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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 78 (1986)

Heft: 10

Artikel: Geschwindigkeitsmessung unter beträchtlicher Stromlinienkrümmung und hoher Fliessgeschwindigkeit

Autor: Hager, Willi H. / Bretz, Nicola V.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940878

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: 12.07.2025

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

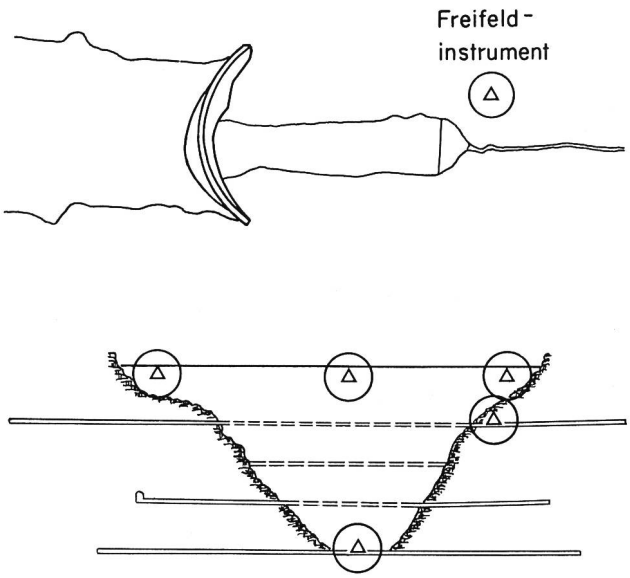


Bild 6. Geplante Anlageinstrumentierung der Bogenmauer Mauvoisin.

gramme auch stärkerer Bodenerschütterungen vollständig aufzuzeichnen. Es ist dies die notwendige Voraussetzung, um die massgebenden Erdbebenparameter erfassen zu können.

8. Weiteres Vorgehen

Falls die Forschungsarbeiten in allen Bereichen erfolgreich abgeschlossen werden können, was frühestens 1988 der Fall sein dürfte, ist vorgesehen, vorerst etwa 5 bis 8 ausgewählte Talsperren zu überprüfen und weitere nur dann in die Überprüfung einzubeziehen, wenn sich wider Erwarten zeigen sollte, dass die Erdbebensicherheit aller oder einzelner der untersuchten Anlagen nur knapp genügend oder gar ungenügend ist. Offen ist noch, ob die Berechnung mit einem gewählten Bemessungsbeben durchgeführt (z.B.: das 1000- oder 10000jährliche Erdbeben) oder die dynamische Anregung in Schritten solange gesteigert werden soll, bis das Bauwerk bricht. Letzteres dürfte aussagekräftiger und deshalb vorzuziehen sein, weil gleichzeitig die Empfindlichkeit der Talsperre bezüglich dynamischer Beanspruchungen erkannt wird und dies auch beurteilen lässt, ob das Schadenbeben überhaupt auftreten kann respektive mit welcher Wahrscheinlichkeit es zu erwarten ist und welche übrigen Schäden dabei resultieren.
Spätestens in einigen wenigen Jahren soll auch die Forschung für Dämme gefördert werden. Dabei wird man an erste Forschungsarbeiten anschliessen können, die derzeit an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne im Gange sind und erwarten lassen, dass auch der Verflüssigungseffekt numerisch erfasst werden kann.

Adresse des Verfassers: Dr. *Rudolf Biedermann,* Beauftragter für die Sicherheit der Talsperren, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Postfach 2743, CH-3001 Bern.

Vortrag, gehalten am Symposium über Erdbeben vom 7. bis 10. April 1986 in Brig.

Geschwindigkeitsmessung unter beträchtlicher Stromlinienkrümmung und hoher Fliessgeschwindigkeit

Willi H. Hager und Nicola V. Bretz

Zusammenfassung

Anhand von Versuchsresultaten werden Abflüsse mit beträchtlicher Stromlinienkrümmung und hoher Fliessgeschwindigkeit wie sie in der hydraulischen Modelltechnik häufig auftreten untersucht. Die dafür entwickelten Prototypen von Geräten erlauben auch Aufschluss über den internen Strömungscharakter von Überfällen und Tosbecken zu geben.

Summary

Based upon experimental results, flows with considerable curvature of the streamlines and with high velocity as appear in hydraulic model studies are investigated. The used prototype instruments allow to examine the internal flow mechanisms of spillways and stilling basins.

