim Bau der Weichselbrücke bei Fordon (1888—91) und der Verwendung des Eisenbetons; die erste Eisenbetonbrücke der Schweiz, die Kanalbrücke bei Wildegg wurde 1890 mit einer Spannweite von 39 m erbaut. In bezug auf die wissenschaftliche Entwicklung können wir den Beginn unserer Berichtsperiode durch zwei von Zürich ausgehende grosse Leistungen charakterisieren: den Ausbau der Baustatik durch Wilhelm Ritter und den Aufbau einer systematischen Versuchsforschung durch Ludwig von Tetmajer.

Wilhelm Ritter (1847—1906), Schüler und Nachfolger Culmanns, hat durch seine in vier Bänden erschienenen «Anwendungen der graphischen Statik» das Erbe Carl Culmanns nicht nur gepflegt, sondern durch bedeutende eigene Leistungen entscheidend gemehrt und ausgebaut. Die von ihm entwickelte Methode der Festpunkte zur Berechnung durchlaufender Träger gehört auch heute noch zum täglichen Rüstzeug des Bauingenieurs. Ferner verdanken wir ihm einen wichtigen Beitrag zur Theorie des Eisenbetons: «Die Bauweise Hennebique», Schweiz. Bauzeitung 1899.

L. v. Tetmajer (1850—1905) verdanken wir die erste systematische experimentelle Untersuchung des unelastischen Bereichs der Knickspannungslinie, die zur Tetmajerschen Geraden führte. Die erste Angabe dieser Geraden finden wir in der Schweiz. Bauzeitung vom 10. Januar 1889, wo Tetmajer die Ergebnisse von amerikanischen Knickversuchen an Stäben aus Schmiedeisen durch die Gerade

$$\sigma_{kr}^{t/cm^2} = 3.141 - 0{,}0142 \cdot \lambda$$

interpretiert. Seine eigenen Versuche hat Tetmajer ausser in der Schweiz. Bauzeitung besonders in den «Mitteilungen der Materialprüfungs-Anstalt am Schweiz. Polytechnikum in Zürich» beschrieben; das 1896 erschienene VIII. Heft dieser Mitteilungen enthält die umfassende Darstellung und Auswertung seiner Knickversuche und ist dadurch zu einer massgebenden Grundlage der Konstruktionspraxis und unserer Bauvorschriften geworden. Tetmajer hat dabei auch den Nachweis geleistet, dass für das Ausknicken schlanker Stäbe, d. h. dann, wenn die Knickspannung $\sigma_{kr.}$ unter der Proportionalitäts-

grenze σ_P des Materials liegt, die im Jahre 1744 von LEONHARD EULER gefundene Knickformel

$$P_{kr.} = \frac{\pi^2 E \cdot J}{l^2}$$

oder

$$\sigma_{kr.} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2}$$

gültig ist. Es muss hier allerdings beigefügt werden, dass schon L. Navier 1826 die Gültigkeitsgrenzen der Eulerschen Knickformel klar erkannt und den unelastischen Bereich der Knickspannung mit einer fast visionär anmutenden Sicherheit zutreffend diskutiert hat; seine Erkenntnisse scheinen allerdings während Menschenaltern in Vergessenheit geraten zu sein.

Die theoretische Untersuchung des unelastischen Knickbereichs fällt ebenfalls mit dem Beginn unserer Berichtsperiode zusammen: In der Schweiz. Bauzeitung vom 30. 3. 1895 gibt F. ENGESSER eine Verallgemeinerung der Eulerschen Knickformel, in der allerdings nicht berücksichtigt ist, dass bei abnehmender Beanspruchung der Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen immer durch den Elastizitätsmodul E gegeben ist. Auf eine Einwendung von F. JASINSKI (Schweiz. Bauzeitung vom 22. 6. 1895) korrigiert Engesser die allgemeine Knickformel in

$$P_{kr.} = \frac{\pi^2 \cdot T_k \cdot J}{l_k^2},$$

(Schweiz. Bauzeitung vom 27. 7. 1895), wobei T_k den vom Spannungsdehnungsdiagramm des Materials und der Querschnittsform abhängigen Knickmodul bedeutet.

