

Eugen Meyer-Peter und die MPM-Sedimenttransport-Formel

Autor(en): **Hager, Willi H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **108 (2016)**

Heft 2

PDF erstellt am: **10.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-939520>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Eugen Meyer-Peter und die MPM-Sedimenttransport-Formel

Willi H. Hager

Zusammenfassung

Die beiden an der Versuchsanstalt für Wasserbau entwickelten Sedimenttransportformeln von 1934 und 1948 machten das 1930 eröffnete hydraulische Labor berühmt. Die Entwicklungen um diese Formeln einschliesslich der an der VAW durchgeführten systematischen Versuche und deren Ausweitung auf den Diepoldsauer Durchstich am Alpenrhein werden besprochen. Dabei kommt dem Wasserbau-Professor und ersten VAW-Direktor Meyer-Peter eine spezielle Rolle zu, hat er doch während Jahrzehnten diese Arbeiten tatkräftig gefördert. Die Unterstützung und der Anteil seiner wichtigsten Mitarbeiter werden zudem gewürdigt, welche das wissenschaftliche Gerüst der heute als Meyer-Peter-Müller MPM-Formel bekannten Beziehung durch vielseitige Laboruntersuchungen schufen. Es soll deshalb mit dieser Arbeit ein längst fälliges Thema in der modernen Geschichte des schweizerischen Flussbaus aufgegriffen werden, um die historischen und fachspezifischen Beiträge der jungen VAW aufleben zu lassen an einer Formel, die heute noch weltweit angewendet wird.

Summary

The two sediment transport formulas developed at Versuchsanstalt für Wasserbau (VAW) in 1934 and 1948 made the 1930 inaugurated laboratory famous. The developments around these VAW-formulae including systematic tests and the applied test series for the rehabilitation of the Diepoldsauer Cut on the Alpine Rhine River are discussed. The eminent role of the hydraulic engineering professor and first VAW-Director Meyer-Peter is highlighted, given his longterm support of these works. In addition, the role of his most important collaborators, who contributed the scientific background to the current Meyer-Peter-Müller (MPM) formula by fundamental research, is appreciated. The purpose of this paper, therefore, is to finally describe a topic of long standing in the Swiss hydraulic engineering research, thereby emphasizing the historical and topic-related contribution of the young VAW that is still currently of concern.

Müller (MPM), ein Aspekt, der bis heute nur wenig Aufmerksamkeit erhielt und deshalb hier vertieft dargestellt werden soll. Dabei wurden zwei Formeln publiziert, nämlich diejenige von 1934 für uniforme Sedimente, und die zweite, eben die MPM-Formel von 1948, welche den Namen Meyer-Peters in ehrender Erinnerung bewahrt. Was war der Werdegang zur 1934er-Formel? Weshalb wurde eine zweite Formel entwickelt? Was drückt die MPM-Formel aus? Was war der Anteil Müllers an diesem Projekt? Was ist die Kritik an der Formel? Diese und weitere Fragen werden nachfolgend beantwortet mit dem Ziel, einerseits das erste grosse Forschungsprojekt der damals jungen VAW vorzustellen und andererseits zu erklären, weshalb das Interesse an dieser Forschungstätigkeit in den 1940er-Jahren nachliess.

2. Weg zur VAW

Im Zusammenhang mit der Ernennung Meyer-Peters zum ETH-Wasserbau-Professor mag es erstaunen, dass gerade der junge Appenzeller Ingenieur ausgewählt wurde. Der bekannte deutsche Conrad Matschoss (1871–1942), selbst erfolgreicher Ingenieur und Professor an der TH

Gewidmet Herrn em. Prof. Dr. Walter H. Graf, EPFL, zum 80. Geburtstag

1. Einleitung

Eugen Meyer-Peter (1883–1969) wurde 1920 zum ETH-Wasserbau-Professor ernannt, nachdem er nationale und internationale wasserbauliche Projekte ausgeführt hatte. Vischer und Schnitter (1991) zeichnen seinen Werdegang von der Ausbildung an der ETH mit Bauingenieur-Diplom im Jahr 1905 bis zu dieser Ernennung nach, während Hager (2012) die Bibliografie und Persönlichkeit Meyer-Peters sowie seiner wichtigsten Mitarbeiter an der Versuchsanstalt für Wasserbau (VAW) erwähnt, weshalb auf diesen Aspekt hier nicht eingegangen werden soll. Der Name Meyer-Peter ist bis heute synonym mit der Geschlechts-transportformel nach Meyer-Peter und



Bild 1. Diepoldsauer Durchstich am Alpenrhein mit altem Rheinlauf im Hintergrund (IRR 1993).

Berlin-Charlottenburg, liess sich über die Hochschulfrage in der Schweiz aus (*Matschoss* 1917). Basierend auf einer Umfrage der Gesellschaft Ehemaliger Polytechniker (GEP) zuhanden des Schweizerischen Schulrats (heute ETH-Rat), wurde festgehalten, dass 98 % der Umfrageteilnehmer mit den ETH-Bestrebungen auf ein allgemein bildendes Studienprofil einverstanden waren. Gleich viele haben sich für die vertiefte, wissenschaftliche Grundlage auf Kosten von Spezialkenntnissen ausgesprochen. Die Mehrzahl lehnte eine Verlängerung der Studienzeit ab. Als höchste Aufgabe der ETH wurde die Erziehung der Absolventen zu Köpfen mit klarem und selbständigem Denken genannt; die wissenschaftliche Arbeit sollte entscheidend gefördert werden. *Matschoss* erwähnte weiter, dass von Professoren gesagt wird, dass sie zuweilen ihre Stellung benutzen, um besser bezahlte Arbeiten zu erhalten. Dies war ein Fingerzeig auf die Nachfolge des Wasserbau-Professors *Gabriel Narutowicz* (1865–1922), der weniger Professor als mehr praktizierender Bauingenieur war und schliesslich die Schweiz verliess, um vorerst das Amt des Ministers für öffentliche Arbeiten der jungen Republik Polen zu übernehmen und 1922 erster polnischer Staatspräsident wurde, aber bereits nach 10 Tagen ermordet wurde: Diesen Fall eines ETH-Professor wollte man nicht mehr.

Weshalb *Meyer-Peter* zum ETH-Professor gewählt wurde, bleibt unbekannt. Er war während 15 Jahren im Dienst der Firma *Conrad Zschokke* (1842–1918), selbst ETH-Wasserbau-Professor von 1892 bis 1897, als er in den Schweizerischen Nationalrat gewählt wurde und damit das Anstellungsverhältnis mit der ETH kündigen musste. Er mag die Ausstrahlung und das breite Wissen seines Angestellten erkannt und dies dem ETH-Schulrat vor seinem Tod mitgeteilt haben. *Meyer-Peter* selbst wies in verschiedenen Vorträgen vor seinen Fachkollegen immer wieder ehrend auf seinen früheren Vorgesetzten *Zschokke* hin. *Anonym* (1920) berichtet, dass die bisherigen Leistungen des Gewählten und seine Arbeitsweise zur Erwartung berechtigten, dass er seine Lehrtätigkeit mit dem wissenschaftlichen Geiste erfülle, den die Praktiker wiederholt als für eine erspriessliche Ingenieurausbildung unerlässlich bezeichnet haben. Das Vorlesungsprogramm *Meyer-Peters* umfasste Grundbau, Wasserbau, und die Wasserversorgung städtischer Ortschaften. Er wohnte zu Beginn der 1920er-Jahre an der Hottingerstrasse 11 in Zürich, also gute 10 Gehminuten entfernt vom ETH-Hauptgebäude. Betreffend sei-

nes Namens hatte er bereits 1921 den Zunamen *Peter* seiner Frau gewählt, um sich von gleichnamigen Kollegen abzugrenzen. Er unterschrieb jedoch alle Dokumente immer nur mit «*Meyer*».

In seiner ersten Publikation wies *Meyer-Peter* (1922) mit Nachdruck darauf hin, dass die Schweiz nicht hinter dem Ausland zurückbleiben dürfe und forderte deshalb ein eigenes hydraulisches Laboratorium. Als Vorbilder dienten der Deutsche *Theodor Rehbock* (1864–1950) von der TH Karlsruhe sowie der Österreicher *Friedrich Schaffernak* (1881–1951) von der TH Wien. Die Installationen dieser beiden Labore sollten die VAW der ETH Zürich stark beeinflussen. *Meyer-Peter* (1925a) skizzierte die Bedeutung des hydraulischen Versuchs und setzte sich dabei sowohl für die Lösung wasserbaulicher wie auch flussbaulicher Probleme ein, die sich mittels einer Versuchsanstalt erfolgreich lösen liessen. Es war ihm offensichtlich ein Dorn im Auge, dass solche Projekte bis dahin von ausländischen Labors untersucht wurden. Deshalb forderte er die Schaffung der VAW. Das erste Projekt stellte *Meyer-Peter* (1925b) vor, der Kostenvoranschlag betrug CHF 1.2 Mio. *Anonym* (1927) berichtete, dass rund CHF 400 000.– durch das VAW-Initiativkomitee zusammengekommen seien und der restliche Betrag dem ETH-Schulfonds entnommen werde.

Das VAW-Laboratorium wurde bereits durch *Meyer-Peter* (1929) im beachtlichen Werk des Amerikaners *John R. Freeman* (1855–1932) als ausserordentliche Institution vorgestellt. Am 26. April 1930 war es schliesslich so weit, die VAW wurde offiziell eingeweiht (*Hager* 2012). Somit hatte die Schweiz endlich zwei hydraulische Labors, nämlich seit 1929 eines an der Ecole des Ingénieurs der Université de Lausanne unter der Leitung von *Alfred Stucky* (1892–1969), und dasjenige an der ETH Zürich. In *Anonym* (1930), *Braeckman* (1933), und *Meyer-Peter* (1930a, 1930b, 1930c) wurde dessen Wert eindrücklich in Schrift, Plänen und Fotos dargelegt. Insbesondere war der VAW-Direktor stolz, bereits am Tag der Einweihung die ersten Modelle den Gästen in Betrieb vorzustellen wie das Limmatakraftwerk Wettingen. Kurz darauf wurde er als Ehrendoktor der Universität Zürich anlässlich deren Hundertjahrfeier ernannt «in Anerkennung seiner Verdienste um den Wasserbau in der Schweiz und den Ausbau der experimentellen Grundlagen der mit der Technik und den Naturwissenschaften in Zusammenhang stehenden Fragen der Hydraulik» (*Anonym* 1933). Der Betrieb an der VAW konnte nun beginnen.

3. Sedimenttransport an der VAW

Nachdem eine Anzahl wasserbaulicher Probleme modelltechnisch untersucht wurden, schritt *Meyer-Peter* (1934) zu den ersten flussbaulichen Publikationen. *Meyer-Peter et al.* (1934) stellten die sogenannte 1. VAW-Geschiebetransferformel vor. Dazu wurden Labordaten aus systematischen Laborversuchen verwendet. Das Projekt wurde 1932 mit der Unterstützung des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft begonnen, wobei die Versuchsmethoden nur am Rand erwähnt werden. Es wird angeführt, dass sich dieses Projekt ausschliesslich mit uniformem Geschiebe beschäftige, obwohl die Praxis das Verhalten von Sedimentmischungen interessiere.

Die Versuche wurden im speziell zu diesem Zweck errichteten 2 m breiten Kanal von einer Gesamtlänge von 50 m durchgeführt, welche sich auf effektiv 28 m infolge des Ein- und Auslaufs reduzierte. Der maximale Durchfluss betrug 5 m³/s und die maximale Wassertiefe erreichte 1.20 m. Allein diese Angaben können den Experten erschrecken, wenn man bedenkt, wie aufwendig ein Versuch war (und noch immer ist): Es galt dabei, das Sediment vorzubereiten, in den Kanal fachgerecht einzubauen, die Versuche durchzuführen und schliesslich mit geeigneten Instrumenten die wichtigsten Parameter zu messen. Leider wird nicht mitgeteilt, weshalb diese riesigen Kanalabmessungen gewählt wurden, sie mögen jedenfalls einen Fingerzeig geben auf die Langzeituntersuchungen, die vermutlich auch aus diesem Grund beschränkt waren.

