Zeitschrift: Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 52 (1960)
Heft: 4

Artikel: Überischt über die Entwicklung der Hydraulik und der Bodenmechanik
Autor: Meyer-Peter, E.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-921740

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: 23.08.2025

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

Übersicht über die Entwicklung der Hydraulik und der Bodenmechanik

Prof. Dr. h. c. E. Meyer-Peter und Prof. G. Schnitter

DK 532.51 + 624.131

A. HYDRAULIK

I. Stand um die Jahrhundertwende

1. 15.—17. Jahrhundert

Die großartigen Leistungen der Ingenieure im Altertum waren im Mittelalter vergessen worden. Es bedurfte der geistigen Umwälzung der Renaissance, um das Studium der Bewegung des Wassers neu zu beleben. In diese Zeit fällt auch die «Geburt» des wasserbaulichen Versuchswesens.

Leonardo da Vinci (1453—1519) behandelt den Ausfluß aus Öffnungen, den Überfall, die Wirbelbildung bei Querschnittserweiterungen, die Kontinuität des Abflusses, die Fließwiderstände und die damit verbundene Geschwindigkeitsverteilung. Erst *Torricelli* (1608—1647) gibt das Ausflußgesetz durch Öffnungen $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$

Guglielmini (1655—1710) erklärt die gleichförmige Fließgeschwindigkeit in geneigter Rinne durch die Wandreibung. Im ganzen gesehen sind aber die Fortschritte der Hydraulik im 17. Jahrhundert recht bescheiden.

Dagegen ist diese Periode durch die Entwicklung der mathematischen Hilfsmittel bedeutend und durch die Namen *Descartes, Pascal, Huygens* und vor allem *Newton* gekennzeichnet.

Newton (1646—1716) ist in der Mechanik durch die Begriffe Masse, Beschleunigung, Trägheit, lebendige Kraft, Impuls und vor allem durch das Gravitationsgesetz bahnbrechend. In der Mathematik teilt er mit Leibniz den Ruhm der Erfindung der Infinitesimalrechnung. In der Hydraulik ist er insbesondere durch den Ansatz $a \cdot v + b \cdot v^2$ als maßgebend für den Fließwiderstand bekannt. Er beschäftigt sich aber auch mit den Wellen und der Bewegung von Schiffen in Kanälen.

Das 18. Jahrhundert ist wiederum experimentell und mathematisch eine Periode des Fortschrittes.

2. 18. Jahrhundert

Die Zeitgenossen: *D. Bernoulli* (1700—1782), *Euler* (1707—1783), *Clairaut* (1713—1765) und *d'Alembert* (1717—1783) verkörpern diesen Fortschritt.

Bernoulli veröffentlicht 1738 seine «Hydrodynamica» und behandelt unter anderem das Gleichgewicht, den Ausfluß unter konstantem Druck, Erhaltung und Verlust von Energie, hydraulische Maschinen. *Clairaut* wurde berühmt durch seine Abhandlung «La figure de la terre tirée des principes de l'hydrodynamique» (1743), *d'Alembert* durch den «Traité de dynamique». (Das *d'Alembertsche* Prinzip [1743] sagt aus, daß die Reibungskräfte zwischen den Molekülen sich gegenseitig aufheben, so daß nur die Reibung an der Grenze des betrachteten Punkthaufens zu berücksichtigen ist). Hierauf basierend folgen die *Eulerschen* Gleichungen 1755.

Mit diesen drei Gleichungen und der Kontinuitätsbedingung, sowie einer Aussage über das elastische Verhalten der Flüssigkeiten, sind die zur Lösung bestimmter Aufgaben erforderlichen fünf Gleichungen gegeben. Sie beziehen sich vorläufig auf ideale Flüssigkeiten. Erst *Navier* (1785—1836) bringt in «Mémoire sur les lois du mouvement des fluides» ein ergänzendes Glied zu den Eulerschen Gleichungen hinzu, das den Rückstoß «Repulsion» der Moleküle gegeneinander enthalten soll. Darin ist vorläufig ein unbekannter Koeffizient eingeführt, der erst später durch *Stokes* (1819—1903) als die Viskosität der Flüssigkeit erkannt wurde.

Hieraus ergaben sich die *Navier-Stokeschen* Gleichungen. Aus den *Eulerschen* Gleichungen leitet sich die «Theorem von *Bernoulli*» genannte Druckgleichung für stationäre Strömung einer nicht viskosen Flüssigkeit ab:

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = \text{konst.}$$

Fortschritte in der mathematischen Behandlung der Bewegung der Flüssigkeiten sind *Lagrange* (1736—1813) und *Laplace* (1749—1827) zu verdanken. Lagrange führt die Begriffe des Geschwindigkeitspotentials und der Stromfunktion ein, die heute in der Hydraulik zur Konstruktion von Strömungsnetzen gebraucht werden. Speziell das Gebiet der Grundwasserströmung, das im laminaren Bereich dem Darcyschen Gesetz $v = k \cdot J$ gehorcht, ist hiezu geeignet (Prašil schlug dann 1913 die graphische Behandlung mit dem Rechtecksnetz vor). Von Lagrange stammt auch die Angabe der Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Oberflächenwellen bei großer Wassertiefe: $w = \sqrt{g \cdot h}$. *Gerstner* (1756—1832) entwickelte in seiner Theorie der Wellen die Trochoidenform.

3. 18.—19. Jahrhundert

Auf dem Gebiete der praktischen Hydraulik sind, unter Anwendung besserer Meßmethoden wie *Pitot*-Rohr und *Woltmannsche* Flügel nunmehr auch wesentliche Fortschritte festzustellen.

Chézy (1718—1798) entwickelte seine Formel für stationären Abfluß in zylindrischen Flußgerinnen

$$v = c\sqrt{R \cdot J},$$

$$\text{worin } R = \frac{F}{P} \text{ als Quotient } \frac{\text{Fläche}}{\text{Umfang}} = \text{Profilradius}$$

definiert ist. J ist das Gefälle, c soll eine Konstante sein. Abflußgesetze sind auch von anderen Autoren vorgeschlagen (z. B. *Dubuat, Eytelwein*).

Die stationäre ungleichförmige Bewegung wird von *Venturi* (1746—1824) behandelt (Venturi-Rohr zur Wassermessung). Er macht einen Ansatz zur Berechnung des «Wassersprungs». Die Erklärung dieser Erscheinung wird heute *Bidone* (1781—1839) zugeschrieben, der insbesondere in einem Modell den «mascaret» (Sprungwelle) untersucht hat. *Bresse* (1822—1883) gelingt die Integration der Gleichung des stationären ungleichförmigen Abflusses im prismatischen Gerinne. Die sechs verschiedenen möglichen Längenprofile des Wasserspiegels (bei konstantem Gefälle des Kanals) werden erkannt, jedoch noch ohne den Hinweis auf eine kritische Tiefe.

Poiseuille (1799—1869) unternimmt zahlreiche Messungen der Bewegung zäher Flüssigkeiten in Kapillarröhrchen. Das Resultat ist der Ausdruck für die Zähig-

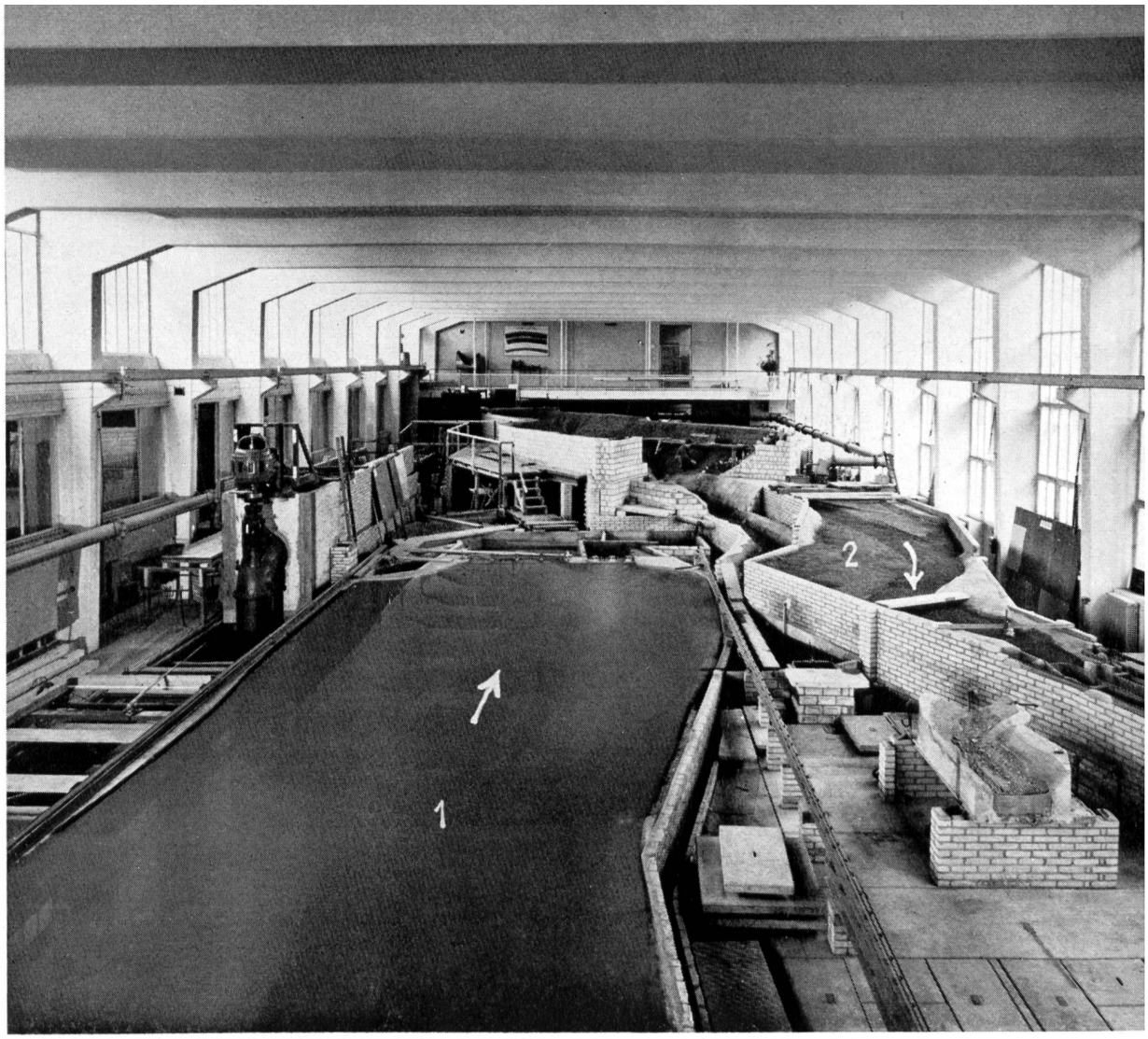


Bild 1 Teilansicht der im Jahre 1952 eröffneten Versuchshalle
1 Kraftwerk Klingnau: Verbesserung der Einlaufverhältnisse zum Maschinenhaus, Modellmaßstab 1:60
2 Averser Rhein, «Spülfassung» (Ablagerung des Geschiebes im Stauraum, periodische Spülung)

keit η für Wasser

$$\eta = \frac{0{,}00001814}{1 + 0{,}0337\ T + 0{,}00022\ T^2}\ \mathrm{gr \cdot s \cdot cm^{-2}}$$

T = Temperatur

Nach *Newton* ist der Reibungswiderstand $= \eta \cdot \frac{dv}{dn}$

Darcy (1803—1858) kommt auf Grund zahlreicher Messungen in Rohrleitungen zum Schluß, daß bei steigenden Geschwindigkeiten der Einfluß des Beiwertes des ersten Gliedes im Newtonschen Ansatz $a \cdot v + b \cdot v^2$ abnimmt und derjenige des zweiten zunimmt, d. h. er kommt auf das quadratische Widerstandsgesetz. Für Filterströmung setzt Darcy $v = k \cdot J$ und $a = \frac{1}{k}$, $b = 0$.