Die festgestellte, intensive Beschäftigung mit dem Knickproblem steht zweifellos im Zusammenhang mit Rückschlägen, die der Stahlbrückenbau kurz vorher durch einige Brückeneinstürze erlitten hatte. Wir erwähnen hier den Einsturz von Strassenbrücken über die Töss bei Rykon-Zell, 1883, und über den Werdenberger Binnenkanal bei Salez, 1884, als Folge des Ausknickens von zu schlanken Druckstäben, und besonders das folgenschwere Unglück beim Einsturz der Eisenbahnbrücke über die Birs bei Münchenstein am 14. 6. 1891. Durch die sorgfältige Untersuchung der Einsturzursachen und die daran anschliessende internationale Diskussion, die sich zum grössten Teil in der Schweiz. Bauzeitung abspielte, haben diese Rückschläge zu einer entscheidenden Verbesserung der konstruktiven Durchbildung eiserner Brücken den Anstoss gegeben. Eine weitere bedeutungsvolle Folge dieser Brückeneinstürze waren die durch sie veranlassten Belastungsgrossversuche bis zum Bruch an den Brücken von Mumpf und Wolhusen, die, unter Beteiligung der bedeutendsten Fachleute der Zeit durchgeführt, wertvolle Erkenntnisse vermitteln. Solche Grossversuche, wie sie Belastungsproben an Brücken, verbunden mit eingehenden Messungen der Formänderungen (Spannungs- und Durchbiegungsmessungen), darstellen,

wurden bei uns auch in der Folge immer wieder, wenn auch nicht mehr bis zum Bruch, durchgeführt, und es hat sich dabei auch ein recht hoher Stand einer besonderen Brückenmesstechnik entwickelt. Besonders zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang die Untersuchungen, die von der Technischen Kommission des Verbandes Schweiz. Brücken- und Eisenhochbaufabriken (T.K.V.S.B.) und auch von den Bundesbahnen vor etwa 25 Jahren über die Nebenspannungen infolge der steif ausgebildeten Knotenpunkte in Fachwerkbrücken durchgeführt wurden. Daran, dass Fachwerkträger praktisch auf Grund der von Culmann eingeführten Voraussetzung gelenkiger Knotenpunkte berechnet werden dürfen, änderten diese Versuche allerdings nichts, doch ergaben sie einige wichtige Erkenntnisse darüber, durch welche konstruktive Massnahmen die Nebenspannungen in erträglichen Grenzen gehalten werden können. Heute ist die baustatische Versuchsforschung von der baustatischen Entwicklung nicht mehr wegzudenken; sie wird bei uns insbesondere im Institut für Baustatik an der E.T.H. (M. Ritter und F. Stüssi) gepflegt.

Mit der schärferen Erkenntnis des Knickproblems fallen die ersten Lösungen der weiteren für die Konstruktionspraxis wichtigen Stabilitätsprobleme zeitlich ungefähr zusammen: so gab G. H. Bryan 1891 die Beullast einer dünnen gedrückten elastischen Platte an, während 1899 L. Prandtl und A. G. M. Michell erstmals und unabhängig voneinander die Kipperscheinungen von auf Biegung beanspruchten Trägern untersuchten.

Die klassische Biegungslehre nach Navier setzt zur Berechnung der Spannungen in schlanken Stäben voraus, dass ursprünglich ebene Querschnitte auch nach der Formänderung eben bleiben. Versuche, die C. v. Bach an Trägern mit [-Querschnitt durchführte, zeigten nun aber, dass diese Bernoulli-Naviersche Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte nicht allgemein gültig sein könne und jedenfalls für unsymmetrische Querschnitte nicht (oder nicht immer) zutreffe. Die Abklärung dieser Anomalie der Biegung, die wir heute durch den Begriff des Schubmittelpunktes charakterisieren, gelang annähernd gleichzeitig und unabhängig voneinander den drei schweizerischen Ingenieuren Robert Maillart (Schweiz. Bauzeitung 1921), H. Schwyzer (Diss. ETH. 1920) und A. Eggenschwyler (Diss. ETH. 1921). Es ergab sich aus diesen Untersuchungen, dass die Querschnitte von auf Biegung beanspruchten Querschnitten nur dann eben bleiben, die Spannungen also nur dann mit Ergebnissen der klassischen Biegungslehre übereinstimmen, wenn die Belastung im Schubmittelpunkt (Querkraftsmittelpunkt) eines Querschnittes angreift. Dieser Schubmittelpunkt, der bei unsymmetrischen Querschnitten nicht mit dem Schwerpunkt zusammenfällt, ist sowohl der Angriffspunkt der Belastung bei verdrehungsfreier Biegung wie auch der Drehpunkt des Querschnittes bei Verdrehung. Jede nicht durch den Schubmittelpunkt gehende Belastung erzeugt neben den Beanspruchungen auf Biegung auch solche aus Verdrehung. Dabei tritt im allgemeinen die Besonderheit auf, dass die äusseren Torsionsmomente nur teilweise durch Torsionsschubspannungen, teilweise aber auch durch

Flanschquerkräfte (Flanschbiegung) aufgenommen werden. Die durch diese Besonderheiten notwendig gewordene Erweiterung der klassischen Biegungslehre darf heute in den Grundzügen als abgeschlossen betrachtet werden.