1. Einleitung

Die Modelltechnik hat sich im Bereich der Hydraulik und der Hydromechanik zu spezialisierten Disziplinen entwickelt, denen der planende Ingenieur meist nur noch am Rande folgen kann. Von den modernen Messtechniken wie die Hitzdraht-Anemometrie oder die Laser-Doppler-Anemometrie, die hochentwickelter elektronischer Datenübermittler bedürfen, sind häufig nur die Grundprinzipien bekannt; ihr Einsatz ist jedoch den entsprechenden Laboratorien vorenthalten.
Bei reinen Wasserströmungen werden im wesentlichen Geschwindigkeits- und Druckprofile aufgenommen. Dabei wird unterschieden zwischen schwach- und hochturbulenten Abflüssen. In den ersten kann auf die Ermittlung der turbulenten Schwankungsgrössen weitgehend verzichtet werden, während bei den zweiten die zeitlichen Änderungen von Druck und Geschwindigkeit einen wesentlichen Bestandteil des Phänomens darstellen. Komplexer als reine Wasserströmungen sind Abflüsse, die aus mehreren Phasen wie Wasser und Sediment oder Wasser und Luft bestehen. In den folgenden Ausführungen werden *Wasser-Luft-Gemische* eingehender betrachtet, Sedimenttransport soll jedoch unberücksichtigt bleiben.
Die klassischen Geräte zur Ermittlung lokaler *Geschwindigkeiten* basieren hauptsächlich auf dem Prinzip des Prandtl-Rohres, also eines kombinierten Gebers, der sowohl den statischen Druck $p/(\rho g)$ wie auch den Strömungsdruck $p/(\rho g)+V^2/(2g)$ misst. Der Differenzdruck führt somit auf die Geschwindigkeitshöhe $V^2/(2g)$, die auf einem Manometer abgelesen werden kann. Dieses Verfahren setzt eine Strömung von luftfreiem Wasser voraus; gelangen Luftblasen in die Verbindungsleitungen, so wird die Messung verfälscht. Weiter sollen die Stromlinien fast parallel verlaufen, damit die Druckunterschiede zwischen den beiden Sondenöffnungen klein bleiben. Das Messen der Geschwindigkeit anhand der Prandtl-Sonde braucht viel Zeit. Im Mittel werden 10 bis 15 Minuten pro Einzelmessung aufgewendet, bis der Manometerdruck dem effektiven Druck entspricht. Zudem lassen sich Geschwindigkeiten unter $V_l \simeq 0{,}6\,m/s$ nur ungenau eruieren. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber anderen Geräten ist jedoch die geringe Baudicke (etwa 1 mm), womit insbesondere in der Umgebung

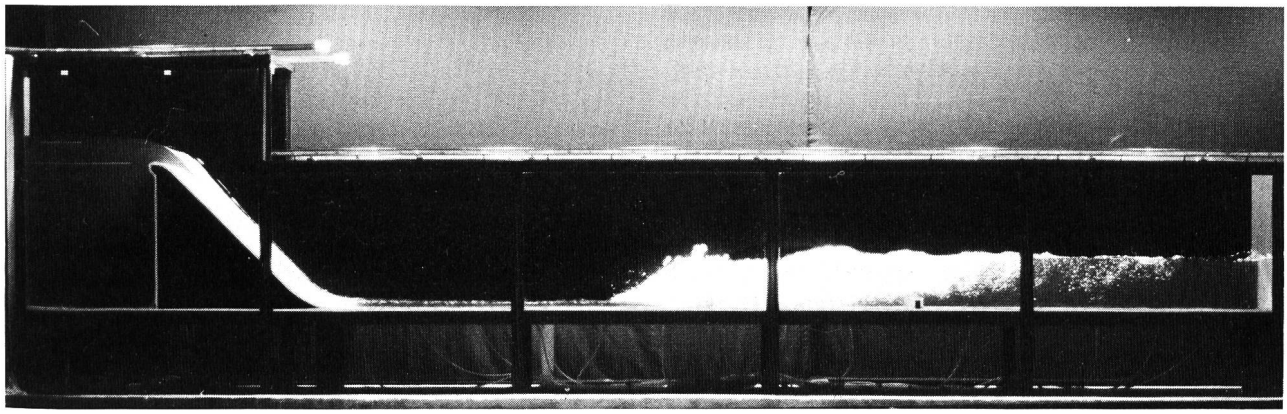


Bild 1. Die Versuchsanordnung im rechteckigen Versuchskanal des Chaire de constructions hydrauliques der EPF-Lausanne. Das Wasser fliesst im Bild von links nach rechts: über einen Überfall, anschliessend über eine 45° geneigte Schussrinne und eine 8 m lange Horizontalstrecke.

von Wänden in der Grenzschicht gemessen werden kann [4]. Eine zweite verbreitete Art der Geschwindigkeitsmessung basiert auf *Messflügeln.* Ein Propeller wird dabei in die Strömung gehalten, dessen Umdrehungszahl pro Zeiteinheit direkt auf die lokale Fliessgeschwindigkeit schliessen lässt. Je nach Einsatzzweck (Labor, Bäche, Flüsse, Druckrohre) gelangen Propellerdurchmesser von 5 mm bis 20 cm zum Einsatz. Heute besitzen die meisten Geber ein direktes Geschwindigkeitsanzeigegerät, während früher mit Eichkurven von der Umdrehungszahl pro Zeiteinheit auf die Fliessgeschwindigkeit geschlossen wurde. Einer der Vorteile des Messflügels ist somit die *unmittelbare,* wenn auch gedämpfte Erfassung des zeitlichen Geschwindigkeitsverlaufes. Die turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen lassen sich weder durch das Prandtl-Rohr noch durch Propellergeräte bestimmen.