4. 19. Jahrhundert — Jahrhundertwende

Bazin (1829—1917), Mitarbeiter von Darcy, beendigt dessen Versuche und veröffentlicht 1865 seine Formel für den Koeffizienten c in der Gleichung von ~~Bazin~~ Chézy:

$$c = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}} \qquad (\gamma = \text{Rauhigkeitskoeffizient})$$

Ihm sind auch ausgezeichnete Geschwindigkeitsmessungen zu verdanken unter Aufzeichnung der Isotachen in rechteckigen Kanälen. Ferner ist nach ihm die Formel für den belüfteten Überfall benannt. Auf Grund älterer sowie eigener Messungen konnte — unter Berücksichtigung von Resultaten von *Humphreys* und *Abbot* am Mississippi — 1869 die Formel von *Ganguillet* und *Kutter* begründet werden:

$$c = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0{,}00155}{J}}{1 + \left(23 + \frac{0{,}00155}{J}\right) \cdot \frac{n}{\sqrt{R}}}$$

mit n als Rauhigkeitskoeffizient

Beide Formeln fanden eine sehr weite Verbreitung. Die komplizierte Form der schweizerischen Formel ist durch die Einbeziehung der Mississippimessungen mit Gefällen weit unter 1 ‰ bedingt. Für Gebirgsgewässer spielt das Glied $\frac{0{,}00155}{J}$ keine Rolle.

Gauckler veröffentlicht 1886 eine Potenzformel, $v = k \cdot R^{\mu} \cdot J^{\nu}$, mit zum Teil variablen Exponenten.

Manning folgt 1889 mit der Formel $v = k \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2}$. Keine von ihnen scheint eine weite Verbreitung erlangt zu haben.

Aus dem Ende des 19. Jahrhunderts stammen flußbauliche Modellversuche von *Fargue* (1827—1910), der auch Regeln für den Flußbau aufstellt.

Auf Grund des von *Reech* (1805—1880) stammenden Ähnlichkeitsgesetzes arbeitet auch *Froude* (1810—1879). Er scheint bei der Untersuchung des Schiffswiderstandes in einem Schleppkanal bereits den Unterschied zwischen dem von der Schwere und dem von der Zähigkeit herrührenden Widerstand gefühlt zu haben. Nach Froude wird bekanntlich das Ähnlichkeitsgesetz benannt, das unter der Annahme gilt, daß nur die Beschleunigungskräfte wirken. Es lautet:

$$\frac{v}{\sqrt{g \cdot l}} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \text{ (Froudesche Zahl).}$$

Für die weitere Entwicklung der Hydraulik ist ohne Zweifel *Boussinesq* (1842—1929) maßgebend, vor allem mit seinem «Essai sur la théorie des eaux courantes» (1872). Bei der Bewegung in Haarröhren verändern sich die Geschwindigkeiten allmählich entsprechend den Formeln von *Navier*, vorausgesetzt, daß man die Geschwindigkeit an der benetzten Grenze gleich Null setzt. Bei offenen Kanälen oder größeren Rohrdurchmessern ist man dagegen genötigt, die Geschwindigkeit von der Wand aus als rasch oder plötzlich ändernd anzunehmen von einem Punkt zum andern, so daß eine ganz andere Reibung entsteht als beim ersten Fall. Es handelt sich nicht um eine aneinandergleitende Bewegung der Teilchen, sondern um Wirbelbildungen.

Reynolds (1842—1912) findet durch zahlreiche Versuche, daß die Grenze zwischen laminarer und turbulenter Bewegung durch eine dimensionslose Größe bestimmt ist von der Form

$$Re = v \cdot d \cdot \frac{\varrho}{\mu} = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

ϱ = Dichte
d = Durchmesser
μ = Zähigkeit
ν = kinetische Zähigkeit

Reynoldssche Zahl:
Grenzwert Re = 1900 bis 1000

II. Entwicklung der Hydraulik seit 1900

Es sei hier ausdrücklich erwähnt, daß die Hydrodynamik oder Strömungslehre im Rahmen dieses Aufsatzes nicht behandelt werden kann.

Schon um die Jahrhundertwende waren die wichtigsten Grundgesetze der Hydraulik bekannt, man kann aber nicht sagen, daß sie allgemein angewandt wurden. Man baute Wasserkraftanlagen und Hafenanlagen, regulierte Talflüsse und verbaute Wildbäche. Das Hauptinstrument dabei waren aber nicht die Lehren der Hydraulik sondern die «Erfahrung». Man muß zugeben, daß die daraus hervorgehenden Werke im allgemeinen ihren Zweck erfüllten. Mit der Entwicklung des Bedarfes an elektrischer Energie wuchsen aber die Anforderungen bezüglich einer schärferen Berechnung der Energieerzeugung und der Energieverluste.

Charakteristisch für die Hydraulik des 19. Jahrhundert ist, daß alle theoretischen Entwicklungen sich auf laminare Strömung beziehen. Während also die der Mechanik entlehnten Beziehungen volle Gültigkeit haben, muß der Einfluß des Widerstandes zufolge der an der Wand erzeugten Wirbel empirisch bestimmt werden.

Für die stationäre Bewegung in prismatischen Gerinnen wurde 1923 von *A. Strickler* auf Grund eigener Versuche in Kanälen und Rohren sowie zahlreicher fremder Messungen die von Manning vorgeschlagene Formel

$$v = k \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2}$$

weitgehend bestätigt. Sie wurde ihrer Einfachheit wegen sehr bald, wenn nicht allgemein, so doch weit herum angewandt. Allerdings wird bei Rohrleitungen sehr häufig die in der Hydrodynamik gebrauchte «allgemeine» Formel

$$J = \lambda \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{1}{D} \text{ verwendet.}$$

Hierin ist nach *Prandtl — Nikuradse:*
im laminaren Bereich: λ = Funktion von Re

für glatte Rohre im turbulenten Bereich:
λ = Funktion von Re

für rauhe Rohre im turbulenten Bereich:
λ = Funktion von Re und relativer Rauhigkeit $\frac{s}{r}$

r = Rohrradius, s = absolute Wandrauhigkeit

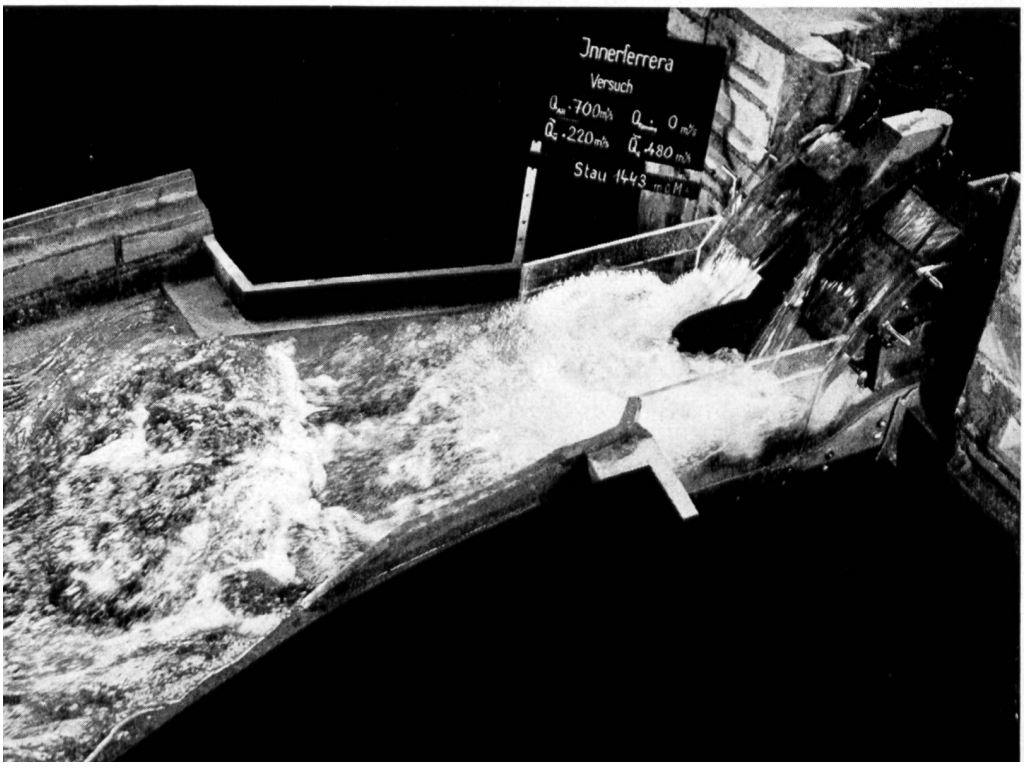


Bild 2
Stauwehr Innerferrera (Kraftwerkgruppe Valle di Lei — Hinterrhein).
Das «100jährige Hochwasser» mit 700 m³/s soll beim Stau auf Kote 1443 m ü. M. bei einer geschlossenen Grundablaßöffnung abgeführt werden (Photo). Untersuchung der Spülmöglichkeit des Stauraumes. Geschiebefunktion entsprechend dem bekannten kleinsten Gefälle des Baches. Modellmaßstab 1:50.

Bei ungleichförmigen Bewegungen in nicht prismatischen Kanälen kann die Integration nach *Bresse* nicht verwendet werden. Sie ist schrittweise durchzuführen, so daß für eine gewählte Strecke ΔL der Wasserspiegelunterschied

$$\Delta z = \frac{v_m^2 \cdot \Delta L}{k^2 \cdot R_m^{4/3}} + \beta \frac{v_u^2 - v_o^2}{2g} \text{ wird.}$$

Man rechnet also mit Mittelwerten für Geschwindigkeit und Profilradius und Querschnitt. Wenn $v_u - v_o$ negativ, wird der Borda-Carnotsche Verlust berücksichtigt: $\beta \cong 2/3$; für beschleunigte Bewegung $\beta = 1$. Die Einführung des Begriffes «*Energielinie*» im Gegensatz zu Drucklinie bzw. Wasserspiegel zeigt sich als unentbehrliches Mittel für die Berechnung in etwas komplizierten Fällen.

Die kritische Tiefe als Grenze zwischen mouvement «tranquille» und «torrentiel» (strömen und schießen) ist seit *de St. Venant* bekannt und kann nach Bresse und Chézy berechnet werden zu

$$h_k = h_o \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot v^2 \cdot J_s}{g}} \quad \text{oder } h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot Q^2}{b^2 \cdot g}} \quad \text{(Rechtecksprofil)}$$

und ist definiert als diejenige Wassertiefe, für die bei gegebener Energielinienhöhe der Durchfluß ein Maximum ist.