Das gewählte Sediment betreffend wurden zwei Siebe der Maschenweite von 24 und 34 mm verwendet, was auf den mittleren Sedimentdurchmesser von 28.8 mm führte. Das zweite Sediment hatte einen mittleren Durchmesser von 5.05 mm; beide waren also relativ gross. Diese beiden Durchmesser wurden auch mittels des Ähnlichkeitsgesetzes nach *Froude* analysiert, um so den Übergang auf den Naturmassstab sicherzustellen. *Bild 2* zeigt die Versuchsanlage. *Meyer-Peter* (1932) beschreibt diese folgendermassen: Der eigentliche Messkanal besass eine Länge von 45 m und eine Breite und Höhe von je 2 m. An dessen Anfang und Ende befanden sich die Entnahmestellen I und II. Die Beschickung mit Sediment erfolgte im Unterwasser des Kanalansfangs, danach folgten Einbauten zur Abflussberuhigung. Der Durchfluss wurde mit zwei Propellerpumpen erzeugt. Die Anlage hatte einen Rücklaufkanal mit der Durchflussmessung und

an den 180°-Kurven Einbauten, um eine bessere Strömung ähnlich wie in Windkanälen zu erzeugen. Die erzeugten Wassertiefen betragen bis 1.6 m; sie lagen also relativ nahe an Naturverhältnissen. Durch den Umlaufkanal musste das Wasser nicht permanent erneuert werden, die Temperatur blieb zudem nahe an derjenigen des Labors. Für Geschwindigkeitsmessungen wurden hydraulische Flügel verwendet. Obwohl sich diese Publikation nicht mit Sedimenttransport beschäftigt, stellt sie eine der besten Beschreibungen der VAW-Anlage dar. Es ist unklar, weshalb Meyer-Peter davon nie eine ausführlichere Dokumentation verfasst hat.

Unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse von Schoklitsch (1914, 1934) und Kramer (1932) folgte als Gleichung des Sedimenttransports (Meyer-Peter et al. 1934)

$$q^{2/3} J/d = 17 + 0.40q_s^{2/3}/d \quad (1)$$

Darin bedeuten q den Wasserdurchfluss pro Einheitsbreite, J das Energieliniengefälle, d den mittleren Sedimentdurchmesser und q_s den auf die Einheitsbreite bezogenen Sedimentdurchfluss. Obwohl Gl. (1) dimensionsbehaftet ist, erfüllt sie das Ähnlichkeitsgesetz nach Froude. Nach Multiplikation der beiden Terme mit $g^{1/3}$ und Anpassung der Konstanten folgt anstelle von Gl. (1) mit g als Erdbeschleunigung die dimensionsrichtige Beziehung

$$q^{2/3} J/(g^{1/3}d) = 7.94 + 0.40q_s^{2/3}/(g^{1/3}d) \quad (2)$$

Mit $F = q/(gd^3)^{1/2}$ als Korn-Froude-Zahl und $F_s = q_s/(gd^3)^{1/2}$ als Transport-Froude-Zahl gilt

$$F^{2/3} J = 7.94 + 0.40F_s^{2/3} \quad (3)$$

Daraus folgt als Beziehung für Transportbeginn ($F_s=0$) die Relation $F_t^{2/3} J = 7.94$, entsprechend $q_t = 22.4(gd^3)^{1/2}/J^{3/2}$. Demnach nimmt der Durchfluss dann mit dem auf das Energieliniengefälle J bezogenen Sedimentdurchmesser $(d/J)^{3/2}$ linear zu, was fast der Beziehung von Schoklitsch (1914) entspricht. Bild 3 zeigt die Datenauswertung, in welche auch diejenigen von Gilbert (1914) eingetragen sind, welche die Angaben der VAW bestätigen. Darin wurde der Einfluss der Kanalwand, welcher sich in der Rauheit von der Gerinnesohle unterscheidet, mittels des Ansatzes von Einstein (1934) korrigiert. Es wird erwähnt, dass die Versuche einen grossen Zeitaufwand erfordern, um nahezu den Normalabflusszustand zu erreichen, unter welchem sich alle Grössen mit der Zeit nicht mehr verändern. Meyer-Peter

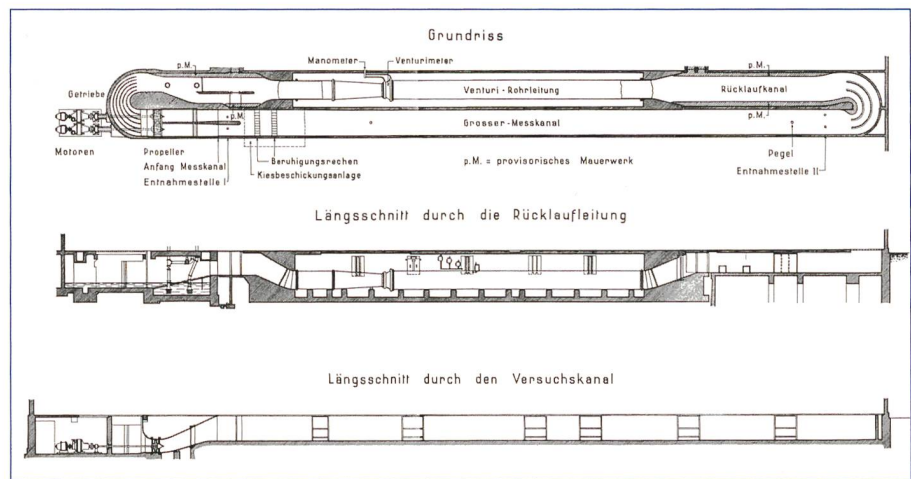


Bild 2. Grosser VAW-Versuchskanal (Meyer-Peter 1932).

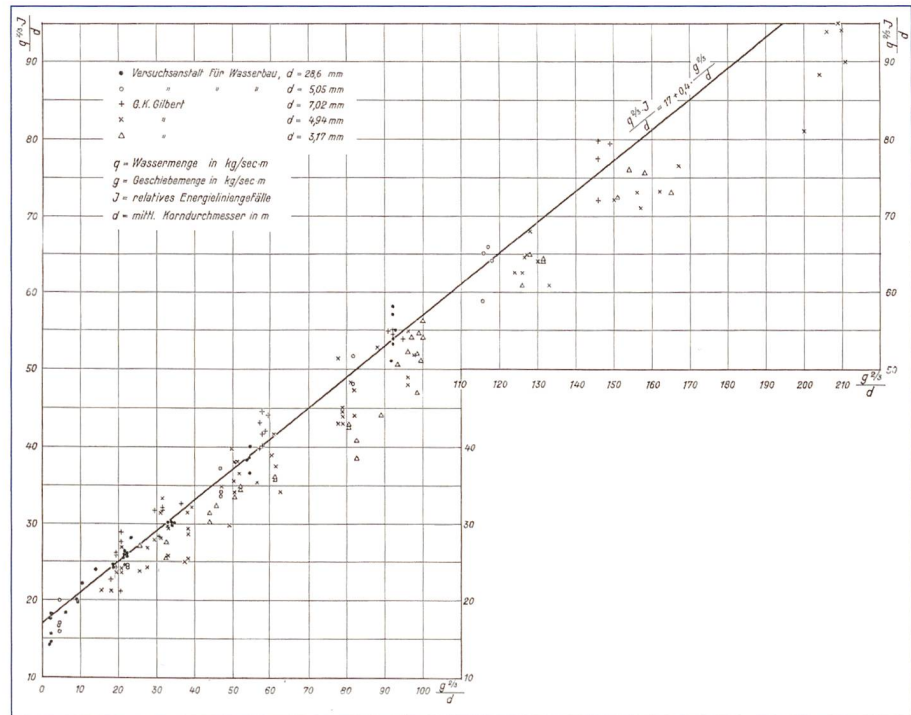


Bild 3. Sedimenttransportformel nach Meyer-Peter et al. (1934).

et al. (1934) halten fest, dass Gl. (1), resp. (3) nur unter den Versuchsbedingungen gilt, also der Sedimentdurchmesser grösser als rund 5 mm ist. Heute weiss man, dass das Ähnlichkeitsgesetz nach Froude ab rund $d > 1$ mm angewendet werden darf, für kleinere Werte von d werden hingegen viskose Effekte bedeutend.

Es wird festgehalten, dass mit dieser Arbeit Meyer-Peter und seinen Mitarbeitern ein wichtiger Schritt in der Sedimenthydraulik gelungen ist. Zwar war man noch weit weg von einem endgültigen Resultat, aber in der Lage, eine Beziehung, basierend auf mechanischen Grundgesetzen und Limitationen aus der Versuchstechnik, abzuleiten. Meyer-Peter (1934) spricht zudem Versuche mit Braunkohlengrus der Dichte 1.25 t/m^3 an, mit denen der Dichteeffekt untersucht wurde. Die Versuchsdaten folgten Gl. (1), nur dass sich dann die Koeffizienten

ändern. Es soll hier auch der wichtige Anteil von Henry Favre (1901–1966) erwähnt werden, der für diese Darstellung der Resultate verantwortlich war. Er war demnach geistiger Vater dieser Forschungen, während Meyer-Peter voll hinter dem Projekt stand und Einstein (fälschlicherweise immer als Albert anstelle von Hans-Albert bezeichnet) die Versuche durchgeführt hatte. Das Trio ging mit dieser Arbeit in die Geschichte der Hydraulik ein und erbaute das Gerüst zur endgültigen MPM-Geschiebetriebformel nach Meyer-Peter und Müller (1948).

4. Beitrag von Favre

Betrachtet man die verschiedenen Autoren dieses langjährig angelegten Projekts, so ist zu sagen, dass Meyer-Peter der geistige Vater und stete Ansporn war; er hat dies bereits in seinen Arbeiten der 1920er-Jahre angetönt. Die Probleme am Diepoldsauer

Durchstich gaben dann den definitiven Anlass zur Projektdurchführung (Bild 1). In Anbetracht seiner bis dahin publizierten Studien hatte er aber kaum die Umsicht und das Wissen, welches schliesslich in die 1. Sedimenttransportformel mündete. Das geistige Haupt war Favre, ein Mechaniker, welcher bereits ausserordentliche Arbeiten zu Freispiegelabflüssen, speziell Streichwehre und Sammelkanäle, geleistet hatte und im Begriff war, Kanalwellen im schwach schiessenden Bereich zu untersuchen, was zu den Favre-Wellen führte. Die weiteren Mitautoren, also Einstein, Hoeck und Müller, haben die Messarbeiten im Labor durchgeführt.

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die 1. VAW-Formel erstmals exakt die hydraulischen Ähnlichkeitsforderungen erfüllt. Favre hat sicherlich darauf geachtet, denn nur so war die Übertragung der Laborresultate auf die Natur sichergestellt. Diese Tatsache ersieht man einfach aus Gl. (3); sie bezieht sich lediglich auf die Korn-Froude-Zahl und das massgebende Gefälle. Die letzten Arbeiten von Favre (1935, 1936) in diesem Bereich hat er allein geschrieben. Eigentlich erstaunlich, dass sich hier Meyer-Peter nicht zur Wehr gesetzt hatte bei diesem, eben «seinem Thema».

Bild 4 zeigt die an der VAW damals verwendeten Sedimenttransport-Kanäle.

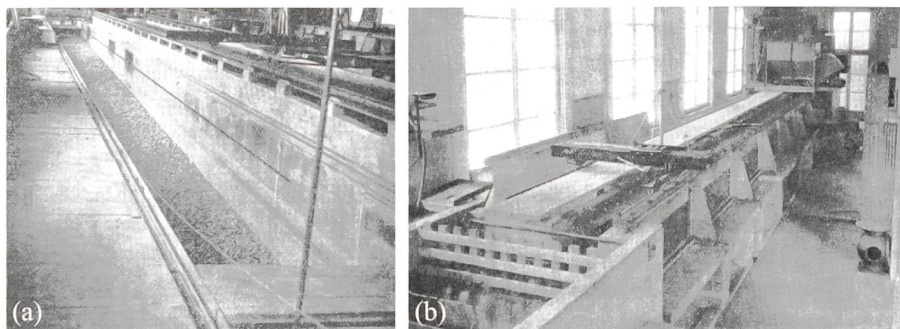


Bild 4. VAW-Sedimenttransport-Kanäle (a) grosser, (b) kleiner Kanal (Favre 1935).