Die meisten Drücke werden als Wanddrücke ermittelt, es werden also die auf die feste Umgebung des Fliessquerschnittes wirkenden Kräfte gemessen. Dafür bohrt man die Kanalwand fachgerecht an und verbindet die Öffnung mit einem Manometer. Liegen viele solcher Druckbohrungen vor, werden die Anschlüsse mit einer Manometerharfe verbunden. Im Falle hintereinanderliegender Wandbohrungen kann dann auf bildliche Weise der Verlauf der Drucklinie auf die Gerinnebegrenzung verfolgt werden.

Zur Ermittlung der Drücke im Innern der Strömung werden entweder Zwei- oder Vierlochsonden vorgeschlagen. Ist der Staudruck zusätzlich zu messen, führt dies auf die Fünflochsonde. Solche Messungen sind jedoch zeitlich aufwendig und nicht sehr genau [5]. Deshalb ist es empfehlenswert, sich in die Strömung selbsteinstellende Geräte zu benützen.

Die heutigen Neuentwicklungen der Geschwindigkeitsmesstechnik beziehen sich insbesondere auf die Ermittlung von kleinen ($V < 10$ cm/s) und grossen ($V > 3$ m/s) Geschwindigkeiten. Die Verfahren unterscheiden sich dabei grundsätzlich. Die folgenden Ausführungen beziehen sich lediglich auf die Messung von *hohen Geschwindigkeiten* bei verschiedenen Abflusstypen. Sowohl Hitzdraht- wie auch Laser-Doppler-Anemometrie weisen (bis heute) zwei wichtige Nachteile auf. Das Messmedium darf lediglich aus einer Phase bestehen und muss rein sein. Beide Verfahren versagen deshalb in Wasser-Luft-Gemischen der üblichen Laborqualität. Die Eichung der Messungen ist aufwendig. Die Geräte sind teuer. Heute werden sie vorwiegend in der physikalischen Strömungsforschung eingesetzt; sie finden sich in hydraulischen Labors nur in Ausnahmefällen.

Das Ziel der folgenden Ausführungen ist die Mitteilung von modifizierten Bauarten *konventioneller* Geschwindigkeitsmessgeräte, die an der EPF-Lausanne unter Mitwirkung der Firma Schiltknecht, Messtechnik AG, Gossau, erstellt wurden. Da dabei Fragestellungen des konstruktiven Wasserbaus und der Kanalisationstechnik berührt werden, dürften die Resultate auch den planenden Ingenieur interessieren.

2. Problemstellungen

Bild 1 zeigt einen Rechteckkanal der Breite b = 0,50 m des Chaire de constructions hydrauliques der EPF-Lausanne. Zwei Pumpen mit einer gesamten Kapazität von 400 l/s führen Wasser in ein Beruhigungsbecken. Im oberen Bereich des Kanals befindet sich ein Standardüberfall. Seine Wehrhöhe ist w = 0,70 m und seine Dimensionierungsüberfallhöhe $H_D = 0{,}10$ m. Über eine Schussrinne der Neigung 45° fliesst das Wasser anschliessend einer 8 m langen Horizontalstrecke zu. An ihrem Unterwasserende kann durch eine bewegliche Klappe ein variabler Wasserstand eingestellt werden.

Momentan dient der Kanal zwei Projekten. Einerseits soll die Wirkung von *Standardüberfällen* unter hoher, relativer Überfallhöhe untersucht werden, andererseits finden auf der Horizontalstrecke Versuche mit durchgehenden Querschwellen zur Stabilisierung von Wassersprüngen in *Tosbecken* statt. Für beide Projekte genügen die konventionellen Verfahren zur lokalen Geschwindigkeitsmessung nicht. Im Bereich des Überfalls ist dafür insbesondere die hohe Stromlinienkrümmung die Ursache. Im Bereich der Querschwelle erschweren das *Wasser-Luft-Gemisch* sowie die *hohe Fliessgeschwindigkeit* von rund 4 m/s die Messungen.

3. Die Messgeräte

Da in beiden Projekten die Geschwindigkeit sowohl in Längs- wie auch in den Querrichtungen erheblich variiert, ist ein dichtes Messnetz vorgesehen. Pro Durchflusseinstellung wird dabei an mindestens 100 Punkten gemessen, womit die Fliessverhältnisse näherungsweise wiedergegeben werden können. Um die Arbeiten in einer vernünftigen Zeitspanne abschliessen zu können, müssen somit rationelle Messverfahren entwickelt werden. Deshalb fiel die Wahl der Geschwindigkeitssonde auf den Typ Propeller. Infolge ihrer geringen Bauabmessungen (Durchmesser 8 mm), des Messbereichs zwischen 0,1 bis 5 m/s (in drei verschiedenen Bereichen) und der Messgenauigkeit von ±1,5% ist das Gerät Mikro-Mini-Water der Firma Schiltknecht geradezu ideal für diese Messungen.