Eine andere Erweiterungsnotwendigkeit der klassischen Biegungslehre zeigt sich bei der Berechnung von zusammengesetzten Trägern. Im Stahlbau werden grössere Träger durch Nietung oder Schweissung aus einzelnen Elementen oder Profilen zusammengesetzt; der Holzbau kennt solche zusammengesetzte Träger in Form von verzahnten oder verdübelten Balken seit Jahrhunderten. Während man aber bis heute annahm, dass die Spannungsberechnung der klassischen Biegungslehre ohne weiteres auch auf solche zusammengesetzte Träger übertragen werden könne, zeigen eingehendere Untersuchungen, dass dies nur dann mit genügender Genauigkeit zutrifft, wenn die Nachgiebigkeit des Verbindungsmittels klein ist und wenn dieses verhältnismässig dicht ausgeteilt ist. Das Spannungsbild eines zusammengesetzten Trägers ist abhängig von der Nachgiebigkeit und Anordnung der Verbindungsmittel. Auch ein gewöhnlicher Holzbalken ist wegen des anisotropen Aufbaues des Baustoffes als ein zusammengesetzter Träger aufzufassen, bei dem die Beanspruchungen aus Biegung nicht mehr linear über die Querschnittshöhe verteilt sind. Die Abklärung des Zusammenhanges zwischen der Nachgiebigkeit des Verbindungsmittels und dem Spannungsbild ist eine Forschungsaufgabe unserer Zeit, deren Lösung vor dem Abschluss zu stehen scheint.

Auf ähnlichem Gebiete liegen teilweise auch die Probleme, die die seit etwa zwei Jahrzehnten in den Stahlbau aufgenommene Schweisstechnik stellt. Während im Maschinenbau und im Schiffsbau schon früher mit Erfolg geschweisst wurde, zeigten sich bei der Übernahme dieses Verbindungsmittels in den Stahlbau einige schwere Rückschläge durch den Einsturz der Strassenbrücke bei Hasselt in Belgien und durch Schadenfälle bei deutschen Reichsautobahnbrücken. Es zeigt sich, dass die Schweissnaht ein bedeutend steiferes Verbindungsmittel ist als der Niet, und es ist notwendig, dass aus diesem verschiedenen Verhalten auch die Folgerungen für die bauliche Durchbildung geschweisster Verbindungen gezogen werden. Hatte man ursprünglich gehofft, mit der Einführung der Schweissung, durch den Wegfall der Nietlochschwächungen, nicht nur mit geringerem Materialaufwand, sondern damit auch entsprechend billiger bauen zu können, so weiss man heute, dass der Materialeinsparung eine Vergrösserung der Bearbeitungskosten gegenübersteht, die den Gewinn an Materialkosten oft sogar übersteigen kann.

Der Einsturz der Tacoma-Hängebrücke (USA.), der drittlängsten Brücke der Welt, infolge räumlicher aerodynamischer Unstabilität, am 7. November 1940, nach einer Betriebsdauer von nur etwa vier Monaten, hat uns eindrücklich gezeigt, dass wir in vermehrtem Masse die dynamischen Wirkungen der Belastungen und die räumlichen Verhältnisse des Kräftespiels bei der Bemessung unserer Tragwerke berücksichtigen müssen. Die

nur in bescheidenem Umfang vorhandenen Grundlagen einer Tragwerkdynamik sind auszubauen, und auch die Statik der Raumtragwerke ist auf breiterer Basis zu entwickeln. Ebenso müssen die Verfahren zur Berechnung von Platten, Schalen und Scheiben in einer für den Konstrukteur anwendbaren, also baustatischen Form ausgearbeitet werden.