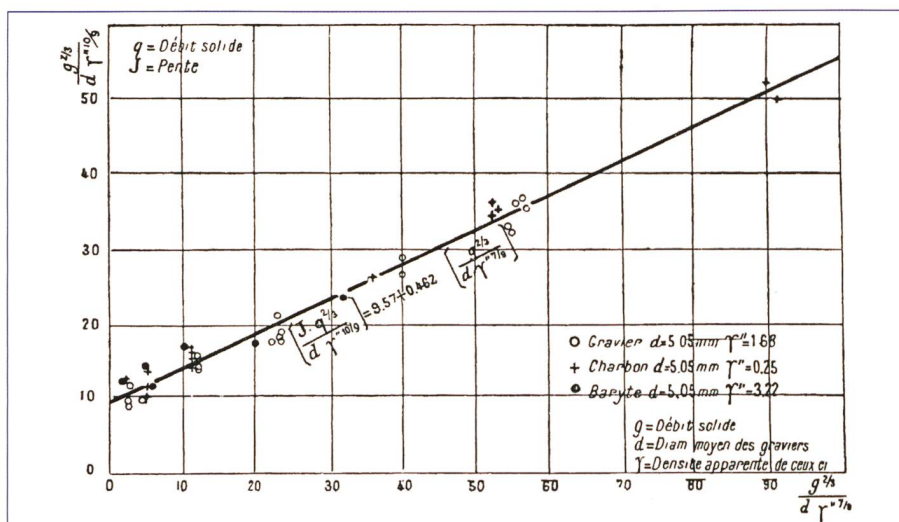


Bild 5. Einfluss der Sedimentdichte auf Sedimenttransport nach Favre (1935).

Es handelte sich einerseits um den kleinen Kanal im ersten Stockwerk, der 1996 abgerissen wurde, nachdem er während Jahrzehnten anderen Zwecken zur Verfügung stand. Der Rechteckkanal war 5.5 m lang und 1 m breit. Darin sieht man Sediment von etwa 0.03 m Durchmesser, welches für die ersten Versuche benutzt wurde. Andererseits erkennt man den geöffneten grossen Sedimenttransportkanal im Erdgeschoss, in welchem die Hauptversuche durchgeführt wurden; er wird unten beschrieben.

Favre (1935) beschrieb vorerst den Normalabflusszustand sowohl für Wasser als auch kombiniert mit Sedimentfluss. Nach vielen Untersuchungen für alternative Zustände kam man schliesslich zur Überzeugung, dass sich nur durch diesen ausgezeichneten hydraulischen Zustand vernünftige Resultate erzielen liessen. Falls man die Modelldaten in den in Gl. (1) erwähnten Parametern aufzeichnete, so wurde plötzlich Klarheit geschaffen: Favre zeigt also auch hier als Einzelautor dieser Arbeit seine wesentliche Rolle in diesem Projekt. Dort finden sich auch sein Beitrag zur Modellähnlichkeit, basierend auf dem Modellgesetz nach Froude, sowie ein Vergleich von Messdaten in zwei verschiedenen Modellmassstäben, deren Übereinstimmung als gut bewertet wurde.

Als nächstes schritt Favre zum Einfluss der Sedimentdichte. Dabei stellte er fest, dass dieser in der Natur irrelevant ist, da dort diese immer etwa 2.6 t/m^3 beträgt. Dagegen kommt das Argument des zu kleinen Sedimentdurchmessers nun ins Spiel: Wird ein Sediment massstäblich im Modell untersucht, so wird es bereits bei einem geringen Massstab zu klein, entsprechend stellen sich kohäsive Effekte ein, die dann nicht mittels Ähnlichkeit nach Froude modellierbar sind. Bild 5 zeigt die Auswertung von Modelldaten für Sedimentdurchmesser von $d=5.05 \text{ mm}$, deren unter Wasser gemessene Dichten $(\rho_s - \rho)/\rho$ jedoch variieren von 0.25 (Braunkohlegrus), 1.68 (Kies) bis 3.22 (Baryt). Werden die Modelldaten nach Gl. (3) aufgetragen, so entsteht eine fast exakt lineare Beziehung ohne einen Dichteeffekt (Bild 5). Damit ist dieser wichtige Aspekt der Modelluntersuchungen ein Verdienst von Favre, welcher von Meyer-Peter et al. (1937) übernommen wurde. Nach Favre lässt sich Gl. (3) auch für Sedimentmischungen anwenden, falls diese durch einen zutreffenden mittleren Ersatzdurchmesser angenähert wird, ohne diesen zu spezifizieren.

5. Anwendungen in der Praxis

Die besprochene Gl. (1) wurde von Meyer-Peter et al. (1935) auf den Alpenrhein angewendet. Bei flussbaulichen Problemen sind folgende Parameter üblicherweise als gegeben zu betrachten: der Durchfluss Q , das Sohlgefälle J_s , die Profilgeometrie F , und die Rauheit des Flussbetts K . Bei der Regulierung von Gebirgsflüssen wird oft ein Normalabflusszustand hinsichtlich Wasser und Sediment gefordert, damit weder ein Abtrag noch eine Auflandung der Sohle eintritt. Um diesen Zustand zu erreichen, ist die Profilwahl wichtig: Bei Erosion werden die Unterhaltsarbeiten teuer, während bei Verlandung Überflutungen sowie die Anhebung des Grundwasserspiegels zu befürchten sind. Die Normalprofilbreite wird deshalb definiert als die Flussbreite, bei der sich diese Veränderungen nicht einstellen. Es werden zwei Aufgabenstellungen besprochen: (1) jährliche Geschiebefracht unter fluvialen Gleichgewichtszustand in regelmässigem Flussabschnitt, (2) Fluss-Längenprofil bei bekannter Geschiebefracht.

Vorerst werden seit 1934 ausgeführte Versuche angesprochen, die von Robert Müller (1908–1987) durchgeführt wurden, welche sich auf Geschiebemischungen mit Durchmessern zwischen 6 und 40 mm bezogen. Es wird festgehalten, dass Gl. (1) auch gilt, falls der Gemisch-

Durchmesser d_{35} anstelle des mittleren Durchmessers d eingesetzt wird. Weiter folgt die Bemerkung zum ebenen, an der VAW untersuchten Abflussregime, ohne Präsenz der in der Natur oft auftretenden morphologischen Strukturen wie Sedimentbänke, Dünen oder Riffel. Infolge der turbulenten Strömung und in Hinsicht auf die Promotionsarbeit von *Hans A. Einstein* wurde das Problem statistisch angegangen, indem zeitliche Mittelwerte anstelle von effektiven Messdaten betrachtet wurden. Als Voraussetzungen für den Berechnungsweg werden genannt:

- Musterstrecke des Flussabschnitts, auf welcher Gleichgewichtszustand herrscht
- Topografische Aufnahme des Flussbetts und Erstellung der mittleren Sohlenlage eines Querprofils
- Lage des Wasserspiegels entlang der Musterstrecke
- Dauerkurve der Wasserführung über verschiedene Jahre
- Repräsentative Sedimentmischungsline entlang der Musterstrecke

Mit diesen Angaben allein charakterisierte man den Querschnitt der Musterstrecke. Das massgebende Profil wird nicht durch das Trapezprofil dargestellt, sondern ein sogenanntes hypsografisches Profil. Damit werde angegeben, welcher Anteil der Horizontalprojektion der Sohle über resp. unter einem zur ausgeglichenen Sohle parallelen Horizont liegt. Durch Auswertung typischer alpiner Flussprofile folgten zusammengesetzte Trapezprofile als massgebender Querschnitt. Es wurden also der massgebende Querschnitt, bestehend aus zwei symmetrischen, trapezförmigen oder dreieckförmigen Flächen ermittelt und der entsprechende Geschiebetrieb ermittelt.

Die Prüfung der Resultate folgte mittels eines hydraulischen Modells im Massstab 1:100, für welches jedoch der Geschiebedurchmesser zu klein war und deshalb mit leichtem Braunkohlengrus ersetzt wurde, um die Minimalanforderungen betreffend Sedimentdurchmesser zu erfüllen. Damit haben *Meyer-Peter* und seine Mitarbeiter das Prinzip der sogenannten dichtenmessenden Froude-Zahl $F_d = V/(g'd)^{1/2}$ erkannt, mit V als mittlerer Fließgeschwindigkeit, $g' = [(\rho_s - \rho)/\rho]g$ als relativer Erdbeschleunigung, ρ_s als Dichte des Sediments und ρ als Dichte des Wassers. Für schwach strömende Abflüsse mit etwa $F_d < 0.5$ ist die Froude-Zahl nicht relevant. Bei Zweiphasenströmungen wird dann jedoch F_d wichtig. Um viskose Effekte zu vermeiden, wird demnach der Sedimentdurchmesser d vergrößert unter entsprechender Verrin-

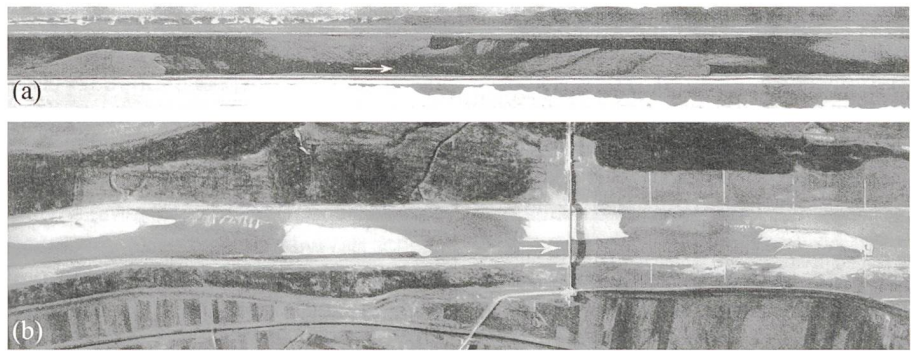


Bild 6. Ähnliche Flussstrecken (a) im geraden Modellkanal, (b) Rhein-Strecke mit Brücke Kriessern-Mädeln (*Meyer-Peter et al. 1935*).

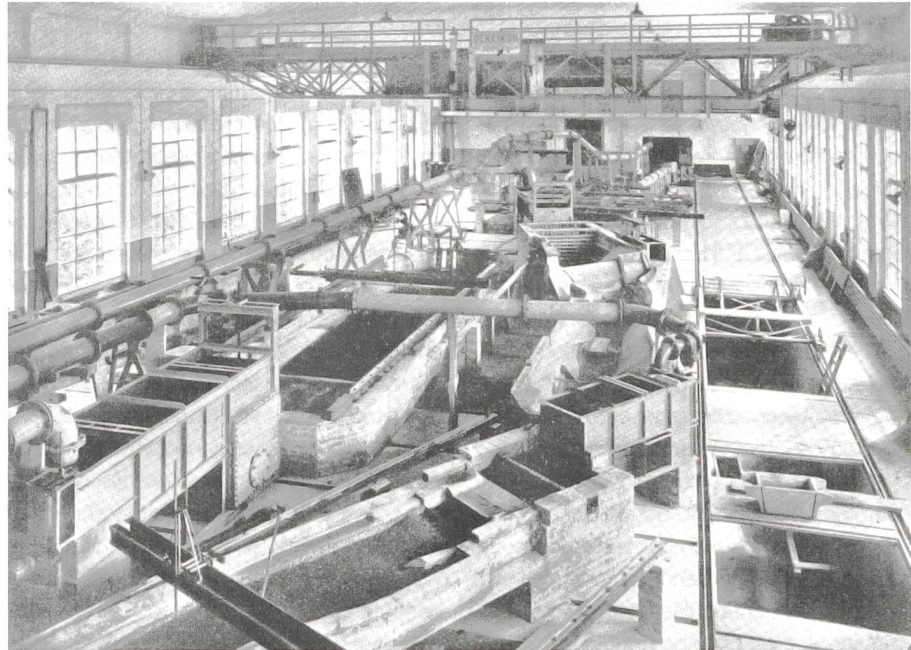


Bild 7. VAW-Versuchshalle rechts mit grossem Versuchskanal (*Braeckman 1933, Anonym 1935*).

gerung der Dichte ρ_s . Bei gleicher Modellgeschwindigkeit folgt $[(\rho_s - \rho)/\rho]d = \text{const}$. Dieses Prinzip wurde in der Meteorologie bereits im 19. Jahrhundert erfolgreich postuliert und ist in den vergangenen Jahren an der VAW etwa bei Kolkuntersuchungen verifiziert worden. Wie *Meyer-Peter et al. (1935)* bestätigen, gilt auch dann Gl. (1) mit entsprechend modifizierten Konstanten. *Bild 6* vergleicht den Alpenrhein bei Diepoldsau mit dem hydraulischen VAW-Modell, woraus ähnliche Fließstrukturen ersichtlich werden.