Die klassischen Formeln sind im allgemeinen nur für einen Stromfaden gültig. Bei Anwendung derselben für Rohre oder Kanäle mit endlichen Querschnitten muß streng genommen der Mittelwert der Geschwindigkeitshöhe $\frac{v_m^2}{2g}$ durch Anbringung eines Faktors $\alpha > 1$ korrigiert werden, wobei

$$\alpha = \frac{\int\int v^3 \cdot df}{v_m^3 F} \quad \left(\text{analog für Impulssatz } \alpha' = \frac{\int\int v^2 \cdot df}{v_m^2 F}\right).$$

Da man die Geschwindigkeitsverteilung gewöhnlich nicht kennt, wird in der Praxis $\alpha = 1$ gesetzt.

Unter Anwendung des Parameters $\sqrt[3]{\frac{v^2 \cdot J_s}{g}}$ von *Bresse* läßt sich zeigen, daß für $h_k > h_o \ldots v > \sqrt{g \cdot h_o}$ und für $h_k < h_o \ldots v < \sqrt{g \cdot h_o}$

Da $\sqrt{g \cdot h_o}$ die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen in offenen Kanälen ist, bedeutet also die kritische Geschwindigkeit die Grenze zweier Strömungsarten über bzw. unter der Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit. Es besteht damit eine Analogie mit der Machschen Zahl.

Die Berechnung des Wassersprungs erfolgt mit dem Impulssatz für zwei Querschnitte oberhalb und unterhalb des Sprungs

$$\gamma \cdot b \frac{h_1^2}{2} + \frac{\gamma}{g} \frac{Q^2}{bh_1} = \gamma \cdot b \frac{h_2^2}{2} + \frac{\gamma}{g} \frac{Q^2}{bh_2}$$

Man berechnet bei gegebenen Werten von Q, b_1, h_1 die Wasserspiegelhöhe nach dem Sprung h_2.

Koch hat für die Größe $\gamma \cdot b \frac{h^2}{2} + \frac{\gamma}{g} Q \cdot v$ den Ausdruck Stützkraft eingeführt.

Das Minimum der Stützkraft für gegebene Werte von Q und b liegt bei der kritischen Tiefe h_k.

Plötzliche Querschnittserweiterungen sind mit Energieverlusten verbunden, die ebenfalls mit dem Impulssatz berechnet werden in Verbindung mit dem Bernoullischen Theorem. Dieser unter dem Namen Borda'scher Energieverlust bekannte Wert ist in m Druckhöhe ausgedrückt

$$\frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}$$

Das Bernoullische Theorem muß nun unter Berücksichtigung der Energieverluste Δz_e geschrieben werden:

$$\frac{v^2}{2_g} + \frac{p}{\gamma} + z + \Delta z_e = \text{konst.}$$

Die Berechnungsmethoden des freien Überfalls und des Ausflusses aus Öffnungen wurden etwas verfeinert durch die Berücksichtigung der Geschwindigkeitshöhe des zufließenden Wassers. Der breite Überfall wird nach *Bélanger* durch Einsetzen der kritischen Tiefe bei der Wehrkrone ohne Zuhilfenahme eines Koeffizienten berechnet. Die Berechnung des unvollkommenen Überfalls nach *Dubuat* ist dagegen immer noch unbefriedigend.

Wasserschloßschwingungen und Druckstoß:

Die Integration der Bewegungs- und Kontinuitätsgleichungen ist durch *Prašil* für ein zylindrisches Wasserschloß und unter Annahme der Proportionalität von Geschwindigkeit und Energieverlust durchgeführt worden. Bei Berücksichtigung der quadratischen Abhängigkeit und namentlich auch bei komplizierten Anordnungen des Wasserschlosses und Systemen von Wasserschlössern muß die Berechnung schrittweise erfolgen. Hiefür sind verschiedene Verfahren vorgeschlagen worden, auch graphische. Es muß immerhin darauf geachtet werden, daß die Zeitintervalle genügend klein sein müssen, wenn nicht eventuelle Gefahren einer Anfachung der Schwingungen übersehen werden sollen. Neuerdings werden Wasserschloßschwingungen immer mehr mittels elektronischer Rechenmaschinen untersucht.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Druckwellen wurde schon von *Joukowsky* angegeben

$$w = \sqrt{\frac{\frac{g}{\gamma}}{\frac{1}{\epsilon} + \frac{D}{d \cdot E}}}$$

mit:

ϵ = Elastizitätsmodul des Wassers
E = Elastizitätsmodul der Rohrwandung
d = Dicke der Rohrwandung
D = Durchmesser des Rohres

Den wichtigsten Beitrag zur Theorie des Druckstoßes leistet *Allievi* (1856—1941). Graphische Berechnungsmethoden stammen von *Bergeron* und *Schnyder*.

Die Entwicklung der Hydraulik seit etwa 1900 ist durch sehr zahlreiche, in der Fachliteratur teils als Einzelaufsätze, teils als Lehrbücher erschienene Beiträge, stark gefördert worden. Es sei hier besonders an die «Hydraulik» von *Ph. Forcheimer* (1930) und die «Technische Hydraulik» von *Ch. Jaeger* (1949) erinnert. Eine vorzügliche Übersicht seit den Anfängen bis zur Mitte dieses Jahrhunderts vermittelt «History of Hydraulics» von *Hunter Rouse*.

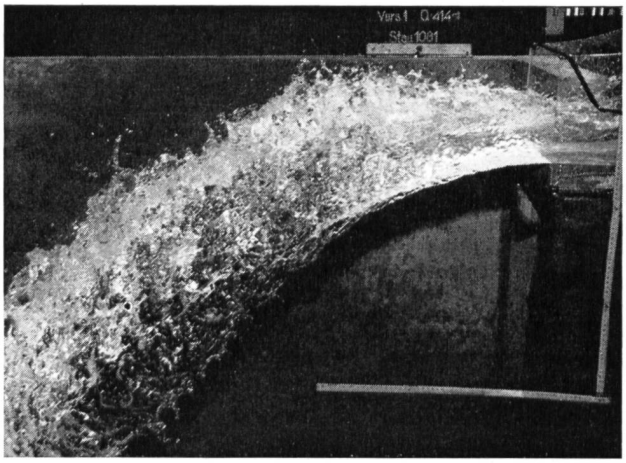


Bild 3
Hochwasserentlastung Bärenburg (Kraftwerkgruppe Valle di Lei — Hinterrhein). Umlaufkanal Länge 50 m, Einlaufkote 1072,62 m ü. M., Absprungkote 1060,60 m ü. M. Bei vollständig geöffneten Stauklappen sollen 445 m³/s abgeleitet werden. Die Photo zeigt die Auflösung des Ausflußstrahles, Belichtung 1/1000 Sekunde. Modellmaßstab 1 : 30.

III. Hydraulisches Versuchswesen

Seit Leonardo da Vinci, den wir im Abschnitt I erwähnten, hydraulische Versuche ausführte, haben zahlreiche Forscher diese Methode angewandt. Dabei erwachte auch das Interesse für die Übertragung der Resultate von Versuchen an kleinen Modellen auf geometrisch ähnliche Ausführungen in Naturgröße. Es ist auch erwähnt worden, daß Reech der erste war, der das später für den Schiffsbau von Froude angewandte Ähnlichkeitsgesetz aussprach. Die Technik der Modellversuche breitete sich aber auch auf andere Gebiete aus, und die ersten Versuche, die in einem hiezu eigens gebauten Institut ausgeführt wurden, haben sich auf den Flußbau ausgedehnt.

Hubert Engels baute in Dresden nach zwei in den Jahren 1891 und 1898 in kleinem Maßstab erstellten «Laboratorien» 1913 sein Flußbaulaboratorium. Kurz darauf folgte *Theodor Rehbock*. Er begann 1901, um dann 1921 ein den damaligen Erfordernissen entsprechendes Flußbaulaboratorium zu erstellen. Die Erfolge beider Pioniere waren groß, und es entstanden sukzessive eine ganze Anzahl ähnlicher Institute in Deutschland, Österreich, Holland, Italien, Rußland, Schweden, Frankreich.

In den USA wurde mit äußerst bescheidenen Mitteln 1887 das erste Laboratorium gegründet, und daraus erwuchs aus kleinen Anfängen auch dort die neue Technik zur Erforschung der hydraulischen Probleme. Am stärksten wurde diese Entwicklung durch *J. R. Freeman* gefördert, auf dessen Initiative zahlreiche amerikanische Ingenieure das wasserbauliche Versuchswesen in Europa studieren konnten. Dazu trug auch die Übersetzung ins Englische des vom Verein deutscher Ingenieure herausgegebenen Buches «Die Wasserbaulaboratorien Europas» (1926) wesentlich bei. (Englische Ausgabe 1929 mit Annex.)

In Zürich konnte nach langen Kämpfen erst 1928 mit dem Bau der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH begonnen werden. Überall, nicht nur in der Schweiz, waren die Widerstände, die zu überwinden waren, von zweierlei Art: einerseits Skepsis gegenüber der Möglichkeit der Übertragung der Resultate auf die Naturgröße, also bezüglich der Ähnlichkeit der Vorgänge in zwei verschiedenen Maßstäben, und andererseits die Überzeugung, daß man die praktisch auftretenden Probleme mit Hilfe der Lehren der Hydraulik allein lösen könne.

Die beiden Ähnlichkeitsgesetze von Froude und Reynolds sind bekanntlich nicht miteinander vereinbar, das erste ist für laminare, das zweite für turbulente Strömung streng gültig. Wie bei der Erwähnung der Froudeschen Zahl bereits angedeutet, war es Froude schon klar, daß dann eine absolute Ähnlichkeit nicht bestehe, wenn gleichzeitig Reibungskräfte und Massenkräfte im Spiel sind. Heute liegen über diese Fragen bedeutend mehr Erfahrungen vor, als in den Anfängen der Versuchstechnik. Es handelt sich zunächst darum, den Modellmaßstab möglichst groß zu wählen (deshalb die Erfordernis großer Versuchsanlagen, eventuell Freiluftanlagen). Sodann muß die Modellrauhigkeit durch Vorversuche «angepaßt» werden. Wenn bei Flüssen mit Geschiebetrieb die Geschiebekorngröße, die ja theoretisch im gleichen Maßstab wie das Modell selbst verkleinert werden sollte, allzu klein wird, kann spezifisch leichteres Material als Geschiebe verwendet werden; auch kann größeres Geschiebe als theoretisch erforderlich gebraucht werden, wobei dann das Gefälle angepaßt werden muß. In jedem Falle sind eingehende Überlegungen — und Erfahrung — erforderlich. Bei Versuchen mit sehr glatten Oberflächen des Prototyps (hydraulische Maschinen) kann z. B. der Wirkungsgrad vom Modell auf die Großausführung an Hand bestehender Formeln «aufgewertet» werden.

Am schwierigsten dürften Modellversuche bei Flachlandflüssen, Tidemündungen und Hafenbauten sein, bei denen sehr feines Geschiebe, periodische Umkehr der Strömungen, Brackwasser mit verschiedenem spezifischem Gewicht und sehr große Abmessungen des zu untersuchenden Gebietes vorliegen. Hier hat sich die Technik stark verzerrter Modelle entwickelt, für die besondere Ähnlichkeitsbedingungen aufgestellt worden sind und wobei man sich wohl mit guten qualitativen Resultaten zufrieden geben muß. Als Geschiebe wird neuerdings feines Material aus Kunststoff mit einem spezifischen Gewicht von $\geq 1{,}05$ g/cm³ verwendet.

Die diesem Aufsatz beigegebenen Bilder 1 bis 11 zeigen einige in den letzten Jahren an der VAWE (Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH) ausgeführte hydraulische Modellversuche.