Die gegenwärtige Baustoffknappheit im Zusammenhang mit den grossen Aufgaben des Wiederaufbaus und der Konkurrenzkampf zwischen den verschiedenen Bauweisen zwingen uns zu einer schärferen Ausnützung unserer Baustoffe und damit aber zu einer verfeinerten Erfassung des Kräftespiels in unseren Tragwerken. Solche verfeinerte Berechnungen brauchen nun aber nicht unbedingt grundsätzlich neuen baustatischen Methoden zu rufen, sondern es scheint eher ein Ausbau der klassischen baustatischen Mittel und ihre Anpassung an neue Aufgaben eine der nächsten Aufgaben der Baustatik zu sein. Dieser mögliche Ausbau klassischer Mittel sei am Beispiel des Seilpolygons kurz skizziert. Das Seilpolygon, das von VARIGNON (1654—1722) zur Zusammensetzung von Kräften eingeführt wurde, wurde von C. CULMANN schon äusserst vielseitig verwendet. Eine dieser Anwendungsformen ist die Berechnung der Biegungsmomente M des durch Lasten P belasteten Balkens. Bei lotrechten Lasten P lässt sich die zeichnerische Konstruktion des Seilpolygons rechnerisch durch die dreigliedrige Gleichung

$$\frac{M_{m+1}-M_m}{\Delta x_{m+1}}-\frac{M_m-M_{m-1}}{\Delta x_m}=-P_m$$

ausdrücken. Gehen wir von den endlichen Intervallen Δx auf Intervalle dx und von den Einzellasten P auf die stetig verteilte Belastung p über, so ergibt sich daraus

$$\frac{d^2M}{dx^2}=-p.$$

Das Seilpolygon stellt somit eine lineare Differentialbeziehung zweiter Ordnung dar. Ein grosser Teil der baustatischen Probleme wird nun aber durch solche Beziehungen beherrscht. So gilt beispielsweise für die elastische Linie η eines Balkens die Gleichung

$$\frac{d^2\eta}{dx^2}=-\frac{M}{EJ};$$

die elastische Linie η wird (nach OTTO MOHR [1835—1918]) als Seilpolygon zur «Belastung» $\frac{M}{EJ}$ gefunden. Die verteilte Belastung p kann dabei unter Voraussetzung feldweise linearen Verlaufs zu Knotenlasten P,

$$P_m=\frac{1}{6}\cdot\Delta x_m\cdot(p_{m-1}+2_{pm})+\Delta x_{m+1}\cdot(2p_m+p_{m+1}),$$

zusammengefasst werden.

Wird ein Stab ausser durch die Querbelastung p durch eine axiale Druckkraft N belastet, so gilt für die Biegungsmomente M die Differentialgleichung

$$\frac{d^2 M}{dx^2} + \frac{N}{EJ} \cdot M + p = o,$$

die in eine verallgemeinerte Seilpolygongleichung umgesetzt werden kann. Für gleiche Feldweiten Δx ergibt sich dabei mit

$$U = \frac{6\,EJ}{\Delta x^2}$$

das dreigliedrige Gleichungssystem

$$-M_{m-1} \cdot \left(1 + \frac{N}{U_m}\right) + M_m \cdot \left(2 - \frac{2N}{U_m} - \frac{2N}{U_{m+1}}\right) - M_{m+1} \cdot \left(1 + \frac{N}{U_{m+1}}\right)$$
$$= P_m \cdot \Delta x.$$

Dieses «Seilpolygon» kann nun allerdings nicht mehr auf normale Weise gezeichnet werden, sondern es ist durch Auflösung eines dreigliedrigen Gleichungssystems zu berechnen. Sein Vorzug gegenüber einer mathematischen Lösung der Differentialgleichung beruht darauf, dass auf diese Weise die (numerische) Lösung des Problems bei beliebigem Verlauf der Belastung p und der Steifigkeit EJ und bei negativem oder positivem Vorzeichen der Längskraft N in gleicher Weise gefunden wird.

Viele der in neuerer Zeit aktuell gewordenen baustatischen Probleme gehorchen nun einer solchen inhomogenen linearen Differentialgleichung; sie sind damit ohne Schwierigkeiten baustatisch lösbar. Nun können aber Differentialgleichungen vierter Ordnung (Balken auf elastischer Bettung, allgemeine Theorie der verankerten Hängebrücke) durch Verknüpfung von zwei Seilpolygonen dargestellt und damit baustatisch gelöst werden. Die Differentialgleichungen von Platten, Scheiben und Schalen können dargestellt werden durch zwei Gruppen von sich kreuzenden Seilpolygonen («elastische Gewebe» nach H. Marcus); sie sind damit grundsätzlich ebenfalls mit baustatischen Methoden lösbar, wenn auch hier der Ausbau der Methodik heute noch nicht als abgeschlossen bezeichnet werden kann.