Als nächstes wird die Berechnung des Längsprofils eines Flusses bei gegebener Normal-Profilbreite erläutert. Dabei wird von einem Sohl-Fixpunkt im Unterwasser der betrachteten Strecke ausgegangen, um von dort gegen die Fließrichtung ins Oberwasser fortzuschreiten. Das diskutierte Verfahren erscheint dem Autor ziemlich verworren; anscheinend mussten noch weitere Elemente ermittelt werden. Eines davon betrifft den Geschiebeabtrieb. Aufbauend auf dem bekannten Gesetz nach

Sternberg, wird die Konstante im Exponenten ausgedrückt mittels des Verhältnisses zwischen den mittleren Durchmessern im Ober- und Unterwasser des betrachteten Flussabschnitts. Schliesslich wird das Rauheitsverhalten der Fusssohle diskutiert. Dabei wird der Ansatz nach *Strickler (Hager 2014)* gewählt, da dieser auf Alpenflüsse bezogen, einfache Resultate ergibt. Mit dieser Arbeit blicken deshalb die Autoren in die Zukunft, da noch eine Vielzahl von Details zu untersuchen war. Es wird festgehalten, dass ohne hydraulische Laborversuche solche Studien unmöglich wären.

Braeckman (1933) und *Anonym (1935)* zeigen auf einer seltenen Aufnahme (*Bild 7*) das VAW-Labor mit dem grossen Versuchskanal. Man erkennt einerseits die beiden Zugangsöffnungen, andererseits das zum Bersten gefüllte Labor, sodass dann bereits andere Räume für kleinere Versuche in Betrieb genommen wurden. *Anonym (1935)* erwähnt auch eine längs dieses Kanals verschiebbare Messbrücke, mit welcher sich jeder Querschnitt hinsicht-

lich Wassertiefe und Sedimenthöhe ausmessen lasse. Das Sediment werde am Einlauf entweder kontinuierlich oder zeitlichen gestaffelt dem Abfluss zugegeben und am Kanalende wieder entnommen. Das Gewicht des transportierten Sediments wurde dabei unter Wasser ermittelt, um den langwierigen Trocknungsvorgang zu vermeiden. Gläserne Beobachtungsfenster längs des Kanals erlaubten zudem die Visualisierung der Fliessvorgänge und die direkte Ausmessung von Materialablagerungen wie Sandbänken. Neben der Durchflussmessung mittels Venturi-Rohr wurde auch das Schirmmessverfahren eingesetzt, bei welchem eine auf einem Wagen fixierte vertikale Wand (der Schirm) durch die Strömung vorwärtsgetrieben wird, um damit die mittlere Fliessgeschwindigkeit zu ermitteln.

6. Diepoldsauer Durchstich

Meyer-Peter et al. (1937) untersuchten die Frage, ob durch bauliche Massnahmen am Diepoldsauer Durchstich des Alpenrheins eine Sohlabsenkung erzielt werden kann. Wie beispielsweise durch *Hager* (2015a) angetönt, wurde dieser zweite Durchstich 1923 eingeweiht, er war aber von *Jost Wey* (1843–1908), dem ersten Rheinbauleiter seit 1878, vehement abgelehnt worden infolge logistischer Probleme mit Deichsetzungen und teuren Bauverfahren wie auch wegen der unzulässig gewählten Abmessungen der Flussbreite, die auf 110 m veranschlagt wurde, nach *Wey* aber etwa 80 m hätte betragen sollen. In der Folge setzte eine massive Sedimentdeposition in diesem Flussabschnitt ein, was das Eidg. Oberbauinspektorat dazu veranlasste, der VAW den Auftrag zu geben, diese Frage wissenschaftlich zu untersuchen.

Die 3.5 km lange, gerade Flussstrecke um Diepoldsau wurde deshalb an der VAW im Massstab von 1:100 mit einem Sohlgefälle von 0.1 % nachgebildet. Damit nicht zu kleine Sedimentpartikel modelliert wurden, verwendete man wieder den bewährten Braunkohlegrus. Der Geschiebetrieb wurde definiert als zeitlicher Mittelwert des transportierten Sediments. Dabei wird wiederum der Normalabflusszustand für die Phasen Wasser und Sediment vorausgesetzt, die Kanalgeometrie ist also prismatisch und besitzt konstantes Sohlgefälle. Anstelle von Gl. (1) wird der resultierende Geschiebetrieb beschrieben durch (*Favre* 1935)

$$q^{2/3} J / (d_s^{10/9}) = 9.57 + 0.462 q_s^{2/3} / (d_s^{7/9}) \quad (4)$$

Dabei bedeuten q_s [kg/ms] den unter Wasser gewonnenen Geschiebetrieb pro Brei-

teineinheit sowie γ' [kg/dm] das entsprechende spezifische Sedimentgewicht. In der ersten Versuchsphase von 1932 sei nur uniformes Geschiebe untersucht worden, in der zweiten Phase von 1933/34 dann aber Gemische mit Sedimentdurchmessern zwischen 0.50 und 11.5 mm.

Es wurden einerseits Dauerversuche für einen bestimmten Wasser- und Sedimentzufluss bei uniformem Sediment unter Normalabflussbedingungen durchgeführt, mit welchen der Beharrungszustand angestrebt wurde. Damit entstand eine Beziehung zwischen den beiden Zuflüssen, die sich als linear herausstellte. Andererseits schritt man zu den entsprechenden Untersuchungen von Sedimentmischungen, die jedoch aufwendiger waren, da die Zusammensetzung der Sohle nicht unbedingt der Sedimentzugabe entsprach. Die sogenannte Geschiebefunktion war nun nicht mehr linear, die Kurven verliefen jedoch für verschiedene Sedimentdurchmesser ähnlich. Die Beschickung mit Sediment nahm für einen bestimmten Wasserzufluss aber mit dem Sedimentdurchmesser zu. Als Nächstes wurde die Sohlzusammensetzung unter verschiedenen Durchflüssen studiert. Die Validierung der Resultate wurde anhand der auf dem Rhein sich einstellenden Kiesbänke vorgenommen, deren Form und Grösse bekannt war. Weiterhin wurde deren Wandergeschwindigkeit betrachtet. Als Zeitmassstab zwischen dem Modell und dem Prototyp wurde 1:360 ermittelt: 4 Minuten im hydraulischen Modell entsprachen also einem Tag. Als Resultat ergab sich eine hinreichende Übereinstimmung (*Bild 6*).

Anschliessend wurden die Verhältnisse am Diepoldsauer Durchstich untersucht. Es sollte der Verlandungsprozess zwischen 1923 und 1933 erfasst werden. Falls sich dieser und die stromab liegende Zwischenstrecke in der Tat verlandet hätten, so wäre der Sedimentzufluss entweder hinsichtlich Menge oder Durchmesser nicht mit der Transportfähigkeit des Rheins übereinstimmend. Nach zehnmaliger Repetition des Normaljahres im Modell, entsprechend 243 Betriebsstunden, wurde schliesslich der Sohle-Beharrungszustand erreicht. Dieser hatte sich vom Anfangszustand um rund 0.50 m gehoben, das Gefälle betrug 0.16 % anstelle von 0.10 %. Am oberen Ende erreichte die Kiesbank eine Höhe von 3.7 m über der Projektsohle; sie war also um 0.20 m höher als das Vorland. Die Länge der Kiesbänke war rund 500 m und deren jährliche Fortpflanzungsgeschwindigkeit rund 220 m/a. Die mittlere im Modell gemessene Sohlenerhöhung war damit weit kleiner als

rund 1.6 m im Prototyp. Der Grund dazu war die im Unterwasser nicht konforme Wassertiefe mit dem Alpenrhein infolge Sedimentdepositionen ab 1926.

Anhand der Versuchsserie von 1932 (uniformes Sediment) folgte sowohl durch die Verengung des Mittelgerinnes als auch Wuhrrhöhungen um 2 m die Sohlabsenkung. Der erste Effekt war dabei weit wichtiger als der zweite, beide hingen zudem vom gewählten Unterwassereinstau ab. Der erste Zustand wirkt auf alle Zuflüsse, während der zweite Zustand erst ab Durchflüssen von mehr als etwa 700 m³/s eintritt. In der Versuchsserie 1933/34 (Sedimentmischungen) wurden im Modell fünf Normalprofile eingebaut, einige ergaben befriedigende Resultate, andere mit reiner Erhöhung der Wuhren jedoch nicht. Als Schlussfolgerung für den Diepoldsauer Durchstich resultierte eine gesamtheitliche Betrachtung des Problems, ausgehend vom Bodensee.

Meyer-Peter et al. (1937) schritten dann zur Berechnung der Rheinregulierung von der Illmündung bis zum Bodensee. Es wurden vier Musterstrecken definiert, deren Sohlgefälle 1932 zwischen 0.135 % längs des Zuflusses und dem Diepoldsauer Durchstich und 0.081 % beim Fussacher Durchstich variierten. Die massgebende Sedimentdeposition von rund 100 000 m³/a fand im Bereich des Diepoldsauer Durchstichs statt. Anschliessend wurden die Quer- und Längsprofile des Alpenrheins, die massgebenden Durchflüsse und Rauheitsbeiwerte und die jährlichen Dauerkurven besprochen. Schliesslich werden die Mischungslinien, der massgebende, typisch kleiner als 50 mm Sedimentdurchmesser und der Sedimentabrieb längs des Flusses beschrieben. Der massgebende Sedimentdurchmesser im oberen Bereich beträgt etwa 15 mm, derjenige im Fussacher Durchstich dagegen nur noch etwa 12 mm. Dann folgt die Vorhersage der Sohlentwicklung, falls keine Massnahmen getroffen würden: Von 1937 an würde demnach der Auflandungsprozess fortschreiten, da noch kein Gleichgewichtszustand erreicht war.

Die Massnahmen zur Verhinderung einer weiteren Sohlauflandung des Alpenrheins im Bereich des Diepoldsauer Durchstichs betreffend, wurden sowohl die Verengung des Mittelgerinnes als auch Wuhrrhöhungen untersucht. Die Studie bezog sich auf die beiden Breiten von 70 und 90 m; beide ergäben die Tendenz zur Sohlabsenkung. Dadurch wird jedoch nicht erreicht, was durch den Staatsvertrag mit Österreich festgelegt wurde, da der untere

Sohlendpunkt durch die beiden unteren Strecken um rund 2 m angehoben wird. Eine reine Wuherrhöhung hätte noch fatalere Folgen, weshalb diese Massnahme nicht weiter verfolgt wurde. Als Zusatzmassnahme wurden Baggerungen vorgeschlagen, die eine günstige Wirkung zeigten, insbesondere falls hauptsächlich grobes Material im Bereich des Diepoldsauer Durchstichs entnommen würde. Die optimale Massnahme wird durch wirtschaftliche Überlegungen geprägt, aber die dauernde und angepasste Baggerung wird als die beste Lösung des Problems betrachtet. Das vorgeschlagene Gesamtprojekt basiert auf einer Breitenreduktion von 40 m längs des Fussacher Durchstichs bis auf 20 m längs des Diepoldsauer Durchstichs, gepaart mit den erwähnten flexiblen Baggerungen der Flusssohle.