In der VAWE wurde in mehrjährigen Geschiebetriebversuchen die Frage der Brauchbarkeit des Froudeschen Ähnlichkeitsgesetzes geprüft. Versuche mit Geschieben verschiedener Korngröße und verschiedener spezifischer Gewichte bei verschiedenen hydraulischen Bedingungen wurden ausgeführt. Darnach wurde ein Geschiebetriebgesetz aufgestellt und eine Berechnungsmethode entwickelt zur Ermittlung der erforderlichen Breite des Gerinnes bei gegebener Geschiebefracht und dem Talverlauf angepaßtem Gefälle. Dies führte zum Projekt der internationalen Rheinregulierung: Verengung des bestehenden Gerinnes zwischen Illmündung und Bodensee (25 km). Nachdem die Arbeiten heute praktisch beendigt sind, kann die Methode als für Flußregulierungen geeignet bezeichnet werden.

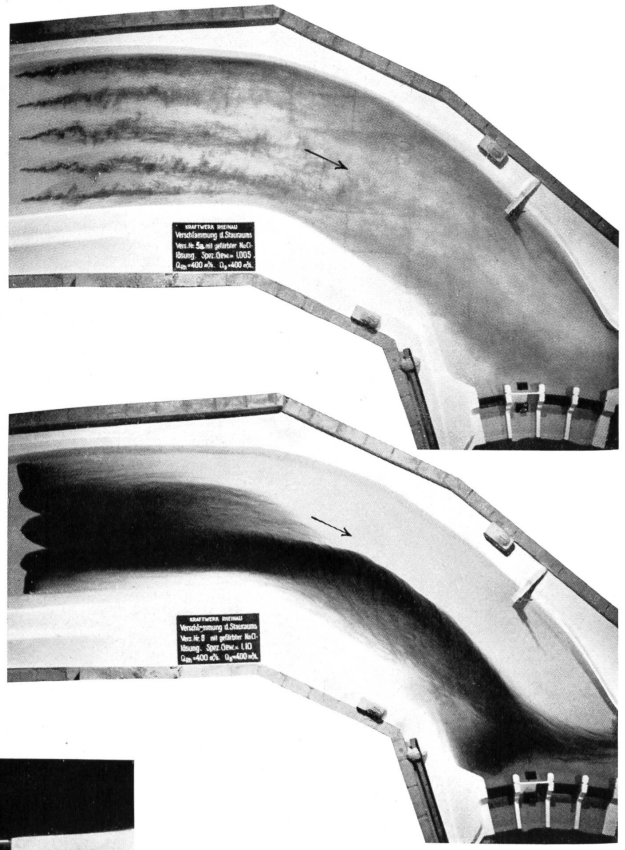


Bild 5
Kraftwerk Rheinau, Sohlströmung bei gleicher Abflußmenge aber verschiedenen spezifischen Gewichten des schlammführenden Wassers.
Oben: $\gamma_s = 1{,}005$ gr/cm³;
unten: $\gamma_s = 1{,}100$ gr/cm³.
Die eingeführte Kochsalzlösung ist mit Kaliumpermanganat rot gefärbt.
Q Rhein = Q Betrieb = 400 m³/s.
Modellmaßstab 1:100.

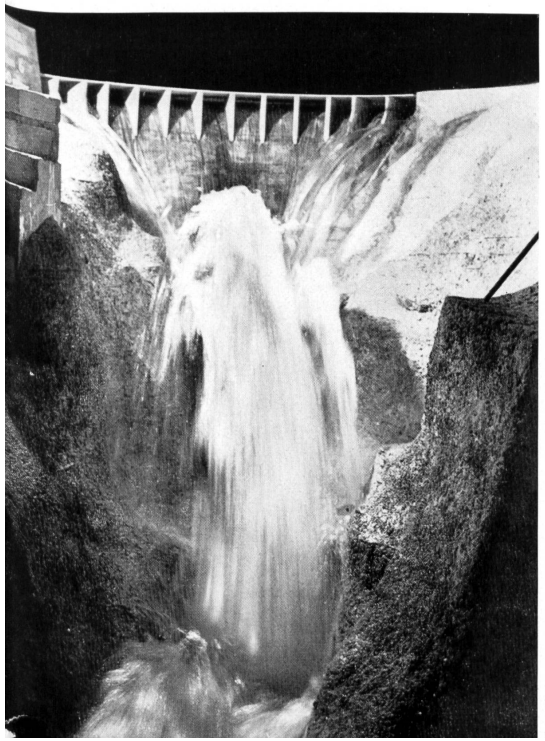


Bild 4
Kraftwerk Verbano, Staumauer Palagnedra, Hochwasserentlastung. Untersuchung der Stellung der Brückenpfeiler zwecks Konzentration des Strahles nach der Talachse.
Belichtung 1/100 Sekunde. Q = 450 m³/s.
Modellmaßstab 1:50

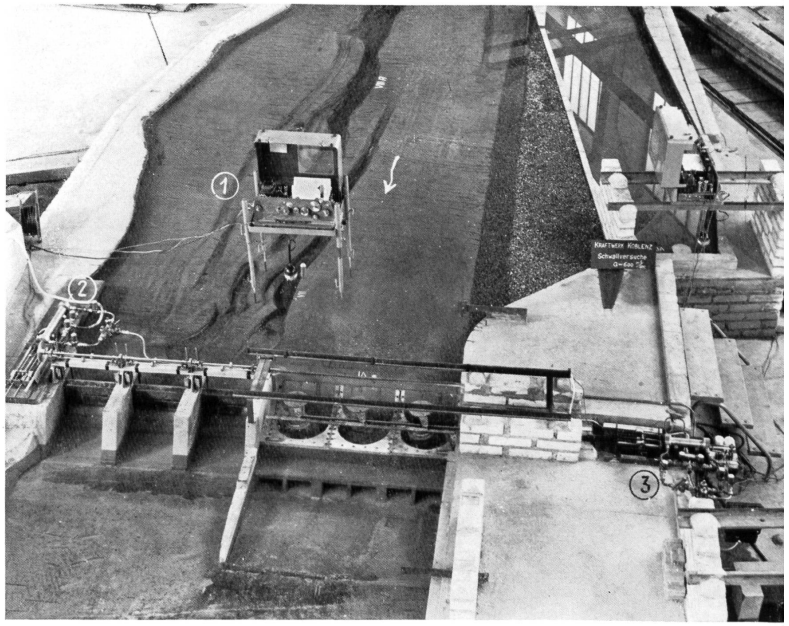
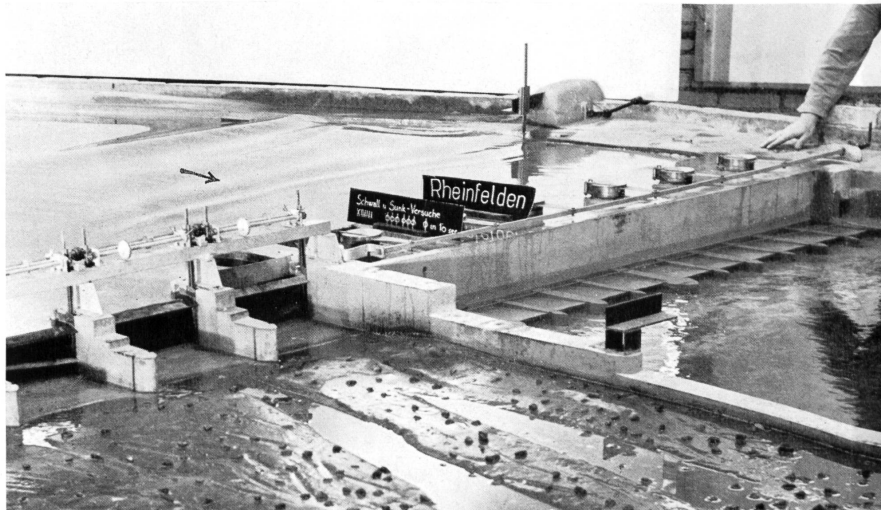


Bild 6 Kraftwerk Koblenz, Modellansicht. Maschinenhaus und Wehr vom Unterwasser aus gesehen. U. a. Prüfung der Einlaufverhältnisse zu den Turbinen. Die Photo zeigt beidseitig des Wehres und Maschinenhauses die Servosteuerungen der Schützen und der Turbinen zwecks Nachbildung von Schwallerscheinungen bei Öffnen und Schließen der Maschinen. Im Oberwasser elektronischer Limnigraph. Modellmaßstab 1 : 60.

Bild 7 Kraftwerk Rheinfelden. Standort des neuen Kraftwerkes 200 m flußabwärts des bestehenden Wehres; Überprüfung des Neubauprojektes auch hinsichtlich des Bauprogrammes. Die Photo zeigt einen Schwallversuch bei plötzlichem Schließen der Turbinen mit Q = 1200 m³/s. Modellmaßstab 1:70.



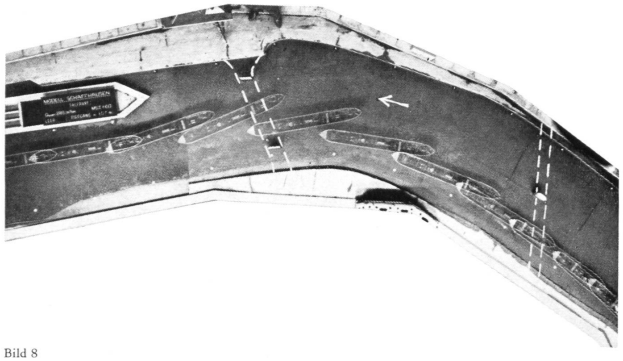


Bild 8
Kraftwerk Schaffhausen. Hochrheinschiffahrt. Fahrmanöver durch die Krümmung bei Flurlingen (Brückenpfeiler und Badeanstalt). 1000-t-Selbstfahrer bei der Talfahrt; Länge 94 m, Breite 10,2 m,Tiefgang 2,00 m, Verdrängung 1450 m³. Fließgeschwindigkeit bei H. S. W. 1,5 m/s; Q = 885 m³/s. Belichtung in Zeitintervallen von 1,9 Sekunden (Modell) = 15 Sekunden (Natur). Modellmaßstab 1:60.