Im Gebiet des Stahlbrückenbaues wird unsere Berichtsperiode dominiert durch die Verwirklichung eines alten Wunschtraumes der Brükkenbauer: in der George-Washington-Brücke über den Hudson-River in New York, die 1931 dem Verkehr übergeben wurde, erbaute O. H. Ammann, ehemaliger Schüler und seit 1930 Ehrendoktor unserer Eidgenössischen Technischen Hochschule, erstmals eine Brücke mit mehr als tausend Meter Spannweite und verdoppelte damit die bis dahin erreichten grössten Spannweiten. Die George-Washington-Brücke, die einen neuen Abschnitt in der Geschichte des Brückenbaues einleitet, ist aber nicht in erster Linie wegen ihrer gewaltigen Abmessungen ein für alle Zukunft bedeutendes Brückenbauwerk, sondern ihre Ausführung ist besonders als geistige Leistung zu

bewerten. Erst durch die genaue Kenntnis des Kräftespiels in weitgespannten schweren Seilen unter beweglicher Belastung und durch den Mut zur konsequenten Verwirklichung dieser Erkenntnisse wurde der Bau einer Brücke mit einer freien Spannweite von 3500 Fuss oder 1067 Metern mit wirtschaftlich tragbarem Kostenaufwand möglich.

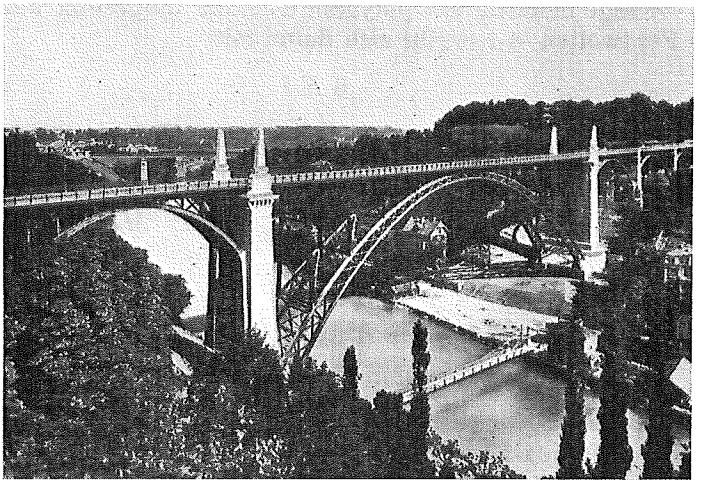

Abb. 1
Kornhausbrücke, Bern. Erstellt 1898, Bogen, Spannweite 115 m.

Die Entwicklung des Massivbrückenbaues ist charakterisiert durch die Überschreitung der Spannweitgrenze von 100 Metern durch weitgespannte Bogenbrücken in Eisenbeton, die bei uns erstmals im Jahre 1914 in der Langwieserbrücke der Chur—Arosa-Bahn, erbaut durch die Firma Züblin & Co. AG., Zürich, erreicht wurde, während im Stahlbrückenbau schon die 1898 erstellte Kornhausbrücke über die Aare in Bern eine Spannweite von 115 Metern besitzt. Es folgten, um wenigstens die wichtigsten dieser Bauwerke zu nennen, die Hundwilertobelbrücke, 1925, mit 105 Metern Spannweite, die Aarebrücke der SBB in Bern, 1940, mit 150 Metern, und die Fürstenlandbrücke bei St. Gallen, 1940, mit 134 Metern Spannweite. Parallel mit dieser baulichen Entwicklung ist der Ausbau der Theorie des eingespannten Bogens zu verzeichnen, der mit den Namen der ETH.-Professoren Carl Culmann, Wilhelm Ritter, Emil Mörsch und Max Ritter verbunden ist.

In neuester Zeit sucht man die Abmessungen von Eisenbetonbauteilen zu verkleinern und ihre Rissesicherheit zu vergrössern durch die Anwendung des vorgespannten Eisenbetons, bei dem der Beton durch vorgespannte dünne Stahleinlagen hoher Festigkeit unter Druck gesetzt wird. Die Anwendung beschränkt sich vorläufig auf fabrikmässig hergestellte Bauteile mit beschränkten Abmessungen.