Infolge der schiessenden Strömungscharakteristik mit Froude-Zahlen bis $F = 8$ muss die Sonde an einer *stabilen Halterung* befestigt werden, die auch im Bereich der hochturbulenten Wassersprünge keine allzu grossen Vibratio-

nen erleidet. Die Wahl der Halterungsstange fiel auf ein kommerziell hergestelltes Ovalprofil 15 × 30 mm. Mit Hilfe eines Klemm-Mechanismus wird die Stange auf dem Messwagen befestigt. Die Stange lässt sich darauf durch eine Zahnstange vertikal verschieben. Der Wagen selbst rollt auf Längs- und Querschienen, womit die Translation in allen drei Raumrichtungen sichergestellt ist.

Eine einfach zu handhabende Drehvorrichtung am oberen Stangenende erlaubt es, die *Geschwindigkeitssonde* zu drehen. Gleichzeitig kann die Sonde in der Vertikalebene gedreht werden. An einem beliebigen Punkt des Strömungsfeldes sind die beiden Raumrichtungen somit einstellbar (Zylinderkoordinaten), woraus sich der Betrag des Geschwindigkeitsvektors bestimmen lässt.

Die beiden Richtungen selbst werden durch zwei andere, voneinander unabhängige *Richtungssonden* gemessen. Das erste Instrument ist dabei schon ausführlich beschrieben [2] und basiert auf dem Fahnenprinzip. Ein Plättchen wird an einer vertikalen Achse in eine Strömung gehalten, womit sich dieses selbst in die Strömung einstellt. Durch mechanische Übertragung des Winkels auf einen Transporteur, befestigt am oberen Ende der Halterungsstange, lässt sich der Momentanwert direkt ablesen. Die Erfahrungen bezüglich Messgenauigkeit und Stabilität haben uns auch in diesen Forschungsprojekten auf dieses einfache Gerät zurückgreifen lassen.

Das zweite Gerät erlaubt die Ermittlung des Strömungswinkels gegenüber der Horizontalebene. Es ist prinzipiell identisch der Axialwinkelsonde, besitzt aber ein in Wasser ausbalanciertes Plättchen. In ruhendem Wasser zeigt es also keine Abweichung gegenüber der Horizontalen an. In Vorversuchen bereits hat sich dieses Gerät als äusserst wertvoll bewährt, insbesondere betreffend der Stabilität. Der Strömungswinkel wird durch ein Potentiometer auf ein Ablesegerät übertragen, womit auch Messungen in Wasser-Luft-Gemischen mit grosser Blasenzahl durchgeführt werden können. Die Plättchenabmessungen betragen 27,5 × 16 mm ($V > 2$ m/s) sowie 55 × 32 mm für kleinere Geschwindigkeiten.

4. Ablösungserscheinungen

Vorversuche mit den oben beschriebenen Geräten haben eine unannehmbare Nebenerscheinung gezeigt. Sowohl im Bereich der stark gekrümmten Strombahnen als auch im Hochgeschwindigkeitsbereich hat sich die Strömung von den Halterungsstangen abgelöst. Die Wasseroberfläche ist dabei vornehmlich in der Unterwasserzone der Instrumente aufgerissen. Als Folge dieser ausgeprägten *Strömungsablösungen* von der Halterungsstange haben sich die Strömungsverhältnisse im Bereich der Sonde selbst grundlegend geändert. Es hat sich deshalb die Frage gestellt, ob es möglich ist, Geschwindigkeiten in derartigen Strömungen im nahezu *ungestörten* Abflusszustand zu ermitteln.

Um das Wesen der Ablösungserscheinungen etwas genauer zu untersuchen, sind für weitere Vorversuche verschiedene Ausbildungen des unteren Bereichs der Halterungsstangen als Attrappen aus PVC hergestellt worden. Alle Profile basieren auf dem Ovalprofil 1,5 × 3,0 cm (Bild 2).

5. Diskussion der Versuchsresultate

Stark gekrümmte Stromlinien

Bild 3 zeigt das Wesen von Abflüssen mit stark gekrümmten Stromlinien, deren Krümmungsmittelpunkt unterhalb der Abflusszone liegt. Wie bereits von *Boussinesq* erkannt [1] und später eingehend von *Jaeger* [3] erforscht, liegt bei diesen Abflüssen der Maximalwert der Geschwindigkeitsverteilung quer zur Fliessrichtung nahe der Gerinnesohle. Der Minimalwert findet sich nahe der Oberfläche. Überfallströmungen können nahezu als Potentialströmungen betrachtet werden. Die Bodendruckverteilung verläuft unterhalb der hydrostatischen Drucklinie. Sind die Stromlinien genügend gekrümmt, können sogar Fliesszonen auftreten, in denen der Druck kleiner als der atmosphärische Druck ist.

Wird ein *Standardüberfall* mit der Dimensionierungshöhe H_D beaufschlagt, so stellt sich längs der Wehrkrone nahezu atmosphärischer Druck ein. Ist jedoch $H > H_D$, so ist der Druck entlang der Wehrkrone kleiner als der Atmosphärendruck. Die Luft an der freien Oberfläche hat deshalb das Bestreben, einen Druckausgleich mit diesen Abflusszonen zu schaffen.