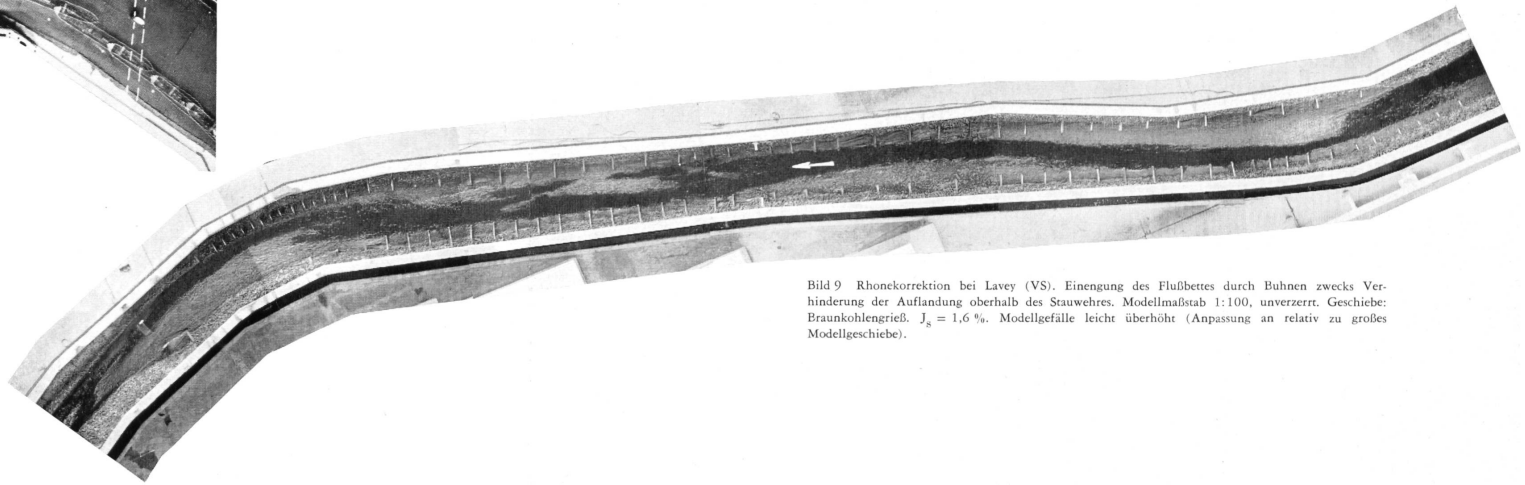


Bild 9 Rhonekorrektion bei Lavey (VS). Einengung des Flußbettes durch Buhnen zwecks Verhinderung der Auflandung oberhalb des Stauwehres. Modellmaßstab 1:100, unverzerrt. Geschiebe: Braunkohlengrieß. J_s = 1,6 %. Modellgefälle leicht überhöht (Anpassung an relativ zu großes Modellgeschiebe).

Bild 11 Wasserfassung Averser Rhein (Kraftwerkgruppe Valle di Lei — Hinterrhein). Spülversuch des verlandeten Stauraumes. Blick auf Erosionsrinne nach 15 Std. Spülung mit Q = 6 m³/s. Flußaufwärts zwei Leitbuhnen zwecks Ablenkung gegen rechtes Ufer. Abspülung etwa 3000 m³. Einzugsgebiet 42,5 km². HHQ ~ 170 m³/s. Jahreswasserfracht ~ 62 Mio m³. Modellmaßstab 1 : 30.

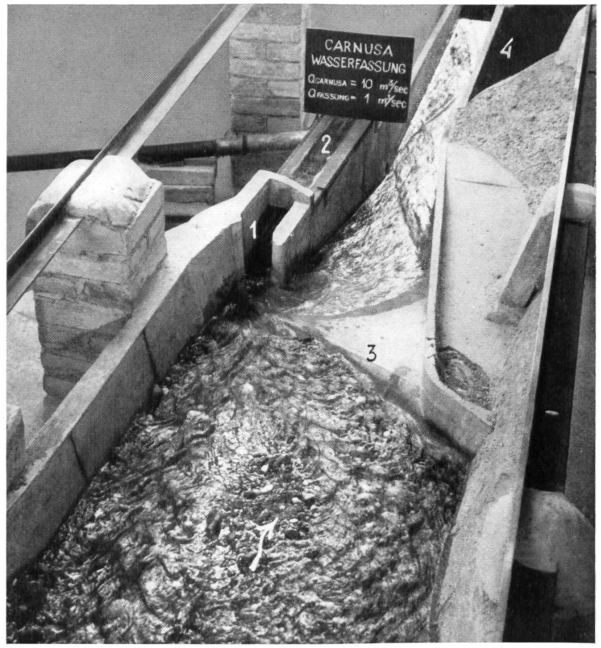


Bild 10
Kraftwerk Zervreila, Kleinfassung Carnusa.
1 Typus geschiebelose Anordnung («Umlenk-Fassung»)
2 Entsander
3 Leitbuhne
4 Unterwasserkanal
$Q_{Fassung}$ = 1 m³/s,
$Q_{Fluß}$ = 10 m³/s
Leitbuhne erforderlich, weil die Fassung nicht an der Außenseite der Krümmung erstellt werden konnte.
Modellmaßstab 1:25.

B. BODENMECHANIK

Unter Bodenmechanik oder Erdbaumechanik wird heute die Anwendung der Gesetze der Mechanik und der Hydraulik auf Bauaufgaben verstanden, die sich mit Lockergesteinen (Böden) befassen. Es war Dr. Ing. *Karl Terzaghi,* der mit der Publikation seines Werkes «Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage» im Jahre 1925 die Grundlinien dieser neuen, angewandten Ingenieurwissenschaft aufzeigte und die Entwicklungsrichtung sowie das Ziel absteckte. Frühere Forscher hatten sich zwar bereits schon mit einzelnen Fragen des Baugrundes beschäftigt und dem Ingenieur einige wertvolle Hilfsmittel zum Entwurf von Gründungsbauwerken bereitgestellt, doch fehlte die Erkenntnis des umfassenden Zusammenhanges zwischen dem Verhalten eines Lockergesteines und des in ihm enthaltenen Wassers, und dessen physikalischen, chemischen, mechanischen und hydraulischen Eigenschaften. Bereits *Coulomb* stellte um das Jahr 1776 seinen heute noch in formaler Beziehung gültigen Ansatz für die Scherfestigkeit eines Bodens auf: $s = c + \sigma \cdot \mathrm{tg}\,\varphi$ (c = Kohäsion, σ = Normalspannung, φ = Winkel der inneren Reibung) und untersuchte damit den Erddruck auf Stützmauern. Er betrachtete aber das Problem als ein rein statisch bestimmtes, ohne auf die Deformationsvorgänge zu achten. Es handelte sich für ihn typischerweise um ein mathematisches Problem, eine Anwendung des Maxima-Minima-Prinzipes. Seine von ihm begründete «klassische» Erddrucktheorie gilt deshalb auch nur unter bestimmten, einschränkenden Voraussetzungen (Drehung der Mauer um ihren Fußpunkt von der Erde weg, aktiver Erddruck; zur Erde hin, passiver Erddruck). Die Bodenkennwerte c und φ wurden nicht näher untersucht, d. h. der Winkel der inneren Reibung φ wurde gleichgesetzt dem Böschungswinkel, welchen ein natürliches Schüttgut mit der Horizontalen bildet. Diese Erddrucktheorie wurde bekanntlich weiter ausgebaut von *Poncelet* (1835), *Culmann* (1866) und *Wilhelm Ritter* (1879). Ausgehend von der strengen Elastizitätslehre auf der Grundlage des Hookschen Gesetzes und der Annahme einer Deformation bei gleich bleibendem Volumen (nur bei Wasser zutreffend) entwickelte *Boussinesq* 1885 die Gleichungen zur Berechnung der Spannungsverteilung im elastisch isotropen Halbraum unter dem Einfluß einer aufgebrachten Last, die heute noch fast allgemein zur Berechnung der Druckverteilung im Baugrund angewendet werden, trotzdem die Verformung der Bodenteilchen keineswegs den genannten Voraussetzungen entspricht. *Darcy* formulierte 1856 das nach ihm benannte, fundamentale und einfache Gesetz über die Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit $v = k \cdot J$ (k = Durchlässigkeitsbeiwert, J = hydraulisches Gefälle).

Wesentlich für die weitere Entwicklung und eine der Voraussetzungen für Terzaghis Arbeiten sind die Untersuchungen von *Atterberg* (1912) und sein praktisches Verfahren zur Festlegung der Zustands- oder Konsistenzgrenzen bindiger Böden. Kornverteilung und Konsistenzgrenzen bilden zusammen mit dem Gehalt an organischen Bestandteilen die Merkmale eines Bodens und gestatten seine Klassifikation. In dieselbe Zeitperiode fällt die Untersuchung des Rutsches in Göteborg durch Fellenius unter Einführung kreiszylindrisch geformter Gleitflächen und die erste groß angelegte Untersuchung des Rutsches eines Eisenbahndammes (geotechnische Kommission der Schwedischen Staatseisenbahnen 1922). Die neuen Bauaufgaben im Eisenbahn- und Hafenbau, schwierigere Fundationen von Brücken und Industriebauten, riefen nach besserer Erkenntnis der Baugrundeigenschaften. Es war deshalb nicht verwunderlich, daß das eingangs zitierte Werk Terzaghis einer Initialzündung gleich eine große Zahl von Forschern, teils Ingenieure, teils Naturwissenschaftler, in seinen Bann zog. Bald entstanden Laboratorien zur Untersuchung bodenmechanischer Fragen an verschiedenen technischen Hochschulen, ergänzt durch vergleichende Beobachtungen und Messungen im Felde.

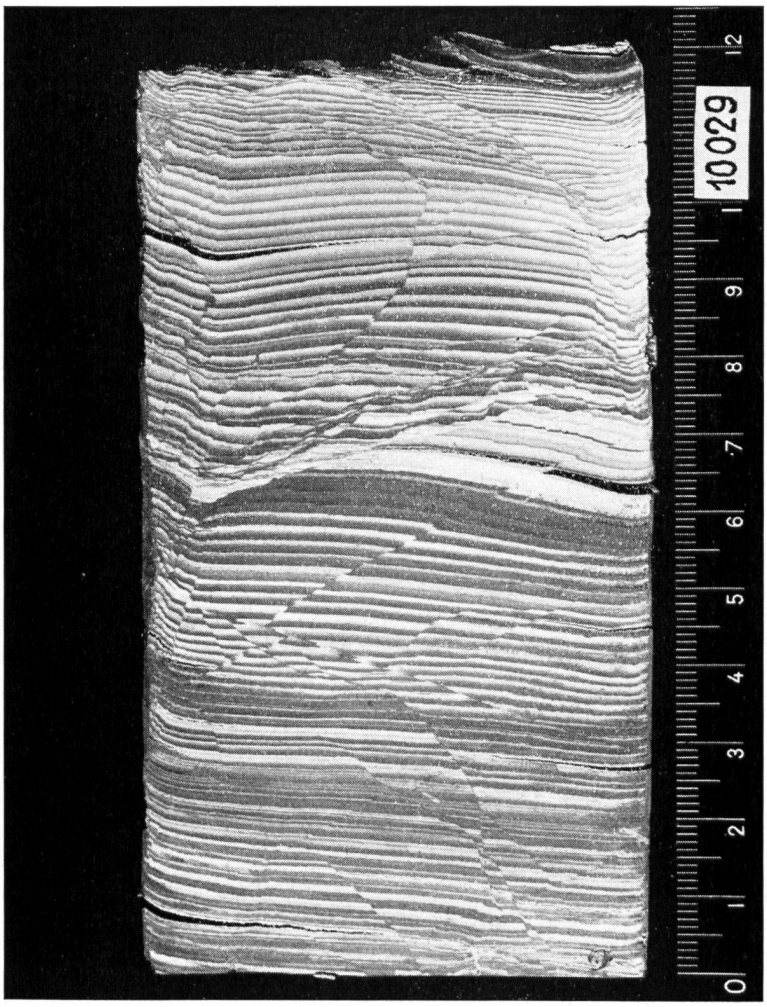


Bild 12 Ungestörte Probe eines gebänderten, siltigen Tones. Deutliche Strukturveränderungen.

Doch die systematische Untersuchung der Bodeneigenschaften benötigte in erster Linie geeignete Meßeinrichtungen und Geräte im Laboratorium und im Felde.