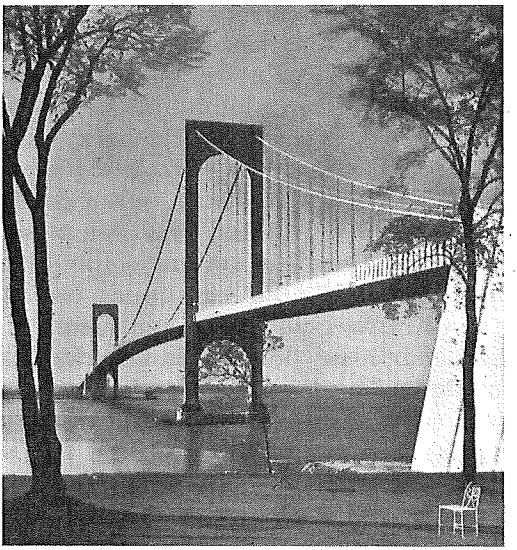

Abb. 2
Bronx-Whitestone-Brücke in New York. Erbaut 1937 durch O. H. Ammann. Hängebrücke mit 701 m Spannweite.

Hydraulik und Wasserbau

Während im achtzehnten Jahrhundert die theoretische Hydraulik durch die grundlegenden Arbeiten von Daniel Bernoulli (1700—1782, «Hydrodynamica, sive de viribus et motibus fluidorum commentarii», Basel 1738) und Leonhard Euler (1707—1783) recht eigentlich begründet wurde, hat die Schweiz im neunzehnten Jahrhundert zu ihrem Ausbau nichts Wesentliches beigetragen. Eine Förderung der technischen Hydraulik durch schweizerische Forschungsarbeiten setzt erst in unserem Jahrhundert ein; dabei sind die Arbeiten von J. Michaud (1903) und O. Schnyder (1929 ff.) über Druckstösse und von F. Prašil (1908) über die Theorie des Wasserschlosses zu erwähnen.

Einen grossen Aufschwung nahm die hydraulische Forschung durch die im Jahre 1930 gegründete Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH. unter der Leitung von E. Meyer-Peter. Den an dieser Anstalt durchgeführten Untersuchungen ist es zu einem grossen Teil zu verdanken, wenn heute die wichtigsten im Flussbau und Kraftwerksbau vorkommenden hydraulischen Aufgaben nicht mehr nur empirisch mit Hilfe fragwürdiger Koeffizienten, sondern auf technisch-wissenschaftlicher Grundlage gelöst werden können. Die Aufgaben der Hydraulik enthalten oft so viele Unbekannte, dass eine rein rechnerische Lösung unmöglich ist; es muss der Modellversuch beigezogen werden. Eine der ersten Aufgaben der neuen Versuchs-

anstalt war die Schaffung einer eigenen Versuchsmethodik und die Abklärung der Gesetze der mechanischen Ähnlichkeit. Es darf heute festgestellt werden, dass es E. MEYER-PETER, unterstützt von seinen Schülern H. FAVRE, CH. JAEGER u. a., gelungen ist, in der Methodik des hydraulischen Versuchswesens eine eigene Zürcher Schule aufzubauen. Es liegt in den Bedürfnissen der Baupraxis begründet, dass die Hauptaufgaben der Versuchsanstalt sich auf Fragen des Flussbaues, so auf das Problem der permanenten und nicht permanenten Abflüsse, auf den Geschiebetrieb und auf die Kolkwirkung bezogen. Daneben verlangte die Praxis aber auch die Lösung hydraulischer Fragen, die die Ausbildung von Einzelteilen oder die Gesamtanordnung von Kraftwerksbauten beeinflussen.

Ebenfalls auf die Bedürfnisse der Praxis zurückzuführen ist die in den letzten Jahren festzustellende intensivere Beschäftigung mit den Problemen der Erdbaumechanik (Grundbau) und der Schneemechanik (Lawinenverbauungen); das von R. HAEFELI geleitete Institut für Erdbaumechanik ist der Versuchsanstalt für Wasserbau angegliedert.

Von den praktischen Aufgaben des Wasserbaues sind in der Schweiz in erster Linie die Flusskorrektionen und die Kraftwerksbauten zu erwähnen.