In Bild 3 wird dieses Verhalten durch eine in einen Abfluss mit $H/H_D = 2{,}5$ eingebrachte Pegelspitze veranschaulicht. Im Oberwasserbereich a) ist der Druck noch nahezu hydrostatisch verteilt, durch die Störung wird deshalb noch keine Luft eingetragen. Wird die Pegelspitze jedoch näher an die Wehrkrone bewegt, b), treten oberflächlich hinter der Pegelspitze erste Bläschen in den Abfluss. An der Wehrkrone selbst, c), gelangt Luft bereits an den Wehrboden. Sichtbar ist die *lokale,* V-förmige Öffnung der Oberfläche. Im Unterwasser der Wehrkrone schliesslich, d), wird die Wasseroberfläche *vollständig* geöffnet.

Es sollte an dieser Stelle beachtet werden, dass die Pegelspitze lediglich einen Durchmesser von 6,2 mm besitzt.

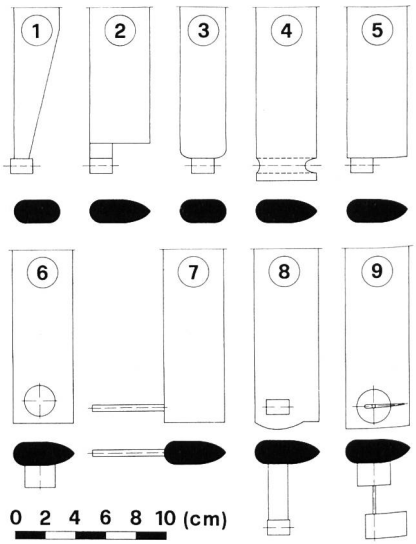


Bild 2. Übersicht über die untersuchten Typen von Halterungsstangen, Längsschnitt (oben) und Grundriss (unten).

Typ *1* ist ein sich gegen den Sondenkopf hin verjüngendes Ovalprofil. Die Stangenquerabmessung oberhalb der Sonde selbst beträgt noch lediglich 1,1 × 0,4 cm.

Typ *3* besitzt durchgehend das Ovalprofil der Halterungsstange und ist am unteren Ende kreisförmig ausgerundet.
Der Schnitt durch Typ *2* sowie die Typen *4* bis *7* ist ein Ovalprofil 1,5 × 3,0 cm. Am Unterwasserende ist ein fischprofilartiges Stück angesetzt. Die Gesamtlänge beträgt 4,0 cm.

Typ *2* endet unten scharfkantig, die Geschwindigkeitssonde mit der Elektronik ist am Oberwasserende befestigt. Dadurch kann der Sondenkopf einfach ausgewechselt werden.

In Typ *4* ist der Sondenkopf vollständig in die Halterungsstange integriert. Typ *5* zeigt einen Zwischenzustand bezüglich den Typen *2* und *4*. Typ *6* simuliert die Horizontalwinkelsonde. Gut sichtbar ist das seitlich angebrachte Potentiometer des Durchmessers 2,0 cm.

Typ *7* zeigt eine Gesamtdrucksonde, die starr mit der unten scharfkantig endenden Halterungsstange verbunden ist.

Die Typen *8* und *9* sind die schliesslich gewählten Anordnungen für die *Prototypen.* Sie werden unter 5. ausführlich beschrieben.

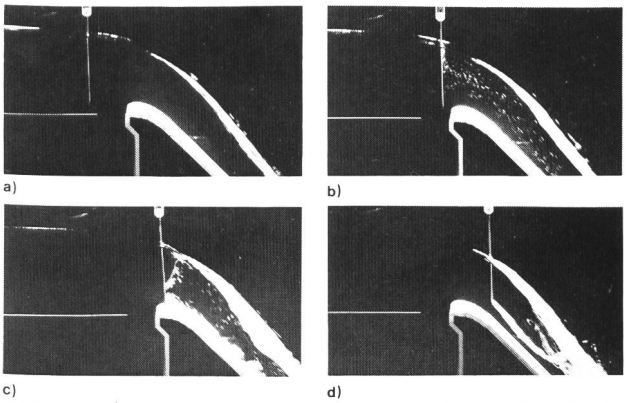


Bild 3. Der Einfluss einer in verschiedenen Lagen eingetauchten Stechpegelspitze auf den Abfluss und den Lufteintrag über einen Standardüberfall, Q = 150 l/s.

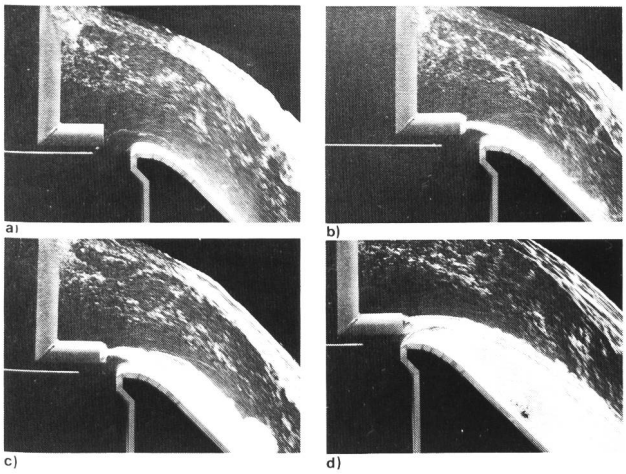


Bild 4. Der Einfluss eines in verschiedenen Lagen eingetauchten, L-förmigen Rohres auf den Abfluss und die Wirbelbildung über einen Standardüberfall, Q = 150 l/s.