1. *Geräte für Felduntersuchungen*

Vorerst mußten die eher primitiven Geräte, die bis dahin zur Beschaffung von Bodenaufschlüssen benutzt worden waren, durch geeignetere ersetzt werden. Es galt, möglichst ungestörte Proben (Bild 12) zu entnehmen, d. h. solche, bei welchen die Struktur, die Lagerungsdichte und der Wassergehalt möglichst intakt bleiben. Dies ist bei bindigen Böden einfacher als bei nicht bindigen. Erst in letzter Zeit ist es gelungen, bei sehr sorgfältiger Arbeit und Anwendung speziell dafür

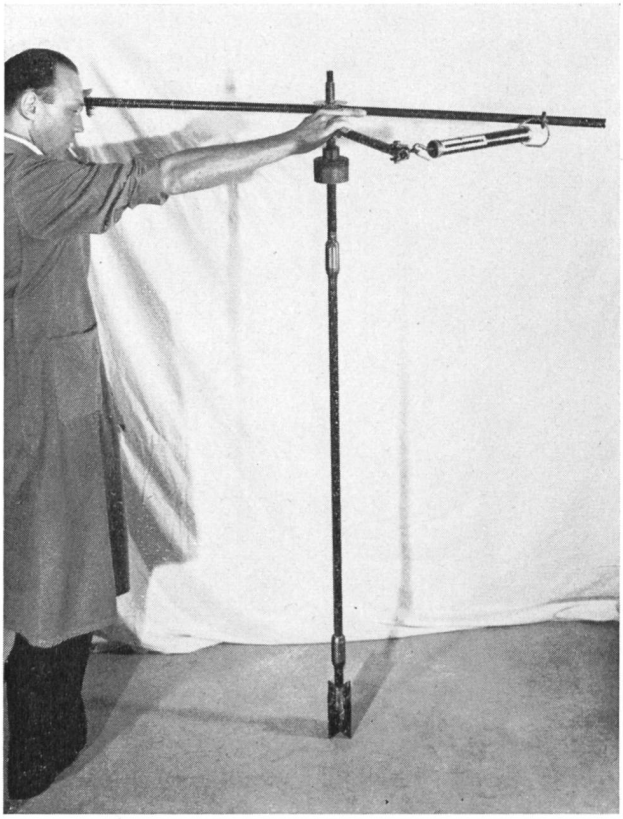


Bild 13 Drehflügelsonde. D = 50 mm, h = 70 mm

entwickelter Geräte auch in sehr locker gelagerten, feinkörnigen Böden, wie z. B. Seekreide, einigermaßen ungestörte, repräsentative Proben zu entnehmen.

Wegen der Schwierigkeit, sich wirklichkeitsgetreue Proben zu beschaffen, wurden weitere Geräte entwikkelt zur feldmäßigen Bestimmung von Bodenkennwerten. Die Setzungsempfindlichkeit und damit auch die Lagerungsdichte wird mit dem Plattenversuch bestimmt. Eine Platte wird belastet und ihre Einsenkung bei steigender Belastung, Entlastung und Wiederbelastung gemessen und daraus eine für die Größe der Setzung charakteristische, dem Elastizitätsmodul der üblichen Baustoffe analoge Kennziffer, der Zusammendrückungsmodul (M_E-Wert) bestimmt. Ein Stab mit einer Spitze, eine Rammsonde, wird in den Baugrund eingeschlagen. Der Eindringungswiderstand stellt bei bekannter aufgebrachter äußerer Arbeit des Bären ein Maß dar für die Lagerungsdichte des Baugrundes. Hervorgegangen aus den Beobachtungen beim einfachen Einrammen einer Schiene oder eines Stahlträgers bietet die Rammsonde in einem für ihre Anwendung geeigneten Boden ein aufschlußreiches Hilfsmittel. Allerdings darf es nicht zu Aussagen mißbraucht werden, die weit über das hinausgehen, was gemessen wird, z. B. ist es in unseren Böden im allgemeinen unzulässig, allein aus dem Widerstand der Rammsonde sogenannte «zulässige Bodenpressungen» abzuleiten.

In bindigen, tonigen Böden gibt der Versuch mit der Drehsonde (Bild 13) ein Maß über die beim Schnellversuch zu erwartende Scherfestigkeit. Zu diesen grundlegenden und sozusagen überall für die verschiedensten Bauaufgaben verwendeten Geräten treten verschiedene mehr spezielle hinzu, wie z. B. die Setzungspegel (Bild 14), die verschiedenen Typen von Porenwasserspannungsmessern (Bild 15), die verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit im Felde.

Bei diesen Felduntersuchungen spielt die Mitarbeit eines mit der Quartärgeologie vertrauten Geologen eine wichtige Rolle.

2. Geräte für Laboruntersuchungen

Neben jenen Geräten, die aus Nachbargebieten übernommen werden konnten, wie z. B. jene, die zur Bestimmung der Kornverteilung, des spezifischen Gewichtes, des Gehaltes an organischen Beimengungen usw. dienen, mußten spezielle Geräte entwickelt werden. Das Ödometer (Bild 16) dient der Bestimmung der

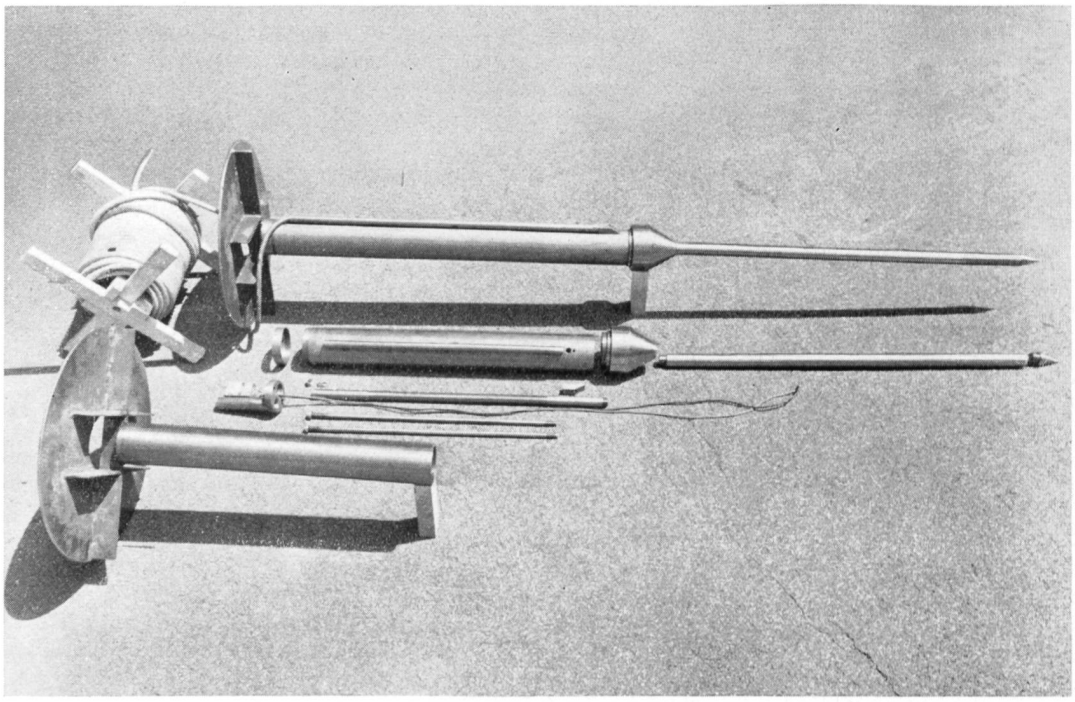
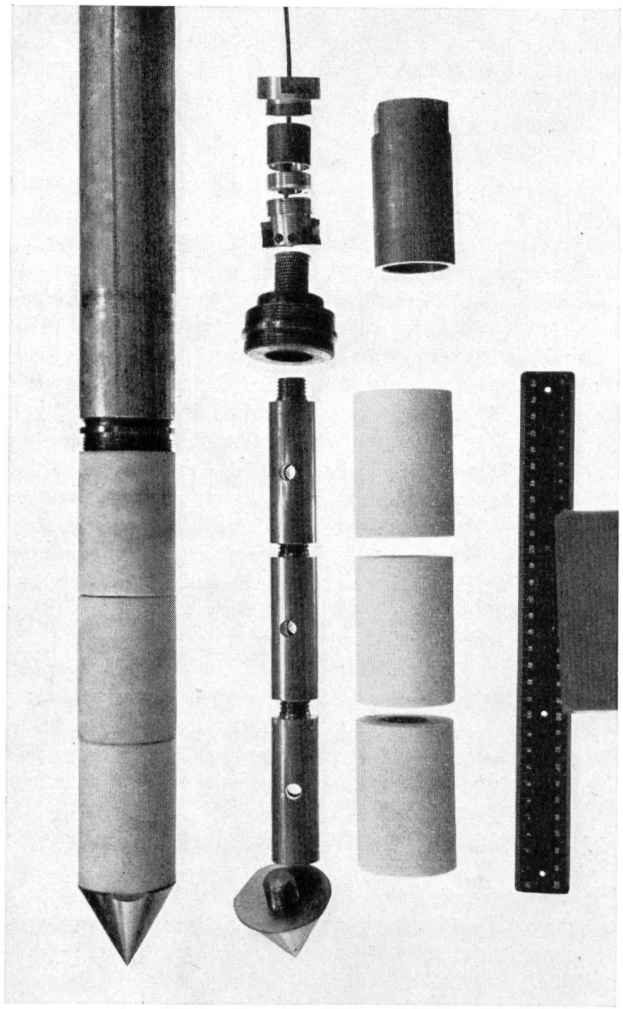


Bild 14
Elektrischer
Setzungspegel



spezifischen Setzung eines Bodens und liefert einen der beiden maßgebenden Faktoren zur Setzungsberechnung eines Bauwerkes.

Der einfache Druckversuch (Bild 17) mit unbehinderter Seitenausdehnung wird zur Bestimmung der undrainierten Scherfestigkeit bindiger Böden ausgeführt (entsprechend der Scherfestigkeit bei einer plötzlichen Belastungsänderung). Die Scherbüchse und der Ringscherapparat werden heute noch benützt für die Ermittlung der drainierten Scherfestigkeit (entsprechend der Scherfestigkeit einer langsamen Belastungsänderung).

Am eingehendsten und längsten ist an der Herstellung eines befriedigenden Gerätes zur Messung der Scherfestigkeit, dem triaxialen Druckapparat (Bild 18) gearbeitet worden. Erst mit diesem Apparat kann die Scherfestigkeit eines Materials unter Berücksichtigung der Porenwasserspannung bestimmt werden. Bei diesem Versuche wird im Innern eines Druckgefäßes die Bodenprobe zunächst durch Flüssigkeitsdruck allseitig gleichmäßig belastet und hierauf durch Steigerung der Vertikalspannung die Probe zum Bruch gebracht. Aus der Kenntnis der effektiven Hauptspannungen kann mit Hilfe des Mohrschen Kreises und der Tangente an demselben die Scherfestigkeit bestimmt, also nicht wie beim einfachen Scherversuch direkt gemessen werden. Der Vakuumtriax, bei dem der allseitige Druck durch Vakuum im Innern der Probe erzeugt wird, erlaubt eine einfache Apparatur zur Bestimmung der Scherfestigkeit kohäsionsloser Böden und wird mit Erfolg in Baustellenlaboratorien verwendet (Bilder 19 und 20).