Eine weitere Untersuchung im Zusammenhang mit dem Alpenrhein führte *Einstein* (1937a) durch, welche den sogenannten Geschiebefänger betraf. Es geht also um die Eigenschaften dieser Messgeräte, welche in einem Fluss den Sedimenttransport direkt ermitteln. Diese Geräte lassen sich jedoch nur unter bekannten Laborbedingungen testen. Dabei ist zu beachten, dass der Fänger selbst die Strömung stört und deshalb nur näherungsweise eingesetzt werden kann. Selbst bei konstanten Wasser- und Sedimentzuflüssen treten zeitlich starke Schwankungen auf. Anhand der Messungen von 1935 wurde der Wirkungsgrad eines Fängers auf rund 40% veranschlagt, d. h. etwa dieser Anteil des gesamthaft am Beobachtungsort fliessenden Geschiebes wurde auch effektiv gefangen; der Rest war entweder zu klein und entging somit dem Fänger oder Störungen infolge dessen Präsenz erlaubten keine Sedimententnahme. Diese Grösse hänge wesentlich vom Sedimentdurchmesser ab. Weitere Probleme seien die turbulente Strömung und deren Einfluss auf den Fänger oder das Eingraben oder Anheben des Fängers bezüglich der Flusssohle.

Der «Naturfänger» war 1 m lang, 0.5 m breit und 0.2 m hoch, besass also etwa die Abmessungen der von der Versuchsanstalt für Wasserbau in Wien an der Donau getesteten Grösse. Da diese Abmessungen für einen Laborkanal zu grosse Störungen des Zuflusses bewirkten, wurden drei Modelle in den Massstäben 1:2.5, 1:5 und 1:10 gebaut (Bild 8). Vergleichsuntersuchungen ergaben ein völlig unklares Bild, weshalb auf diese Weise keine realistischen Resultate erzielt wurden. Die Resultate der kleinen Fänger wurden deshalb vorerst ausgeschlossen. Schliesslich resul-

tierte ein mittlerer Wirkungsgrad von rund 45 %, falls die Messdauer genügend lange sei. Andererseits darf diese auch nicht zu lange dauern, denn ein voller Fänger ist inaktiv. Schliesslich erläuterte *Einstein* den grossen turbulenten Einfluss und verwies auf die entsprechende Behandlung in seiner Dissertation mittels der Wahrscheinlichkeitmethode. Das eigentliche Problem seines Aufsatzes wurde aber nicht gelöst.

Schliesslich besprach *Müller* (1937) die wesentlichen Folgerungen dieses Projekts. Er hatte mit grosser Wahrscheinlichkeit die Modellversuche durchgeführt und war Projektleiter der Studie am Alpenrhein. Es wurden die wichtigsten Voraussetzungen zur Berechnung der Sohlenentwicklung im Bereich des Diepoldsauer Durchstichs erläutert, die Wahl der massgebenden Querprofile diskutiert sowie die Resultate mittels Gl. (1) vorgestellt. Als Folgerungen wird festgehalten, dass «eine weitere beträchtliche Sohlerrhöhung im Diepoldsauer Durchstich vermieden wird, falls auf jene bauliche Lösung, die sich durch die eingehenden Studien der Versuchsanstalt als unwirksam erwiesen hat, zu verzichten sei und stattdessen eine Verengung des Mittelgerinnes vorzunehmen oder dann auf die von der Versuchsanstalt ebenfalls untersuchte und vorgeschlagene Lösung dauernder Baggerungen einzutreten».

Einstein und *Müller* (1939) gehen spezifisch auf die hydraulische Ähnlichkeit von flussbaulichen Modellversuchen ein. *Einstein* war zu dieser Zeit bereits zwei Jahre in den USA, während *Müller* mit verschiedenen wasserbaulichen Problemen beschäftigt war. Die Arbeit dehnt die Erkenntnisse von *Favre* (1935, 1936) aus, ohne sich aber auf neue Messungen zu stützen. Es werden insbesondere die modelltechnischen Bedingungen bei fester und beweglicher Sohle, der Effekt der Sedimentdichte, die

entsprechenden Reibungsverluste, der Geschiebetriebbeginn und der Zeitmassstab zwischen Modell- und Naturdaten besprochen. Dann werden die Modellregeln unter Anwendung der Ähnlichkeit nach *Froude* berechnet und gleichzeitig wird nachgewiesen, dass die beiden VAW-Formeln dieses Gesetz exakt erfüllen. Schliesslich werden nochmals die für den Alpenrhein entwickelten Bedingungen vorgestellt.

Bis 1948 wurden offenbar keine weiteren Publikationen zum Sedimenttransport verfasst; man litt einerseits unter den Kriegsbelastungen, andererseits waren wasserbauliche Probleme in den Vordergrund gerückt. *Müller* (1943) legte im Alter von erst 35 Jahren seine Dissertation vor; er war offensichtlich zuvor immer wieder mit Projekten der VAW «eingedeckt» worden. Die Forschungsarbeit beschäftigt sich mit den beiden Hauptthemen (1) Geschiebebewegung bei Normalabfluss im geraden prismatischen Gerinne und (2) Einfluss von Krümmungen auf die Ausbildung des Längenprofils. Teil 2 soll hier nicht besprochen werden. Als Erstes formt *Müller* (1943) den Ansatz von *Strickler* (*Hager* 2014) betreffend des Rauheitsbeiwerts K in Flüssen vom mittleren Durchmesser d_{50} auf den einfacher zu erfassenden Sedimentdurchmesser d_{90} um, womit sich lediglich die Konstante von 21.1 auf 26 verändert. Als Zweites wird der Transportbeginn von Sediment, aufbauend auf den beiden VAW-Formeln, studiert. Schliesslich wird die Geschiebefracht innerhalb einer bestimmten Dauer spezifiziert. Damit hat *Müller* im Teil 1 seiner Dissertation keine wesentlichen neuen Resultate erzielt. Auch in seiner Habilitationsarbeit geht *Müller* (1944) nicht auf dieses Thema, sondern auf das Kolkproblem ein. War die Problematik Sedimenttransport gelöst oder war sie von keinem Interesse mehr?

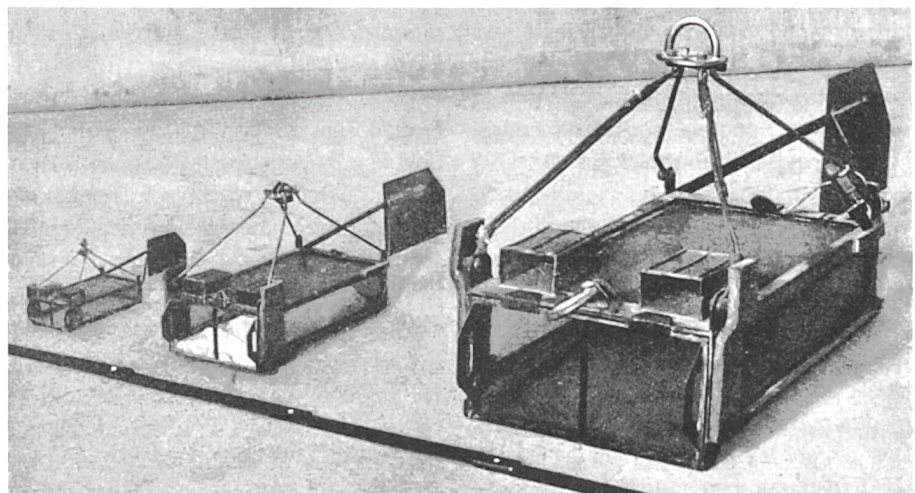


Bild 8. An der VAW getestete Geschiebefängermodelle, Massstäbe 1:10, 1:5 und 1:2.5 (*Einstein* 1937a).

Als Nächstes folgte eine Schrift über Wasserbau, in welcher Müller (1947) die wichtigsten Resultate seiner Untersuchungen nochmals für die Praxis zusammenfasst. Das gut 100 Seiten umfassende Büchlein ähnelt denjenigen der damals bekannten Sammlung Göschen. Die Kapitel im Abschnitt Hydraulik sind (1) Grundlagen, (2) Laminare Strömung, (3) Turbulente Strömung, (4) Freispiegelabfluss, (5) Begleiterscheinungen und (6) Modellähnlichkeit. Entsprechend interessieren in diesem Zusammenhang lediglich die beiden letzten Kapitel. Es werden etwa die Grenzschleppspannung zur Ermittlung des Beginns von Sedimenttransport nach Kreuter und den VAW-Resultaten vorgestellt, es wird auf die Schwebstoffführung eingegangen sowie Angaben zur Sinkgeschwindigkeit von Körnern diskutiert, um schliesslich auf den Geschiebetrieb einzugehen. Darin nehmen die an der VAW entwickelten Formeln die zentrale Stellung ein. Leider werden auch in dieser Schrift keine neuen Entwicklungen erwähnt, insbesondere aus den Laboratorien der USA, welche ab etwa 1935 stark an diesem Problem arbeiteten.

7. Definitive Formel von Meyer-Peter und Müller

Die von Meyer-Peter und Müller (1948, 1949) definitive, sogenannte MPM-Formel basiert im Wesentlichen auf den Messungen der frühen 1930er-Jahre. Eingangswort wird einerseits Gl. (1) für uniformes Sediment, andererseits Bild 5 resp. Gl. (4) betreffend der Sedimentdichte besprochen. Dann beziehen sich die Autoren auf den Einfluss von Sedimentmischungen. Sie versuchten vorerst, Gl. (1) beizubehalten und den mittleren Durchmesser d mit dem effektiven Durchmesser d_m [mm] der Mischung zu ersetzen. Dieses Verfahren scheiterte jedoch, sodass, wie nun erstmals erwähnt, seit 1938 Zusatzversuche im grossen VAW-Kanal über diesen Effekt durchgeführt wurden. Das Messprogramm orientierte sich an den in schweizerischen Alpenflüssen auftretenden Sedimentmischungen mit Werten von $(J;d_m) = (0.04 \text{ bis } 0.05\%; 0.4)$, $(2 \text{ bis } 3; 1.7 \text{ bis } 2)$ und $(8; 4.4)$. Weitere Versuche bis $J=2\%$ wurden im kleineren Kanal durchgeführt. Die Auswertung der Daten nach den Parametern von Gl. (1) mit $d \rightarrow d_m$ ergab für einen bestimmten relativen Durchfluss $q^{2/3}J/d$ für uniformes Material einen massiv kleineren relativen Sedimenttransport $q_s^{2/3}/d$ als bei Mischungen. Deshalb wurde zuerst nochmals der Beginn von Sedimenttransport analysiert, welcher vom relativen Durchmesser d/R_h mit R_h als hydraulischem Radius abhängt. Daraus

ergab sich mit c_1 und c_2 als zwei noch festzulegende Konstanten anstelle von Gl. (1) die Beziehung

$$q^{2/3}J^{2/3}/d_m = c_1 + c_2(q_s^{2/3}/d_m) \quad (5)$$

Man beachte, dass lediglich die Potenz des Energieliniengefälles J von Gl. (1) zu Gl. (5) modifiziert ist. Probleme mit den Daten entstanden bei der kleinsten ($d_m=0.4$ mm) Sedimentfraktion sowie bei Versuchen, bei denen sich Bettformen entwickelt hätten.