Flusskorrektionen haben den Zweck, den Flüssen durch geeignete Form des Gerinnes eine genügende Schleppkraft zum Abtransport des Geschiebes zu sichern, damit Auflandungen und, als Folge davon, Überschwemmungen bei Hochwasser vermieden werden können. Eine grosse Bauaufgabe dieser Art, die im letzten Jahrhundert durchgeführt wurde, war wohl die Juragewässerkorrektion nach dem Projekt von LA NICCA (1842), der eine direkte Ableitung der Aare von Aarberg in den Bielersee vorsah, wobei dieser zur Ablagerung des Geschiebes dienen sollte.

Die bedeutendste Flussverbauung, die vor über hundert Jahren begonnen, auch heute noch nicht zum Abschluss gelangt ist, stellt jedoch die Rheinkorrektion dar. Die beständig zunehmende Erhöhung des Flussbettes durch immer neu zugeführtes Geschiebe aus dem Einzugsgebiet war eine Hauptursache ständiger Überschwemmungsgefahr, die nur durch gleichzeitige Korrektion des Flusslaufes und durch Wildbachverbauungen im Einzugsgebiet gebannt werden kann. Eine weitere Gefährdung durch Rückstau und Hinterspülung der Dämme stellten ferner die zahlreichen Mündungen von Binnengewässern dar; diese Gefahr wurde durch Sammlung dieser Gewässer in Binnenkanälen (Werdenberger und Rheintaler Binnenkanal) behoben. Die internationale Rheinregulierung von der Illmündung bis zum Bodensee wurde auf Grund einer Vereinbarung zwischen Österreich und der Schweiz 1895 begonnen und führte zu einer Verkürzung des Rheinlaufs durch den Fussacher-Durchstich (1900) und den Diepoldsauer Durchstich (1923) um rund 10 km. Bis 1934 beliefen sich die Kosten dieser Arbeiten auf rund 38 Millionen Franken. Leider ist der Erfolg dieser Arbeiten noch kein vollständiger; es müssen immer noch grosse Sohlenerhöhungen infolge Geschiebeablagerung festgestellt werden. Eine Sanierung der Verhältnisse wird durch talabwärts zunehmende Verengung des Gerinnes zur

Vergrösserung der Schleppkraft im Zusammenhang mit Verbauungen im Einzugsgebiet anzustreben sein.

Die Ausnützung der Wasserkräfte im grossen durch den Bau von Kraftwerken setzte ein, nachdem leistungsfähige Mittel zur Umwandlung von mechanischer Energie in elektrische (Dynamo von Siemens, 1867) und zur elektrischen Kraftübertragung auf grosse Entfernungen (Maschinenfabrik Oerlikon: Übertragungsleitung von 170 km Länge an der Ausstellung von Frankfurt 1891, C. E. L. Brown, E. Huber-Stockar) gefunden waren. Als erste grössere Kraftwerke der Schweiz sind vor der Jahrhundertwende die Elektrizitätswerke Wynau-Bern (1895) mit 4000 PS, Chèvres-Genf (1896) mit 7500 PS und Rheinfelden (1895—98) mit 16 800 PS zu erwähnen, denen die Inbetriebnahme der neueren Grosskraftwerke in mehr oder weniger regelmässigen Zeitabständen folgte. Besondere bauliche Aufgaben bilden bei Hochdruckkraftwerken mit Speichermöglichkeit (Winterenergie) ausser den Druckleitungen und Druckstollen die Talsperren, die in Form von Schwergewichts- oder von Bogenstaumauern oder auch in Form von Erddämmen wesentliche Bestandteile der Anlagen darstellen.

Im Gebiete des Wasserbaues ist endlich auch die Schiffahrt zu erwähnen. Seit 1918 hat die schweizerische Schiffahrt auf dem internationalen Rhein stark zugenommen und der Rheinhafen Basel hat sich zu einem grossen Binnenhafen entwickelt. Heute liegen auch teilweise baureife Projekte für die Schiffbarmachung des Rheins von Basel bis zum Bodensee und für den transhelvetischen Kanal (Rhone-Rhein-Kanal) vor.