Selbst «Halterungsstangen» dieser geringen Dimension sind unbrauchbar, da sie unweigerlich zu Strömungsablösungen führen.

Der *Mechanismus des Lufteintrags* lässt sich anhand des Bildes 4 genauer verfolgen. Wird ein mit der Atmosphäre in Verbindung stehendes, L-förmiges Rohr mit Durchmesser 5,0 cm in die Strömung gebracht, ist je nach Lage der Austrittsebene bezüglich des Wehrscheitels der Abfluss mehr oder weniger gestört. In Bild 4a ist ein kleiner Wirbel ersichtlich, der den Beginn der Belüftung anzeigt. Wird die Austrittsebene näher an den Wehrscheitel gebracht, Bild 4b, findet bereits eine lokale Bodenbelüftung statt, die sich in Bild 4c noch verstärkt. In Bild 4d schliesslich gelangt die Strömung über den Standardüberfall vollkommen zur Ablösung. Der Druck unterhalb des Strahles ist somit nahezu atmosphärisch. Der eigentliche Überfall ist dann vergleichbar mit einem scharfkantigen, belüfteten Wehr. Entsprechend sinkt der Durchflussbeiwert und steigt der Oberwasserspiegel. Diese Erscheinung kann bei Wehren mit schlechtausgebildeten Pfeilern gefährlich werden.

Bild 5 zeigt den *Einfluss des Durchflusses* auf die Wirbelablösung bei unveränderlicher Lage des «Störkörpers». Der Dimensionierungshöhe H_D = 10 cm des Wehres entspricht der Dimensionierungsdurchfluss Q_D = 30 l/s. Bild 5a zeigt die Abflussverhältnisse für Q = 50 l/s, während bei den folgenden Bildern eine Steigerung von je $\triangle Q$ = 50 l/s eingestellt worden ist.

Für Q = 50 l/s führt das in Bild 5a gezeigte Profil bereits zur partiellen Belüftung. Die Strömung löst sich dabei nicht am Unterwasserende der Halterungsstange, sondern direkt hinter der Oberwasserseite ab. In den folgenden Bildern b bis d verstärkt sich das Phänomen; von einer ungestörten Geschwindigkeitsmessung mit Hilfe einer derartigen Halterung kann deshalb nicht die Rede sein.

Bild 6 veranschaulicht das Ablösungsverhalten der Haltrungsformen *2, 3* und *4* nach Bild 2 unter Q = 150 l/s (H/H_D = 2,5). Typ *2* ist ein stromlinienförmiges Profil, das unten scharfkantig endet. Die eigentliche «Sonde» ist dann darunter befestigt. Diese Anordnung führt auf befriedigende Resultate am Überfall. Werden jedoch die Unterkanten ausgerundet, verschlechtert sich das Verhalten. Ganz deutlich ist dies anhand von Typ *3* zu ersehen, der im wesentlichen ein symmetrisches, unten abgerundetes Ovalprofil ist. In Bild 6d ist das Stromlinienprofil mit Typ *4* dargestellt. Bei diesem Typ ist die Messsonde in die Halterungsstange integriert. Alle Begrenzungslinien sind scharfkantig ausgeführt, und es zeigt sich ein gutes Strömungsverhalten. Zum Vergleich wird in Bild 6c die Sonde Typ *4* «verkehrt» in die Strömung gehalten, also die scharfkantige Längsseite nach oben gewendet. Anhand der Aufnahme geht hervor, dass die Strömung erst an der Unterwasserseite abreisst und dort zu massivem Lufteintritt führt. Alle unterwasserseitigen Begrenzungen müssen scharfkantig ausgebildet werden.

Abflüsse mit hoher Geschwindigkeit

Beim in der Praxis wohl meist zu untersuchenden Abfluss laufen die Stromlinien nahezu parallel. Mit den Halterungsstangen treten dabei keine Probleme auf, solange die Fliessgeschwindigkeit kleiner als 2 m/s ist. Abflüsse mit höherer Fliessgeschwindigkeit treten im Modellbau jedoch

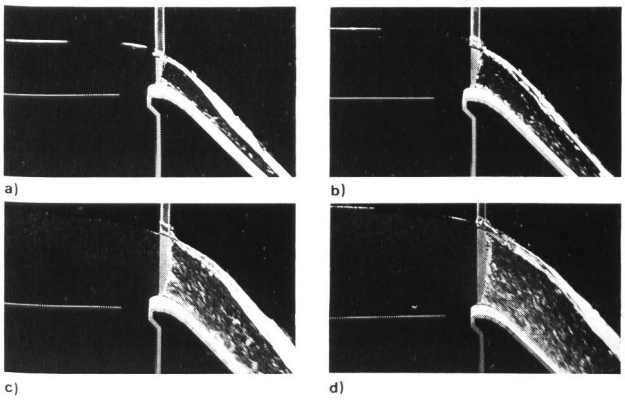


Bild 5. Halterungsstange *1* über der Wehrkrone unter verschiedenem Durchfluss, $\triangle Q$ = 50 l/s.