Nun tritt als Zusatzargument der Einfluss verschiedener Rauheiten des Sediments am Kanalboden K_s und der relativ glatten Kanalwände K_w auf, also des Verhältnisses $\kappa=K_s/K_w < 1$. Die entsprechenden Durchflüsse sind Q_s und Q als totaler Durchfluss. Sie lassen sich nach Einstein (1934) als Quotient $\Omega=Q_s/Q \leq 1$ ermitteln. Unter Einbezug dieser Zusatzeffekte folgt mit A und B' als neue Konstanten anstelle von Gl. (5) für natürliche Sedimentdichte der Ausdruck

$$\gamma_w \Omega \kappa^{3/2} [hJ/d_m] = A + B'(q_s^{2/3}/d_m) \quad (6)$$

Bezüglich des Werts K_s soll die von Müller (1943) entwickelte Beziehung angewendet werden, also $K_r [m^{1/3}/s] = 26/d_{90}^{1/6}$ mit d_{90} [m]. Werden nun alle Messdaten für die drei verschiedenen untersuchten Dichten nach Gl. (6) aufgetragen, so folgen die beiden Konstanten A und B' . Als definitive, sogenannte MPM-Formel gilt schliesslich mit γ_w [t/m³] als spezifisches Gewicht von Wasser, γ_s [t/m³] als spezifisches Gewicht des unter Wasser gewogenen Sediments und h [m] als Wassertiefe

$$\gamma_w \Omega \kappa^{3/2} [hJ/d_m] = 0.047 \gamma_s'' + 0.25 (\gamma_w/g)^{1/3} (q_s^{2/3}/d_m) \quad (7)$$

Diese Beziehung vereinfacht sich in der Schreibweise, falls man die Zusatzparameter $\phi = q_s/[\rho(Rgd_m^3)^{1/2}]$ und $1/\psi = V^2/(Rgd_m) = hJ/(Rd_m)$ als relativen Transportterm sowie die densimetrische Korn-Froude-Zahl einführt mit $V = (ghJ)^{1/2}$ als Schubspannungsgeschwindigkeit. Werden die beiden labortechnisch eingeführten Terme Ω und κ ebenfalls auf eins gesetzt, also ein breiter Fluss betrachtet, dann lautet die Geschiebetriebformel nach Meyer-Peter und Müller (etwa Graf 1984)

$$\phi = [4\psi^{-1} - 0.188]^{3/2} \quad (8)$$

Die Anwendungsbedingungen von Gl. (7) resp. (8) beinhalten:

- Energieliniengefälle J zwischen 0.04 und 2 %

- Partikelgrössen d_m zwischen 0.4 und 20 mm
- Wassertiefen h zwischen 0.01 und 1.20 m
- Spezifische Wasserdurchflüsse q zwischen 0.002 und 2 m³/sm
- Relative Sedimentdichte $R = [(\rho_s - \rho)/\rho]$ zwischen 0.25 und 3.2

Im Lichte moderner Erkenntnisse sind diese Bedingungen weiter einzuschränken. Einerseits ist vollturbulenter Zufluss sicherzustellen, die Reynoldszahl $R = 4VR_h/\nu$ mit ν als kinematischer Viskosität muss über rund 50 000 liegen. Die mittlere Partikelgrösse sollte infolge viskoser Zusatzeffekte mindestens $d_m = 1$ mm betragen. Die Wassertiefe h muss mindestens rund $h = 0.05$ m erreichen, damit sich lediglich rein gravitative Effekte einstellen. Der spezifische Durchfluss muss so gross sein, dass die oben erwähnten Limitationen erfüllt sind. Einfach gesagt, muss sichergestellt werden, dass das Ähnlichkeitsgesetz nach Froude erfüllt ist. Dann lässt sich die MPM-Formel also für alpine Flüsse ausgezeichnet anwenden.

Die Gl. (7) vereinfacht sich für zwei spezielle Fälle, nämlich für Sedimenteintrag ($q_s = 0$ resp. $\phi = 0$) entsprechend dem zugehörigen Wert von J_0 zu

$$J_0 = 0.047 [(\rho_s - \rho)/\rho] (d_m/h) \quad (9)$$

Danach nimmt dieses Energieliniengefälle unter Sedimenteintrag linear zu mit der relativen Sedimentdichte und dem relativen mittleren Sedimentdurchmesser. Als zweiter Grenzfall kann auf den Fall extremen Transports zurückgeschlossen werden, bei dem also der in Gl. (8) enthaltene Term bei Eintragsbeginn viel kleiner als der Transportterm bleibt. Daraus folgt nach Gl. (7), resp. Gl. (8)

$$Rq_s/(gJ^3h^3)^{1/2} = 8 \quad (10)$$

Aus dieser Beziehung ergibt sich q_s [m²/s] $= 8(gJ^3h^3)^{1/2}/R$, entsprechend entfällt der Einfluss des mittleren Sedimentdurchmessers d_m komplett. Der Sedimenttransport hängt dann massgeblich von der Wassertiefe h und dem hydraulischen Gefälle J ab; je leichter das Material, desto linear grösser ist q_s . Wird das Reibungsgefälle nach Strickler/Müller unter Normalabfluss ersetzt, so folgt für breite Rechteckkanäle mit $q = KJ^{1/2}h^{5/3}$ resp. mit $K = 8.3g^{1/2}/d_{90}^{1/6}$ der Ausdruck $Rq_s = 0.014d_{90}^{1/2}q^3/(gh^{7/2})$ resp. $Rq_s/q = 0.014q^2/(g^2h^7/d_{90})^{1/2}$. Der dichtebezogene Sediment- zum Wasserdurchfluss Rq_s/q hängt dann wesentlich vom Quadrat der Froude-Zahl $F = q/(gh^3)^{1/2}$ sowie dem relativen Sedimentdurchmesser $(d_{90}/h)^{1/2}$ ab.

Entsprechend dominiert F den Geschiebe-transport; interessanterweise nimmt q_s mit d_{90} schwach zu.

Abschliessend erwähnen Meyer-Peter und Müller (1948) als Mitarbeiter an diesem Projekt die Herren *Friedrich Brändle* (1903–1944), *Erhard Röthlisberger*, welcher von 1941 bis 1945 Assistent an der VAW war, *Eugen Müller* und *Jakob Morf*, beide von 1946 bis 1947 VAW-Assistenten, und *Ernest Bisaz* (1918–1979), späterer VAW-Abteilungschef der Gruppe Wasserbau.

Weitere Zusammenfassungen der definitiven 2. VAW-Sedimenttransportformel wurden durch *Hager* (2012) zitiert und sollen deshalb hier nicht repetiert werden.

8. Meyer-Peter und die VAW-Formel

Bis um 1934 waren die Deutsche Technische Hochschule von Brünn um Prof. *Armin Schoklitsch* (1888–1969), die Technische Hochschule von Wien um Prof. *Friedrich Schaffernak* (1881–1951) und die Versuchsanstalt für Wasserbau in Wien um *Rudolf Ehrenberger* (1882–1956) massgebend an der Entwicklung in diesem dazumal neuen Forschungsgebiet des Flussbaus beteiligt (*Hager* 2015b-d). Österreich dominierte demnach das weltweite Geschehen auf diesem Wissenszweig. Nach 1934 begann einerseits die aktive Zeit an der ETH Zürich, andererseits traten die Amerikaner im Zuge der grossen Bewässerungs- und Hydroenergieprojekte im Westen der USA auf den Plan. Was war nun die Rolle *Meyer-Peters* an diesen Entwicklungen? Weshalb ist gerade die MPM-Formel auch heute noch so populär? Was zeichnet die Forschung an der VAW der ETH Zürich speziell aus?

Wie bereits erwähnt, hat sich *Meyer-Peter* bereits vor Inbetriebnahme des VAW-Labors zum Ziel gesetzt, auf dem Sedimenttransport aktiv zu werden. Die Probleme mit dem Diepoldsauer Durchstich haben zusätzlich Impetus verlieht. Von heute aus erscheint die Kombination der führenden VAW-Mitarbeiter noch wichtiger; ohne sie hätte sich das gesetzte Ziel kaum erfolgreich erreichen lassen. Diese werden durch *Hager* (2012) besprochen, in Bezug auf das Sedimenttransportproblem waren dies:

- *Henry Favre* (1901–1966), erster Vize-direktor ab 1930, also die rechte Hand von *Meyer-Peter* mit einem stark theoretischen Hintergrund in Mechanik. Er hatte das Projekt bis um 1935 geführt und die essenziellen Ähnlichkeitsüberlegungen angestellt, welche die Übertragung der Modellresultate auf die Natur ermöglichen. Nach Rücksprache mit Kollegen von *Favre* scheint

aber, dass *Meyer-Peter* dies nicht ins richtige Licht stellte, und *Favre* hat sich entsprechend geäussert, insbesondere dass er immer in zweiter Reihe verbleiben musste. Erst seine beiden Publikationen in den *Annales* haben ihn zur Trennung von seinem Vorgesetzten bewogen, anschliessend hat er auf diesem Thema nicht mehr publiziert, um Animositäten auszuweichen. Er war deshalb froh, ab 1938 die Mechanik-Professur in französischer Sprache an der ETH zu übernehmen.

- *Hans Albert Einstein* (1904–1973), VAW-Mitarbeiter ab 1931, hat auf Wunsch seines berühmten Vaters *Albert*, erstaunlicherweise selbst in seiner Promotionsarbeit weder Messdaten publiziert noch die VAW-Modellanlagen beschrieben. Es könnte sein, dass *Meyer-Peter* hier wiederum bewusst untersagt hat, diese (eben seine) wertvollen Unterlagen zu verwenden. Es muss immerhin festgestellt werden, dass *Einstein* in den USA die bis 1937 erhobenen Messdaten publizierte und eine eigene Transportformel vorschlug (*Einstein* 1942). Diese hat sich aber im Gegensatz zur MPM-Formel nicht international durchgesetzt. *Einstein* war ab Mitte der 1930er-Jahre gestresst, drängte ihn doch sein Vater, als Jude im Hintergrund des Naziregimes, möglichst schnell Mitteleuropa zu verlassen.
- *Robert Müller* (1908–1987), Nachfolger *Einsteins*, war neben den eigentlichen Forschungsarbeiten zum Sedimenttransport stark mit anderen Themen eingedeckt, sodass er nicht einmal seine Promotionsarbeit in einem vernünftigen Zeitrahmen abschliessen konnte. Nach dem Wegzug von *Einstein* und *Favre* war er der wichtigste Mitarbeiter von *Meyer-Peter*. Der 1938 an die VAW zurückgekehrte *Charles Jaeger* (1901–1989) wurde entsprechend seinen Neigungen nicht im Labor eingesetzt, sodass *Müller* dessen Leitung immerhin in wissenschaftlicher Hinsicht zu übernehmen hatte. *Müller* verblieb bis zur Emeritierung seines Vorgesetzten an der VAW, verliess diese jedoch, nachdem *Gerold Schnitter* VAW-Direktor wurde, um damit einen Praktiker des schweizerischen Wasserbaus einem Theoretiker des Flussbaus vorzuziehen.

Meyer-Peter selbst war sicherlich vom Sedimenttransportproblem sehr angetan, er konnte jedoch wissenschaftlich nicht mithalten. Zu sehr war er Ingenieur-Praktiker, eigentlich Wasserbau-Ingenieur, der auf

Nebenwegen zum Flussbau stiess (*Bild 9*). Er war einerseits überwältigt von der ersten VAW-Formel, welche die grundlegenden Prozesse zu erklären schien, andererseits aber enttäuscht, dass sie sich nicht auf sein wirkliches Problem, den Diepoldsauer Durchstich, anwenden liess. Vergleicht man die 1934er- und 1935er-Publikationen mit derjenigen von 1937, so fällt der Stilwandel ins Auge. Mit *Favre* als Mitautor liest man vorwärts, alles scheint logisch und physikalisch begründet. Im Gegensatz dazu die Arbeit von 1937, die zum Teil wirr und ohne Klarheit verschiedenste Details erläutert, als sei ein VAW-Bericht schlecht zusammengefasst worden. Etwas weniger, aber mit immer noch diesen Zügen, liest sich auch die Publikation von 1948, *Müller* hat sicherlich hier den Stil geglättet. *Meyer-Peter* wollte in all diesen wichtigen Publikationen nichts aus seiner Hand geben, er war der erste Autor, und somit hatte er das Sagen zu allen Aspekten, was dann Mitarbeiter wie *Favre* unverständlich liess. Zudem war *Meyer-Peter* ab Mitte der 1930er-Jahre mit vielen anderen Projekten belastet (*Hager* 2012). In den 1940er-Jahren traten dann vermehrt wasserbauliche Projekte ins Rampenlicht, weshalb in dieser Ära wenig unternommen wurde, die längst anstehende Publikation zu verfassen, welche erst 1948, aber dafür in internationalem Rahmen erschien. Es scheint fast, dass die kurze Zusammenfassung von 1949 vergessen wurde, dann aber doch noch an die Schweizer Kollegen des Flussbaus gedacht wurde.