Im Zusammenhang mit dem Bau von Flugpisten und Dämmen und der Notwendigkeit, die Verdichtbarkeit

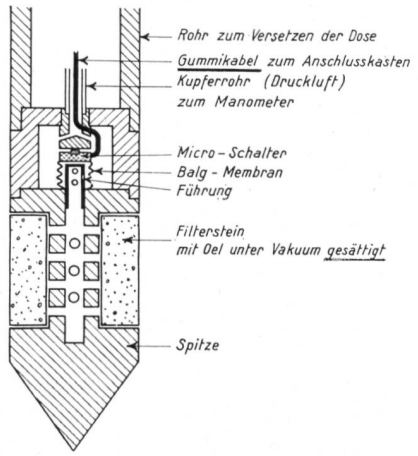


Bild 15
oben: Gerät zur Messung der Porenwasserspannung
unten: Querschnitt durch die Spitze mit Anordnung der Meßeinrichtung

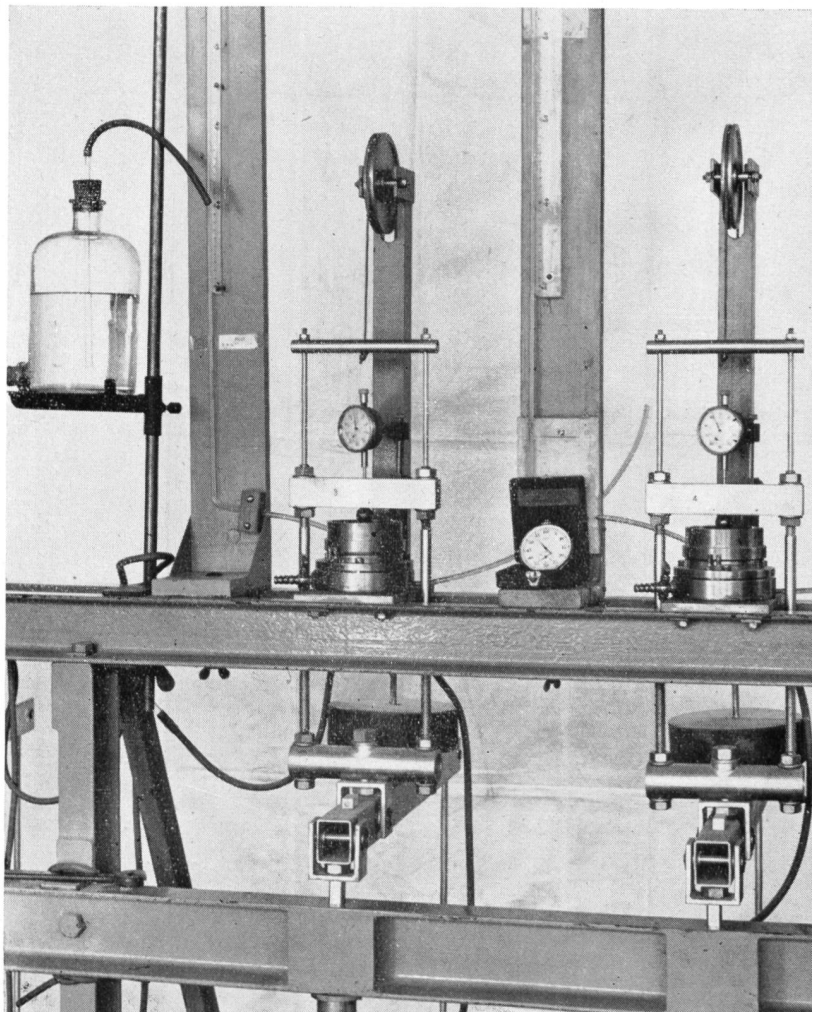


Bild 16
Oedometergruppe.
Querschnitt der Proben = 50 cm², links Durchlässigkeitsversuch

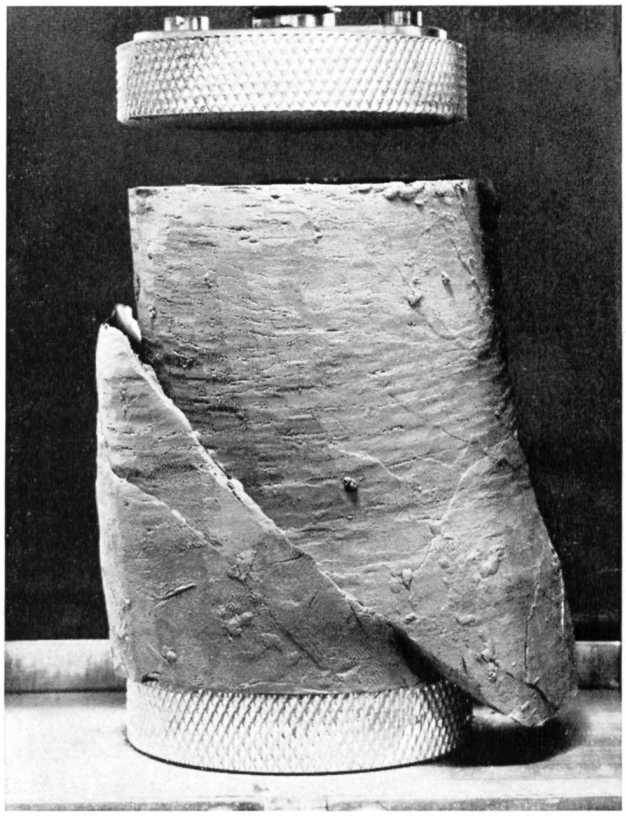


Bild 17 Siltige Tonprobe nach dem Druckversuch mit unbehinderter Seitenausdehnung im Farnellapparat. Querschnitt der Probe = 25 cm²

von Böden, insbesondere bindigen, näher zu kennen, entwickelte *Proctor* das nach ihm benannte und allgemein angewandte Verdichtungsgerät. Es gestattet, auf einfachste Weise festzustellen, mit welchem Wassergehalt ein bindiger Boden seine größte Lagerungsdichte und damit auch seine geringste Setzungsempfindlichkeit und höchste Scherfestigkeit erhält.

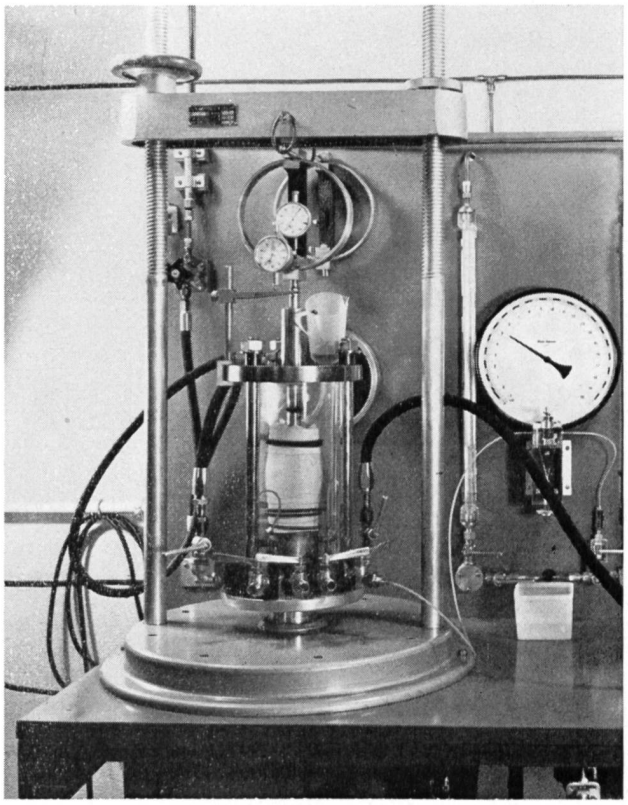


Bild 18 Triaxialgerät mit Einrichtung zur Messung der Porenwasserspannung. Querschnitt der Probe = 25 cm²

3. *Auswertung der Labor- und Felduntersuchungen*

Dank der Ergebnisse der Labor- und Felduntersuchungen einerseits und der Anwendung der bekannten Gesetze aus Mechanik, Physik und Chemie andererseits, sind in den vergangenen 35 Jahren wesentliche Erkenntnisse über das Verhalten des Dreiphasenstoffes «Boden» (Festsubstanz, Wasser, Luft) gewonnen worden. Ohne diese Erkenntnisse wären manche der in dieser Zeit entstandenen Bauwerke undenkbar. Es sei nur an die großen Erddämme erinnert, an den Bau von Flugpisten und den Unterbau der Autobahnen, an die verschiedenen neuen Methoden in der Fundationstechnik. Als typisches Beispiel dafür möge an die Erkenntnis des Wesens eines Filters erinnert werden und an die Notwendigkeit des Einbaues eines solchen immer dort, wo Materialien stark verschiedener Durchlässigkeit von Wasser durchströmt werden und gegen innere Erosion geschützt werden müssen.

Die wichtigsten Eigenschaften des Bodens werden nunmehr durch Kennziffern nicht nur qualitativ, beschreibend, wie früher, sondern quantitativ durch Messung bestimmt, angegeben und miteinander in Beziehung gebracht. Außerdem dienen dieselben der Klassifikation. Darunter sind zu nennen: das spezifische Gewicht, die Raumgewichte, die Kornverteilung, der Wassergehalt, die Porosität resp. die Porenziffer, die Konsistenzgrenzen und die Durchlässigkeit. Der Zusammendrückungsmodul charakterisiert das Deformationsvermögen und zusammen mit der Durchlässigkeit ergibt sich daraus außerdem eine Aussage über den zeitlichen Verlauf einer Setzung. Von entscheidender Bedeutung bleibt aber immer noch die Frage nach dem Wesen der Scherfestigkeit. Der Widerstand, den ein Bodenteilchen seiner Verschiebung entgegensetzt, ist die wichtigste Eigenschaft eines Bodens, von ihr hängt die Tragfähigkeit jeder Gründung ab, die Stabilität jeder Böschung, der aktive und passive Erddruck auf eine Stützmauer, auf eine Spundwand usw. Dank der Einführung der Porenwasserspannung, d. h. dem Nachweis, daß die Scherfestigkeit in einem Flächenelement einer Gleitfläche abhängig ist von der Differenz zwischen dem Überlagerungsdruck und dem Porenwasserdruck in diesem Element und nicht einfach vom totalen Überlagerungsdruck, ist der Reibungsanteil im Coulombschen Ansatz der Scherfestigkeit weitgehend abgeklärt, während der Kohäsionsanteil seinem Wesen nach noch sehr umstritten ist (z. B. Kohäsion der Tone) und der weiteren Abklärung bedarf.

Dank der Möglichkeit, Kennziffern festzulegen, welche die Materialeigenschaften zahlenmäßig erfassen, konnte eine größere Zahl von praktischen Bauaufgaben grundsätzlich gelöst werden: der Geländebruch oder die Überschreitung der Tragfähigkeit einer Gründung; die Stabilität von Mauern, Böschungen und Dämmen; das Spundwandtragwerk; die Durchströmung durch und unter Dämmen und Bauwerken und der hydraulische Grundbruch; die Setzung von Bauwerken; erfolgversprechende Ansätze zur Berechnung von Flächen- und Pfahlgründungen wurden aufgestellt usw. Dabei darf

nie übersehen werden, daß die theoretischen Überlegungen und Untersuchungen und deren mathematische Formulierung nur Arbeitshypothesen darstellen, die angesichts der tatsächlichen physikalischen Eigenschaften des heterogen aufgebauten und nie ganz erschlossenen Bodens stets unvollkommen bleiben. Arbeitshypothesen sind aber willkommene Helfer nur solange, als die Bereitschaft besteht, sie abzuändern oder gar über Bord zu werfen, sobald die Beobachtung und das Experiment dies verlangen.