Strassen- und Eisenbahnbau

Die vielversprechende Entwicklung des Strassenbaues und besonders des Alpenstrassenbaues, die zu Beginn des letzten Jahrhunderts bei uns mit der Simplonstrasse, deren Bau von Napoleon angeordnet worden war, ihren stolzen Anfang nahm, wurde durch die Erfindung der Eisenbahn jäh abgebremst. Der Bau von Eisenbahnlinien begann in der Schweiz mit der 1847, also verhältnismässig spät eröffneten «Spanischbrötlibahn» von Zürich nach Baden. Die sprunghafte Entwicklung des Eisenbahnwesens in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts überzog unser Land mit einem dichten Eisenbahnnetz und befruchtete das Bauwesen in vorher nie gekanntem Ausmass (Stahlbrückenbau, Tunnelbau, technisches Unterrichtswesen, technische Zeitschriften: «Die Eisenbahn» 1874, weitergeführt von 1883 an in der «Schweizerischen Bauzeitung»). Um die Jahrhundertwende zeigten sich gewisse Sättigungserscheinungen; in unserm Jahrhundert sind an bedeutenden neuen Bahnbauten nur noch wenige zu nennen, so die Linien Chur—St. Moritz (1904) und Chur—Disentis (1912) der Rhätischen Bahn, der Simplontunnel von fast 20 km Länge (Tunnel I 1906, Tunnel II 1922), die Lötschbergbahn (1913) und etwa noch die Hauensteinbasislinie (1914). Eine besondere Stellung nimmt die Jungfraubahn (1912) mit ihrer Endstation auf 3457 m Höhe ein. In den letzten Jahrzehnten führten die Steigerung von Nutzlasten, Fahr-

geschwindigkeit und Verkehrsdichte zu einer Verstärkung des Eisenbahnoberbaues und zum Ausbau auf Doppelspur. Die technische und volkswirtschaftliche Grossleistung der Elektrifikation der Bundesbahnen berührte, abgesehen vom Kraftwerksbau, das Bauingenieurwesen nur indirekt.

Nach dem ersten Weltkrieg erwuchs dem Eisenbahnverkehr im Motorfahrzeug ein mächtiger Konkurrent, der vielfach schneller und auch billiger beförderte als die Bahn. Die hohen Fahrgeschwindigkeiten des modernen Strassenverkehrs erfordern gegenüber früher Strassen mit flüssigerer Linienführung und besseren Sichtweiten, aber auch Strassenoberflächen (Fahrbahnen) grösserer Festigkeit. So bewegt sich denn auch die heutige Strassenbauwissenschaft in zwei Richtungen: einmal in der wissenschaftlichen Begründung der Strassenplanung, dann aber besonders auch in der Anpassung des eigentlichen Strassenkörpers an die Beanspruchungen durch den motorisierten Verkehr. Die Untersuchungen über die Reibungsverhältnisse zwischen Rad und Fahrbahn, die besonders im Institut für Strassenbau an der ETH. unter E. Thomann systematisch durchgeführt werden, bilden die wissenschaftliche Grundlage für den zweckmässigsten Aufbau des Strassenkörpers.

Schlussbemerkungen

Es ist eine Besonderheit der Ingenieurwissenschaften, dass fehlerhafte Berechnungen und Ausführungen zu Unglücksfällen und Katastrophen führen können. Die technische Entwicklung ist mit der Verantwortung für Menschenleben und Sachwerte verbunden, und es sind denn auch in der Geschichte der Technik und wohl am meisten in der Geschichte des Brückenbaues, dieser vielleicht schönsten Ausdrucksform der Bautechnik, immer wieder Rückschläge zu verzeichnen. So hat schon Louis Navier vor 120 Jahren geschrieben: «Entreprendre un grand ouvrage et surtout un ouvrage d'un genre nouveau, c'est faire un essai; c'est engager avec les forces naturelles une lutte dont on n'est point assuré de sortir vainqueur dès la première attaque.» Alle Rückschläge aber, so bedauerlich sie an sich auch sind, waren stets Anlass zu einer besseren Erkenntnis der Kräfte der Natur und damit zum Fortschritt und zur Weiterentwicklung des Bauwesens. Es ist nicht nur in den letzten Jahrzehnten durch die Überwindung der Spannweite von 1000 Metern eine neue Periode im Brückenbau eingeleitet worden, es sind nicht nur erfolgreiche Bemühungen um eine bessere Gestaltung der Ingenieurbauwerke im Sinne einer einfachen, klaren und überzeugenden Gliederung festzustellen, sondern wir stehen im Zusammenhang damit auch am Beginn einer weiteren Entwicklungsstufe, die uns durch eine freiere und umfassendere Erkenntnis des Kräftespiels in unsern Tragwerken zu immer vollkommeneren Bauwerken führen wird.