Anlässlich des 70. Geburtstags von *Meyer-Peter* legte die Schw. Bauzeitung dem Jubilar eine Festschrift vor, in welcher sich seine Berufskollegen mit namhaften Beiträgen ihre Verbindung zu ihm knüpften. Spezifisch im Fachgebiet zu erwähnen sind *Jakob Hagen* (1883–1969), *Meyer-Peters* langjähriger Assistent und später Honorarprofessor der ETH, welcher ihm seit 1920 diente, der bereits erwähnte *Robert Müller* mit einer Beschreibung über das flussbauliche Versuchswesen an der VAW, die Herren PD Dr. *Armin von Moos* (1907–1981) und Prof. Dr. *Robert Haefeli* (1898–1978) als Leiter der VAW-Abteilung Erdbau und Glaziologie, der Norweger Dipl. Ing. *Laurits Bjerrum* (1918–1973), damals ein wichtiger Experte im Dammbau, *Henry Favre* mit einer historischen Arbeit über den Hydrauliker *Adam de Craponne* und *Gerold Schnitter* (1900–1987), *Meyer-Peters* Nachfolger als Wasserbau-Professor und VAW-Direktor, mit einer Arbeit über Massenbeton bei Talsperren.

Das Thema der vorliegenden Arbeit

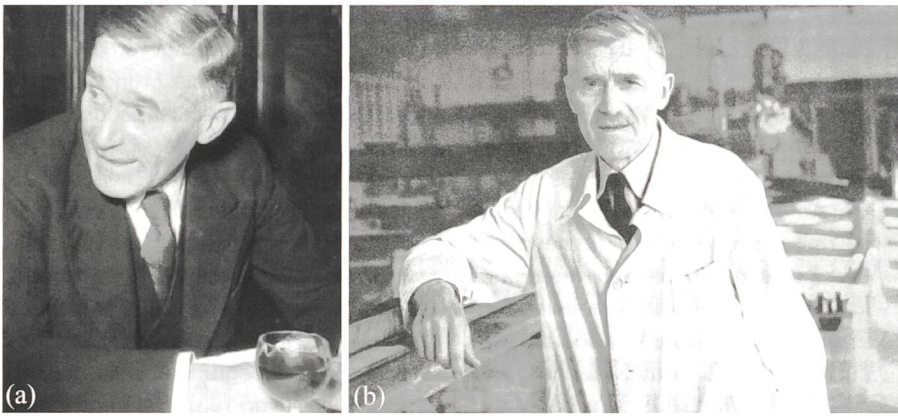


Bild 9. Eugen Meyer-Peter um (a) 1923 (ETH-Bibliothek Zürich, Bildarchiv/Hs_1002-0009-224 / Public Domain Mark), (b) 1945 (Anonym 1945).

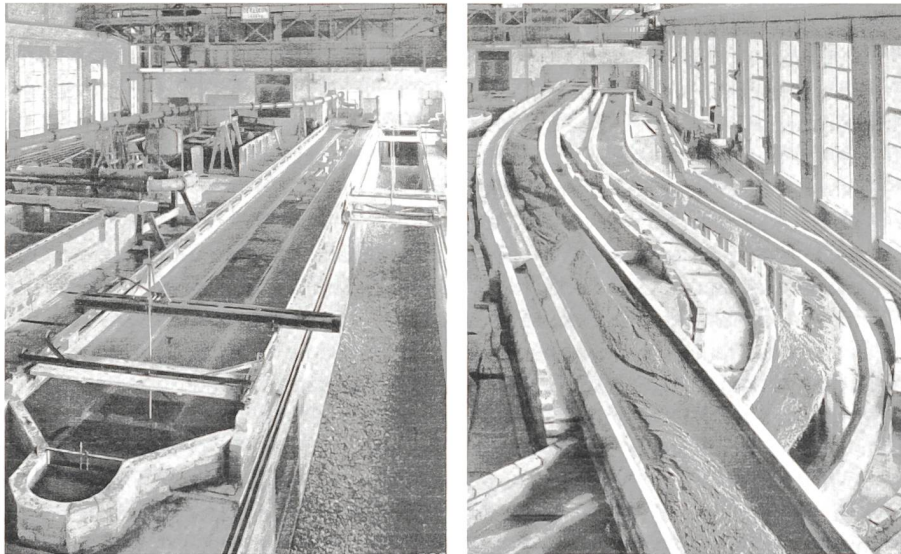


Bild 10. Rheinmodelle im VAW-Laboratorium (Müller 1953).

wird durch Müller (1953) sicherlich am besten beschrieben. Eingangs wird erwähnt: «Viele Studierende haben bei Prof. Meyer-Peter die klar aufgebauten, interessanten und schönen Vorlesungen gehört. Manche bedauerten nur das Fehlen eines stärkeren persönlichen Kontakts mit dem uns allen doch so sympathischen Professor. Als wir Studierende des 8. Semesters 1931 in der im April 1930 eröffneten Versuchsanstalt in einfachen Übungen Vorgänge der Hydraulik erkennen und messen konnten, fanden wir dies selbstverständlich. Dass dieses Hilfsmittel erst geschaffen worden war, interessierte uns kaum.» Seit dann «begann ein eifriges Forschen nach eigenem Erkennen der Zusammenhänge. Vor allem die Hydraulik von Wasserläufen mit beweglicher, loser Gerinnesohle wurde bald zum Steckenpferd des Professors. Nach der Vorlesung verschwand der Professor ins Labor und war nicht mehr zu erreichen. Unsere Studien und Berichte wurden über Samstag und Sonntag korrigiert und bereinigt. «I ha ka Zyt» war allgemein bekannt, und doch fand Prof. Meyer immer wieder Zeit für alles und jeden.» Mit den im Dezem-

ber 1931 durch das Eidg. Departement des Innern auf Anregung des Eidg. Oberbauinspektorates der VAW erteilten Auftrags zur Abklärung der Intl. Rheinregulierung zwischen Ill-Mündung und Bodensee kam der Stein ins Rollen. Die im Jahre 1923 beendigte Rheinregulierung mit den beiden Durchstichen bei Diepoldsau und Fussach hatte nämlich nicht den erhofften Erfolg. Im Frühjahr 1932 konnten die Versuche für den Rhein beginnen, wobei gleich die Unmöglichkeit der Nachbildung der natürlichen Geschiebemischung, weil diese im Massstab 1:100 zu fein geworden wäre, ein grosses Hindernis bedeutete. Bild 10 zeigt das erste und zweite Rheinmodell.

Weiter berichtet Müller (1953): «Gleichzeitig begannen die systematischen Versuche im Messkanal. Sowohl die systematischen Geschiebeversuche wie auch die speziellen Rheinmodellversuche waren erfolgreich. Im Jahre 1934 konnte die festgestellte Gesetzmässigkeit der Geschiebeführung in einer 1. Formel veröffentlicht werden. Mit den speziellen Versuchen für den Rhein gelang andererseits der qualitative Nachweis, dass mit einer Einengung

des Mittelgerinnes das Wasser mit einem kleineren Gefälle das dem Gerinne zugeführte Geschiebe zu transportieren vermag. Nach langen Studien gelang es, eine Methode zu finden, die, angewendet auf den Rhein, die Naturbeobachtungen quantitativ vollkommen richtig wiedergab. So war die erste Etappe der Forschung um 1935 beendet; alle Beteiligten fanden die Ergebnisse als vorläufig genügend, um das dringliche Rheinproblem in der Praxis zu lösen. Der Auftraggeber lehnte jedoch unsere Folgerungen ab, und Prof. Meyer musste erleben, dass seine grossen Bemühungen vorerst noch fruchtlos blieben.»

Müller (1953) fährt fort: «Es galt also, mit weiteren systematischen Untersuchungen zu überzeugen. Durch Versuche mit verschiedenen spezifischen Gewichten der Geschiebe konnte dieser Einfluss abgeklärt werden. Erstmals gelang damit auch der Nachweis, dass die strenge Ähnlichkeit der Geschiebetriebvorgänge geometrisch ähnliches Korn gleichen spezifischen Gewichtes in Modell und Natur erfordert und dass für die Geschiebemenge derselbe Massstab gilt wie für eine Wassermenge. Schliesslich war es für die Weiterentwicklung von grosser Bedeutung, als, auf Anregung des Eidg. Oberbauinspektorates, die Gemeinsame Rheinkommission im Sommer 1938 die Versuchsanstalt erneut mit den modelltechnischen Untersuchungen des Rheinproblems beauftragte. Es war für uns ein Erlebnis, als im neuen, grundrissgetreuen Modell schon nach einer Stunde Mitteljahrbetrieb im [total] 120 m langen Modell alle Kiesbänke sich naturgetreu gebildet hatten (Bild 10b). Die Untersuchung dauerte weitere drei Jahre. Die Formel 1948 wurde, wie ihre Vorgängerin, auch im Ausland mit grossem Interesse aufgenommen. Prof. Meyer kann also auf eine abgeschlossene zweite Etappe zurückblicken. Sie brachte eine systematische Verfeinerung der Versuchsmethoden und mit der Formel 1948 ein schon wesentlich allgemeineres Resultat.»

Schliesslich schreibt Müller (1953): «Dank der Tatkraft von Prof. Meyer-Peter kann die Versuchsanstalt den kommenden Problemen der Hydraulik mit beweglicher Sohle getrost entgegensehen. Dies erforderte von jedem Beteiligten, vom Arbeiter bis zum Direktor, einen grossen Einsatz. Der Direktor war für alle das Vorbild: Wie wäre es sonst möglich gewesen, nicht nur dieses Forschungsgebiet, sondern noch viele andere in Hydraulik, in Wasserkraftanlagen, in Erdbau und Schnee, Abwasser und Hydrologie gleichzeitig zu entwickeln?» Müller trifft hier genau den Kern der Arbei-

ten von Meyer-Peter, er war ein Macher, ein Lehrer, ein Förderer und Förderer sowie ein grosses Beispiel für seine Umwelt. Glücklicherweise hat er in Mitarbeitern wie Müller die Unterstützung gefunden, um diese Resultate forschungstechnisch richtig zu verkaufen, was ihm und Müller schliesslich die Bezeichnung MPM-Formel als Vermächtnis hinterlassen hat.

9. Schlussfolgerungen

Die VAW-Sedimenttransportformeln von 1934 und 1948 sowie deren Werdegang in Hinsicht auf systematische und angewandte Versuche werden beschrieben. Dabei werden die Hintergründe sowohl zur gewählten Modelltechnik und den erarbeiteten Ähnlichkeitsbeziehungen durch die Versuchsanstalt für Wasserbau als auch zu den flussbaulichen Problemen des Diepoldsaueser Durchstichs am Alpenrhein erläutert. In diesem Zusammenhang kommt natürlich der Förderer dieser Untersuchungen, Prof. Meyer-Peter, ebenfalls in den Fokus der Beschreibungen. Sein unerlässlicher Einsatz, gepaart mit den Forschungsanstrengungen seiner wichtigsten Mitarbeiter, wird diskutiert und gewürdigt. Damit wird versucht, eine Lücke zu schliessen in dieser seit langer Zeit hängigen Frage.

Literatur

Abkürzungen: SBZ = Schweizerische Bauzeitung; SWW = Schweizerische Wasserwirtschaft.

Anonym (1920). Professur für Wasserbau. SBZ 75(1): 8.
Anonym (1927). Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH. SBZ 99(1): 9–10.
Anonym (1930). Inauguration de l'Institut hydraulique à l'Ecole polytechnique fédérale. Des Canaux, des Bateaux 11(1): 71–72.
Anonym (1933). Prof. Eugen Meyer-Peter. SBZ 101(18): 220.
Anonym (1935). Wissenschaftliche Forschung im Wasserbau. Schweizer Industrieblatt 8(14): 178.
Anonym (1945). Wasserbau: Unterhaltung mit Prof. E. Meyer-Peter in der Versuchsanstalt für Wasserbau. Atlantis 17(9): 417–420.
Braeckman, A. (1933). Le Laboratoire des recherches hydrauliques de l'Ecole Polytechnique de Zurich. La Technique des Travaux 9(5): 303–314.
Einstein, A. (1934). Der hydraulische oder Profil-Radius. SBZ 103(8): 89–91.
Einstein, H. A. (1937a). Die Eichung des im Rhein verwendeten Geschiebefängers. SBZ 110(14): 167–170.
Einstein, H. A. (1937b). Der Geschiebetrieb als Wahrscheinlichkeitsproblem. Dissertation ETH 902, ebenfalls erschienen als Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau. Rascher: Zürich.
Einstein, H. A., Müller, R. (1939). Über die Ähn-

lichkeit bei flussbaulichen Modellversuchen. Schweizer Archiv für Wirtschaft und Technik 5(8): 226–239.