Dem gemeinsamen Ziele, die neue Wissenschaft der Bodenmechanik und ihre Anwendung in der Fundationstechnik zu fördern, dienten Internationale Kongresse für Erdbaumechanik und Fundationstechnik, veranstaltet durch die Gesellschaft gleichen Namens und abgehalten 1936 in Cambridge, 1948 in Rotterdam, 1953 in Zürich und 1957 in London.

4. Erdbaulaboratorium an der ETH

Kurz nach der Eröffnung der Versuchsanstalt für Wasserbau wurde derselben im Jahre 1935 in weitsichtiger Weise eine Erdbauabteilung angegliedert. Dadurch entstand die Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH (später wurde ihr noch als dritte Abteilung jene für Hydrologie angeschlossen). Die Erdbauabteilung hat in den verflossenen 25 Jahren ihren Beitrag an die oben geschilderte Entwicklung geleistet nach Maßgabe ihrer Möglichkeiten und der Art der von ihr zu behandelnden praktischen Probleme, die der Eigenart unseres Landes entsprechen. Dafür typisch sind die Beiträge im Dammbau: *Bannalp, Marmorera, Göscheneralp, Mattmark,* um nur die wichtigsten zu nennen; ferner ist zu erwähnen die Übertragung der Betrachtungsweise und der Prüfmethoden auf den Schnee, Schneemechanik.

Bild 20 Probe nach der Durchführung eines Versuches im Vakuum-Triaxialgerät. F = 2000 cm²

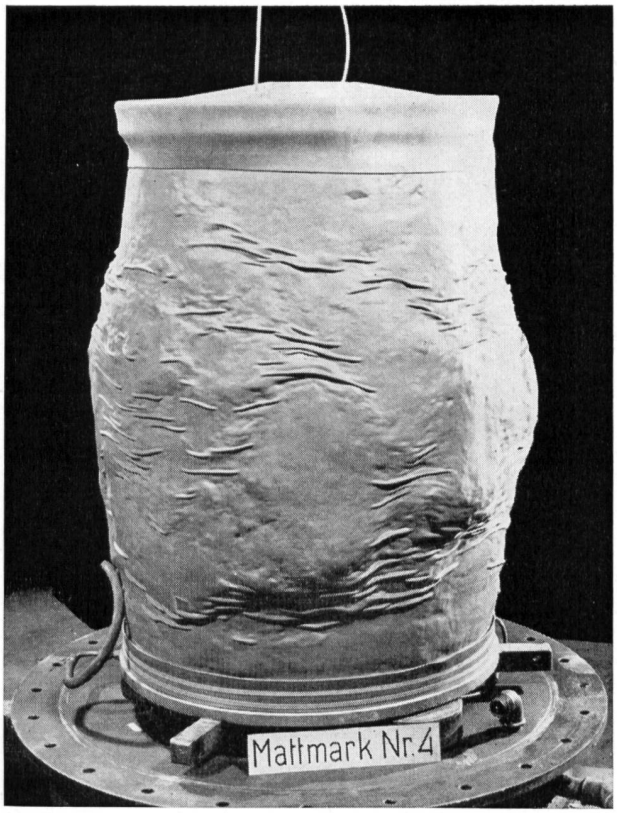


Bild 19 In eine Gummihülle eingebautes, kohäsionsloses Material für einen Erddamm vor Beginn eines Vakuum-Triaxialversuches. F = 2000 cm²

Die Aufgaben der Erdbauabteilung lassen sich kurz wie folgt umschreiben:

Mitarbeit an der Forschung, wobei heute vor allem auf dem Gebiete des Bodenfrostes und der Stabilisierung von Böden gearbeitet wird;

Begutachtung und Beratung privater und öffentlicher Ingenieurbüros und Verwaltungen für praktische Bauaufgaben aus dem Gebiete der Fundationstechnik, des Damm- und Straßenbaues, des Kraftwerkbaues usw.;

Lehr- und Ausbildungstätigkeit: Unterricht in Grundbau und in Bodenmechanik mit Demonstrationen, Ausbildung von jungen Ingenieuren in den Spezialproblemen dieser neuen Ingenieurwissenschaft, um sie anschließend in die Praxis zu entlassen;

Weiterbildung und Instruktion von Fachleuten aus der Praxis, die mit Bauaufgaben aus diesem Spezialgebiet zu tun haben, wie zurzeit z. B. die Leiter künftiger kleinerer, lokaler Erdbaulaboratorien auf Straßenbaustellen.

Der jetzige Personalbestand der Versuchsanstalt beläuft sich auf:

Ingenieure und technisches Personal	55	(32)
administratives Personal	6	(2)
Werkstatt	38	(2)
	99	(36)

(die Zahlen in Klammern beziehen sich auf die Erdbauabteilung).

5. Ausblick

Mit der starken Ausweitung des Bauvolumens in den letzten Jahren und voraussichtlich auch in der Zukunft hat sich der Aufgabenkreis der Erdbauabteilung stark erweitert, was aus dem beträchtlichen Anstieg des Personalbestandes hervorgeht, der noch im Jahre 1952 total nur 14 Angestellte umfaßte. Die zukünftigen Aufgaben mit praktischer Zielsetzung dürften vornehmlich auf dem Gebiete des Straßenbaues, des Dammbaues, der Untertagbauten im Lockergestein und bei schwierigen Gründungen liegen. In das Gebiet der praktischen Bauberatung gehört auch die weitere Pflege des Baugrundarchives. Auf dem Gebiete der Forschung wird neben den zurzeit bearbeiteten Fragen vornehmlich die Einwirkung dynamischer Kräfte auf den Baugrund untersucht werden müssen. Der genaueren Abklärung des Wesens der Scherfestigkeit wird weiterhin größte Aufmerksamkeit geschenkt werden. Als Spezialproblem dürfte das weitere Studium der Seekreide und das nähere Erfassen des Torfes auch von größtem praktischem Interesse sein.

Erfreulicherweise haben sich im Laufe der Jahre auch private Ingenieurbüros und Geologen auf das hier behandelte Gebiet spezialisiert und durch ihre Mitarbeit an Aufträgen aus der Praxis die Entwicklung der angewandten Bodenmechanik auch ihrerseits gefördert. Es ist zu wünschen, daß auch in Zukunft die Hochschulinstitute und die privaten Büros in gemeinsamer Arbeit der Förderung der Bodenmechanik und der Fundationstechnik dienen mögen.

(Bilder 1–3, 6–8, 10–20: Photos E. Brügger; 4, 5, 9: Photos O. Pletscher)

Die Entwicklung hydrometrischer Apparate in den letzten 50 Jahren

R. Pedroli, dipl. Ing., Bern, Sektionschef im Eidg. Amt für Wasserwirtschaft

DK 551.48 + 532.57

Das im Jahre 1907 vom eidg. hydrometrischen Bureau herausgegebene Werk «Die Entwicklung der Hydrometrie in der Schweiz» gestattet, aufschlußreiche Vergleiche zu ziehen zwischen den vor ungefähr 50 Jahren bestehenden und den heute verwendeten Wassermeßapparaten. Das erwähnte Werk erschien in einer Periode, in welcher die Hydrometrie, ähnlich wie heute, durch das zunehmende Interesse am Nutzbarmachen unserer Gewässer in voller Entwicklung war.

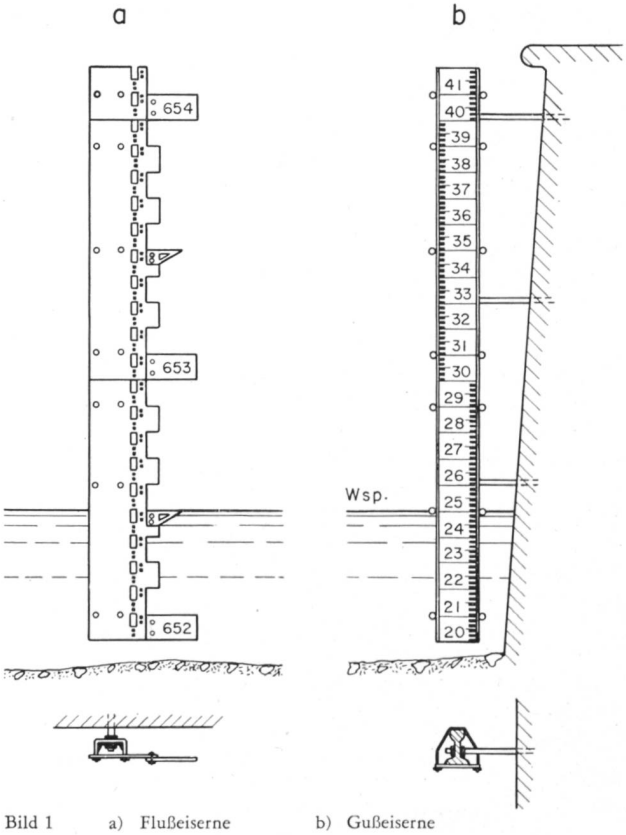


Bild 1 a) Flußeiserne Pegelplatte b) Gußeiserne Pegelplatte

Seitdem wurden weitere Fortschritte gemacht. Bestehende Apparate mußten neuen Bedürfnissen angepaßt werden, und neue Verfahren mit den dazugehörigen Meßgeräten wurden eingeführt. Im Nachfolgenden wird, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, ein Überblick dieser Entwicklung in der Schweiz dargelegt.

1. Der Pegel

Der Pegel ist der einfachste Meßapparat für die Ermittlung des Wasserstandes. Er besteht aus einer im Wasser aufgestellten Meßlatte, an welcher die Höhenlage des Wasserspiegels (Pegelstand) in Meter, Dezimeter und Zentimeter abgelesen werden kann. Der nach dem ehemaligen Chef des eidg. hydrometrischen Bureaus, Ing. Dr. J. Epper († 1924), in verschiedenen Ländern benannte «Epperpegel» (Bild 1a) hat sich über die lange Jahresreihe bestens bewährt. Im Gegensatz zu der früheren Ausführung werden heute die flußeisernen Pegelplatten nicht mehr mit Ölfarbe angestrichen sondern feuerverzinkt, wodurch fast kein Unterhalt mehr benötigt wird.

Die gußeisernen Pegel (Bild 1b) werden immer weniger gebraucht; sie sind schwer und verhältnismäßig teuer. Ferner ist ihre reliefartige Bezifferung weniger günstig abzulesen als die durchlochte der flußeisernen Pegelplatten.

2. Der Limnigraph

Infolge seiner Eigenschaft, die Ganglinie der Wasserstände zeitlich aufzuzeichnen, stellt der Limnigraph einen wichtigen hydrometrischen Apparat dar. Die heute meist verwendeten Limnigraphen werden entweder durch einen Schwimmer oder durch Druckluft betätigt.

a) *Der Schwimmerlimnigraph:* Er besteht im wesentlichen aus dem Registrierapparat (dem Limnigraph im engeren Sinne), dem Schwimmer als Meßwertgeber und dem Gegengewicht. Der Schwimmer macht die Schwankungen des Wasserspiegels mit. Seine Bewegungen werden mittels eines an der Rückseite des Apparates aufgewickelten Drahtseiles und durch Zahn-