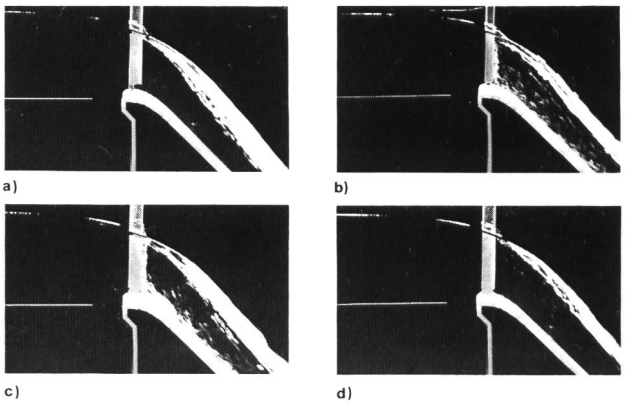
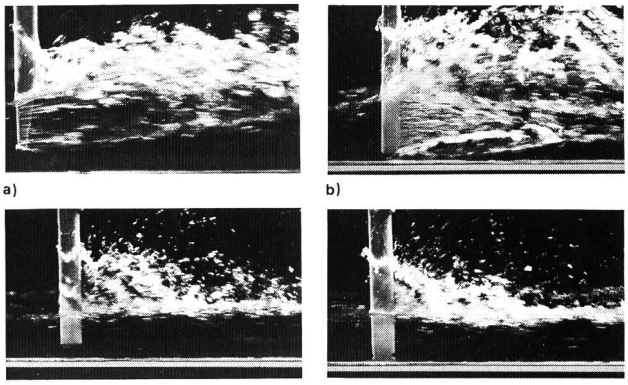
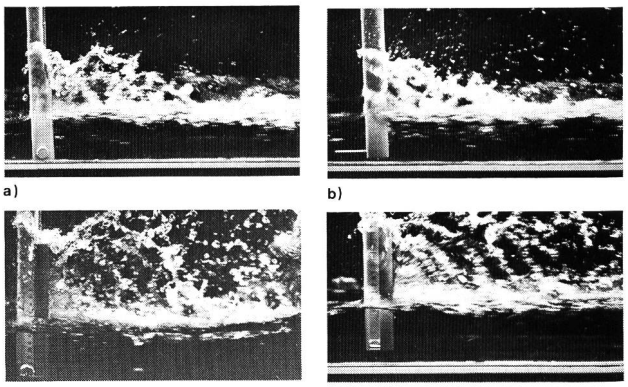


Bild 6. Halterungsstange Typ *2, 3, 4* über der Wehrkrone bei Q = 150 l/s.



a) b) c) d)

Bild 7. Halterungsstange Typ *1, 5, 2, 4* in Abfluss mit parallelen Stromlinien, $Q = 150$ l/s.



a) b) c) d)

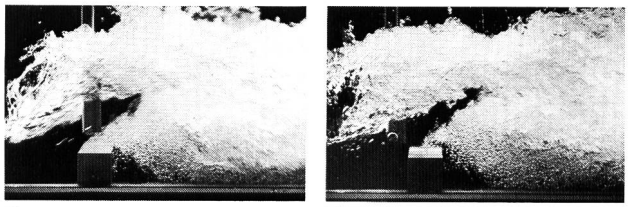
Bild 8. Halterungsstange Typ *6* und *7* sowie Prototypen im Abfluss mit parallelen Stromlinien, $Q = 150$ l/s.

durchaus auf, sei es längs Schussrinnen, vor Tosbecken oder an Auslässen. Sind die Halterungsstangen nicht fachgerecht ausgebildet, wird die Oberfläche des Abflusses durch den «Störkörper» aufgerissen. Luft kann dann durch die Trennfläche bis zum eigentlichen Instrument vordringen, und die Fliessgeschwindigkeit (oder andere Messwerte) entscheidend beeinflussen.

In Bild 7 sind die Halterungsstangen Typ *1, 2, 5* und *4* bei einer Fliessgeschwindigkeit von $V \simeq 3{,}8$ m/s dargestellt. Während die Strömung um Typ *2* am Unterwasserende abreisst und zu massivem Lufteintritt führt, tritt die Luft bei Typ *1* bereits hinter der Staulinie ein. Deutlich sichtbar ist die fast vollständige Belüftung des simulierten Propellergehäuses. Im Vergleich dazu herrscht bei den Typen *4* und *5* im Bereich der simulierten Instrumentenlage ein luftfreier Abfluss. Beide Halterungsstangen weisen dasselbe Fischprofil im Grundriss auf, und am unteren Ende wurde ein scharfkantiger Abschluss gewählt. Vorversuche mit leichter Ausrundung des Abschlusses haben zur Belüftung geführt. Die Bilder 7c und 7d zeigen im Vergleich zu a und b weit weniger Spritzer. Die Halterungsstange stört somit bei ablösungsfreiem Abfluss die Messsonde nur gering. Die Horizontalhalterungskraft ist im Falle Bild 7c und d wesentlich geringer als unter Ablösung.