Einstein, H. A. (1942). Formulas for the transportation of bed load. Trans. ASCE 107, 561–597.

Favre, H. (1935). Mesure des débits solides des cours d'eau. Annales des Ponts et Chaussées 105(8): 191–201.

Favre, H. (1936). Note complémentaire: Les études des débits solides des cours d'eau. Annales des Ponts et Chaussées 106(2): 88–91.

Gilbert, G. K. (1914). Transportation of debris by running water. US Geological Survey, Professional Paper 86. Government Printing, Washington DC.

Graf, W. H. (1984). Hydraulics of sediment transport. Water Resources Publications: Littleton CO.

Hager, W. H. (2012). Eugen Meyer-Peter und die Versuchsanstalt für Wasserbau. «Wasser Energie Luft» 104(4): 305–313.

Hager, W. H. (2014). Albert Strickler: Sein Leben und Werk. «Wasser Energie Luft» 106(4): 297–302.

Hager, W. H. (2015a). Jost Wey und die Alpenrhein-Korrektion. «Wasser Energie Luft» 107(3): 233–241.

Hager, W. H. (2015b). Armin Schoklitsch. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 67(1–2): 70–75; 67(3–4): 153–161; 67(5–6): 240–246.

Hager, W. H. (2016a). Rudolf Ehrenberger, Hydrauliker und Wasserbauer. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 68(3): 154–165.

Hager, W. H. (2016b). Friedrich Schaffernak als Wasserbauer und Mensch. Österr. Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (eingereicht).

IRR, ed. (1993). Der Alpenrhein und seine Regulierung, 2. Aufl. Buchs Druck und Verlag: Buchs.

Kramer, H. (1932). Modellgeschiebe und Schleppkraft. Mitteilung 9. Preuss. Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau: Berlin.

Matschoss, C. (1917). Hochschulfragen in der Schweiz. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure 61(47): 937–940.

Meyer-Peter, E. (1922). Über den heutigen Stand des wasserbaulichen Versuchswesens. SBZ 79(6): 67–72.

Meyer-Peter, E. (1925a). Wissenschaftliche und wirtschaftliche Bedeutung des wasserbaulichen Versuchs. SBZ 85(1): 1–4.

Meyer-Peter, E. (1925b). Projekt für ein Wasserbau-Laboratorium an der Eidgen. Technischen Hochschule in Zürich. SBZ 86(2): 15–21; ebenfalls erweiterter Sonderdruck SIA, 8p.

Meyer-Peter, E. (1929). The Experiment Laboratory for Hydraulics at the Federal Institute of Technology at Zurich, Switzerland. Hydraulic laboratory practice: 589–597, J.R. Freeman, ed. ASME: New York.

Meyer-Peter, E. (1930a). Die Versuchsanstalt für Wasserbau an der Eidg. Techn. Hochschule. SBZ 95(16): 205–212; 95(17): 221–225.

Meyer-Peter, E. (1930b). Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH. Schw. Wasser- und Elektrizitätswirtschaft 22(5): 74–83.

Meyer-Peter, E. (1930c). Le Laboratoire de recherches hydrauliques annexé à l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich. Le Génie Civil 97(11): 245–251.

Meyer-Peter, E. (1932). Wasserführung, Sinkstoffführung und Schlammablagerung des Alten Rheins. Mitteilung 31. Amt für Wasserwirtschaft: Bern.

Meyer-Peter, E. (1934). Anwendung der Modellversuche auf den Flussbau. Verhandlungen der Schw. Naturforschenden Gesellschaft 115: 473–475.

Meyer-Peter, E., Favre, H., Einstein, A. (1934). Neuere Versuchsergebnisse über den Geschiebetrieb. SBZ 103(13): 147–150.

Meyer-Peter, E., Favre, H., Müller, R. (1935). Beitrag zur Berechnung der Geschiebeführung und der Normalprofilbreite von Gebirgsflüssen. SBZ 105(9): 95–99; 105(10): 109–113.

Meyer-Peter, E., Hoeck, E., Müller, R. (1937). Die Internationale Rheinregulierung von der Illmündung bis zum Bodensee. SBZ 109(17): 199–202; 109(18): 212–219; 109(22): 272.

Meyer-Peter, E., Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. Proc. 2nd IAHR Congress Stockholm A2: 1–26.

Meyer-Peter, E., Müller, R. (1949). Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebes. SBZ 67(3): 29–32.

Müller, R. (1937). Überprüfung des Geschiebegesetzes und der Berechnungsmethode der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH mit Hilfe der direkten Geschiebemessung am Rhein. SBZ 110(15): 180–184.

Müller, R. (1943). Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauungen. Versuchsanstalt für Wasserbau Mitteilung 4. Leemann: Zürich.

Müller, R. (1944). Die Kolkbildung beim reinen Unterströmen und allgemeinere Behandlung des Kolkproblems. Leemann: Zürich.

Müller, R. (1947). Der Wasserbau. Bau- und Ingenieurkalender. Meyer: Rapperswil.

Müller, R. (1953). Flussbauliche Studien an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH. SBZ 71(8): 102–105.

Schoklitsch, A. (1914). Über Schleppkraft und Geschiebebewegung. Engelmann: Leipzig.

Schoklitsch, A. (1934). Der Geschiebetrieb und die Geschiebefracht. Wasserkraft und Wasserwirtschaft 29(4): 37–43.

Vischer, D.L., Schnitter, N. (1991). Drei Schweizer Wasserbauer. Verein für wirtschaftshistorische Studien: Meilen.

Anschrift des Verfassers

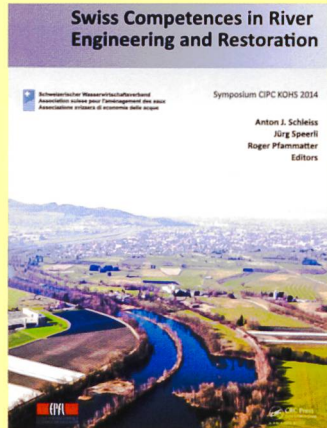
Prof. Dr. Willi H. Hager, VAW, ETH-Zürich, CH-8093 Zürich.



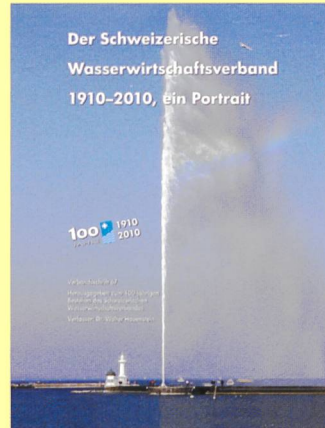
Bestellen Sie unsere Verbandschriften direkt unter: www.swv.ch



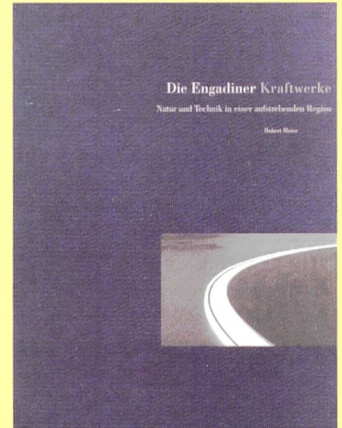
VS: Nr. 69, *Der Verband Aare-Rheinwerke 1915 bis 2015 – Rückblick auf ein Jahrhundert Wasserwirtschaft*, von Hans Bodenmann und Roger Pfammatter, ISBN 978-3-033-05079-2, CHF 25.–.



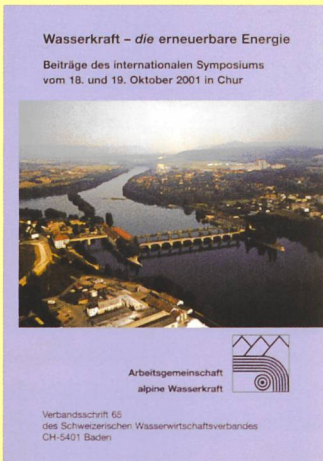
VS: Nr. 68, *Symposium CIPC KOHS 2014*, Anton Schleiss, Jürg Speerli, Roger Pfammatter (Eds.), 2014, 214 Seiten, Format A4, ISBN 978-1-138-02676-6, CHF 50.–.



VS: Nr. 67, *Der Schweizerische Wasserwirtschaftsverband 1910–2010, ein Portrait*, von Walter Hauenstein, 2010, 156 S. Format 17 × 24 mm, ISBN 978-3-85545-155-5, CHF 40.–.



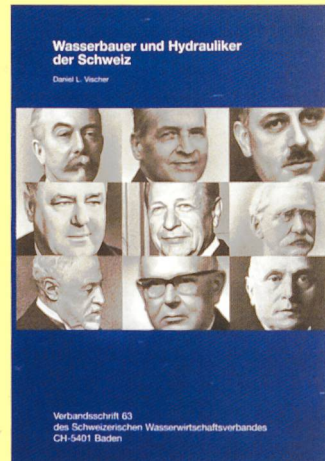
VS: Nr. 66, *Die Engadiner Kraftwerke – Natur und Technik in einer aufstrebenden Region*, von Robert Meier, 2003, 207 S., Format 28.5 × 20.5 cm, ISBN 3-85545-129-X, CHF 60.–.



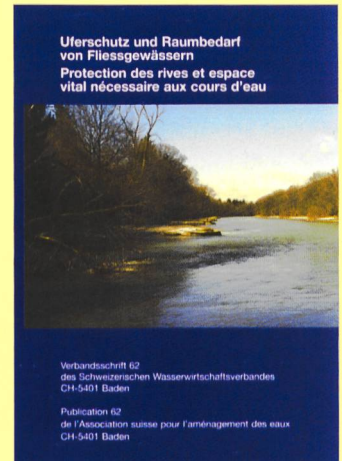
VS: Nr. 65, *Wasserkraft – die erneuerbare Energie*, Beiträge des internationalen Symposiums vom 18./19. Okt. 2001 in Chur, CHF 30.–.



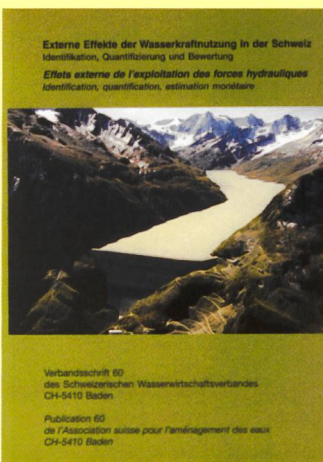
VS: Nr. 64, *Ökologische (Teil A) und technisch/ökonomische Qualitäten der Wasserkraft*, ecoconcept, Zürich und Schnyder Ingenieure AG, Ottenbach, CHF 40.–.



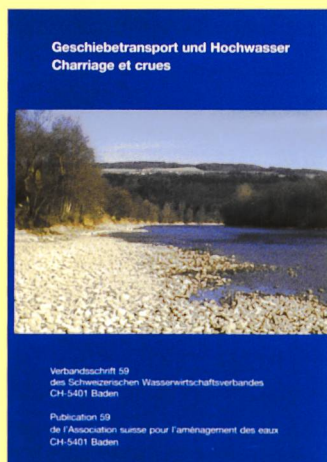
VS: Nr. 63, *Wasserbauer und Hydrauliker der Schweiz*, Kurzbiografien ausgewählter Persönlichkeiten, 2001, von Daniel L. Vischer, CHF 50.–.



VS: Nr. 62, *Uferschutz und Raumbedarf von Fließgewässern/Protection des rives et espace vital nécessaire aux cours d'eau*, 2001, Vorträge in Biel, CHF 40.–.



VS: Nr. 60, *Externe Effekte der Wasserkraftnutzung/Effets externe de l'exploitation des forces hydrauliques*, 1999, CHF 50.–.



VS: Nr. 59, *Geschiebetransport und Hochwasser/Charrage et crues*, Vorträge in Biel, 1998, CHF 50.–.



VS: Nr. 57, *Betrieb und Wartung von Wasserkraftwerken*, 1998, Bernard Comte, CHF 120.–.



VS: Nr. 54, *Directives pour l'exploitation et la maintenance des groupes hydroélectriques*, 1995, Bernard Comte, CHF 98.–.