Bild 8a und 8c zeigt Attrappe und Prototyp des Horizontalwinkelmessgeräts unter denselben Fliessverhältnissen. Wie aus Bild 8c hervorgeht, ist dabei das Fischprofil der Halterungsstange nur im untersten Bereich vorhanden, um darüber Platz für die Zahnstange zu schaffen.

Bild 8b zeigt die Attrappe eines Staurohres für Gesamtdruckmessung unter ablösungsfreier Strömung. Bild 8d schliesslich veranschaulicht den Prototyp des Geschwindigkeitsmessgerätes, das analog zum Vertikalwinkel-Messgerät aufgebaut ist. Herstellungstechnische Gründe haben jedoch zu einer im Vergleich zu den in den Bildern 7c und 7d modifizierten Anordnung geführt. Die Sonde selbst ist an einem strömungsgünstigen Querflügel seitlich der Halterungsstange angeordnet. Dadurch lässt sich der Propeller in Wandnähe bringen. Gleichzeitig wirken keine ungünstigen Einflüsse der Halterungsstange auf den Propeller; lokale Beschleunigungskräfte werden vermieden.



a) b)

Bild 9. Prototypen über Querschwelle, typische Versuchssituation; die Luft wird durch den Wassersprung sowie den Unterdruck an der Schwellenunterseite in den Abfluss eingetragen.

Bild 9 zeigt die beiden entwickelten Geräte in einer typischen auszumessenden Fliesssituation. Durch eine im Rechteckkanal eingebaute Querschwelle soll ein Wassersprung erzeugt werden, um damit eine lokale Energiedissipation zu erzwingen. Einer der möglichen Fliesszustände um die Schwelle besteht dann aus schiessendem Abfluss bis in die unmittelbare Schwellenzone; anschliessend formen sich unter massivem Lufteintrag beim Wassersprungfuss die Walze und der Wassersprung selbst. Der Abfluss an der Schwellenoberseite ist noch unbelüftet, während infolge der Unterdruckbildung Luftblasen aus dem Unterwasser an die Schwellenunterseite befördert werden.

Nachdem die freie Oberfläche mit Hilfe eines Stechpegels aufgenommen und die Verteilung des Bodendrucks durch die Bodendruckanschlüsse über die Messharfe ermittelt sind, wird an jedem beliebigen Punkt des Strömungsgebietes der Vertikalwinkel gemessen (Bild 9b). Anschliessend wird die Geschwindigkeitssonde in die gemessene Richtung orientiert und der Geschwindigkeitsbetrag bestimmt. Mit den Prototypen lässt sich damit das gesamte Strömungsgebiet in kurzer Zeit ohne nennenswerte Abflussstörung ausmessen.

6. Schlussfolgerungen

Beschrieben wird die Messung von Geschwindigkeit nach Richtung und Betrag in Abflüssen mit beträchtlich gekrümmten Stromlinien und mit hoher Geschwindigkeit. Dabei müssen die Instrumente an massiven Halterungsstangen befestigt sein, deren Querschnitt fischprofilartig ausgeführt und deren Unterwasserbegrenzung scharfkantig ausgebildet ist. Vorerst werden einige Profiltypen gezeigt, die den Anforderungen nicht entsprechen, um anschliessend die beiden Prototypen vorzuführen. Mit diesen und weiteren Geräten lassen sich die Aufgaben der wasserbaulichen Versuchstechnik befriedigend lösen. Anwendungen wie Überfälle oder Tosbecken werden vorgestellt.

Literatur

[1] *Boussinesq, J.*, «Théorie des eaux courantes», Mémoires présentés par divers savants, Vol. 23, 1877, Paris.

[2] *Hager, W.H.*, «Die Hydraulik von Verteilkanälen», Diss. ETHZ, Vol. 6948, Teile 1 und 2, Zürich, 1981.

[3] *Jaeger, C.*, «Technische Hydraulik», Birkhäuser, Basel, 1949.

[4] *Prandtl, L.*, «Führer durch die Strömungslehre», Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1948.

[5] *Wuest, W.*, «Strömungsmesstechnik», Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1969.

Die Verfasser möchten sich freundlich bei der Schiltknecht Messtechnik AG, Gossau ZH, bedanken für die Geduld und den technischen Ideenreichtum, die schliesslich zu den Prototypen geführt haben.

Adresse der Verfasser: *Willi H. Hager*, Dr., dipl. Bauing. ETH, und *Nicola V. Bretz*, dipl. Bauing. ETH, Chaire de constructions hydrauliques, Département de génie civil, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne.