Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 85 (1993)
Heft: 7-8

Artikel: Ein Durchbruch in der Abflussmessung?
Autor: Vischer, Daniel / Hächler, Hanspeter
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939983

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: 13.07.2025

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

Ein Durchbruch in der Abflussmessung?

Messung mit einem Ultraschall-Doppler-Gerät

Daniel Vischer und Hanspeter Hächler

Zusammenfassung

Der Abfluss in einem Fliessgewässer wird heute vornehmlich mit dem Messflügelverfahren gemessen. Dessen Anwendung erfordert eine gewisse Zeit – in einem Mittellandfluss beispielsweise mehrere Stunden – und setzt voraus, dass der Abfluss während dieser Zeit konstant bleibt. Es ist also nicht möglich, mit diesem Verfahren einen rasch schwankenden Abfluss zu erfassen, wie er insbesondere bei Hochwasser auftritt. Nun eröffnet diesbezüglich aber ein neues Messverfahren vielversprechende Möglichkeiten. Es stützt sich auf ein in den USA hergestelltes Ultraschall-Doppler-Gerät mit der Kurzbezeichnung ADCP (Broad Band Acoustic Doppler Current Profiler), das den Abfluss in wenigen Minuten erhebt. Eine in Anwesenheit von Vertretern der Landeshydrologie, der EAWAG und der VAW in der Luzerner Bucht (unmittelbar seewärts der Seebrücke) vorgenommene Demonstration der Herstellerfirma RD Instruments vermittelte interessante Eindrücke. Als sehr aufschlussreich erwiesen sich auch einige sorgfältige und kürzlich publizierte Testversuche der deutschen Bundesanstalt für Gewässerkunde [1]. In beiden Fällen wurde das Gerät am Bug eines Bootes befestigt, das Messfahrten quer zur Strömung unternahm.

Résumé: Mesure de débit à l'aide d'un anémomètre Doppler à ultrasons

Actuellement, la mesure du débit dans les cours d'eau est le plus souvent réalisée à l'aide de moulinets. L'utilisation de ce type d'instruments rend nécessaire une procédure de longue durée – par exemple plusieurs heures pour un relevé dans une rivière du Plateau – et présuppose que le débit reste constant pendant cette période. Il n'est ainsi pas possible d'appliquer la méthode si le débit varie rapidement, comme c'est le cas lors d'une crue. Toutefois, un nouveau procédé de mesure offre des possibilités prometteuses dans ce domaine. Il est basé sur l'emploi d'un anémomètre Doppler à ultrasons construit aux USA et désigné par l'abréviation ADCP (Broad Band Acoustic Doppler Current Profiler). Cet appareil permet d'obtenir le débit cherché en quelques minutes. Une démonstration, conduite par la firme productrice RD Instruments dans la rade de Lucerne (immédiatement à l'amont du pont «Seebrükke») et à laquelle ont participé des représentants du Service hydrologique et géologique national, de l'EAWAG et de la VAW, a laissé une impression positive. Quelques résultats concluants de tests effectués avec soin dans le Rhin ont été d'autre part publiés récemment par la «Deutsche Bundesanstalt für Gewässerkunde» [1]. Dans les deux cas, l'appareil a été fixé pour la mesure à la proue d'un bateau se déplaçant perpendiculairement à la direction de l'écoulement.

Das Gerät

ADCP-Geräte gibt es in verschiedenen Ausführungen und Grössen. Hier ist von einem Typ die Rede, der sich für Wassertiefen von 2 bis 20 m und mehr und damit für grössere Flüsse und Ströme eignet. Er lässt sich leicht am Bug eines beliebigen Bootes montieren. Von aussen ist nur ein 50 cm hohes zylindrisches Gehäuse sichtbar, das soweit ins Wasser taucht, dass im Ultraschall-Wandler-Bereich auch bei Fahrt keine Luftblasen stören können. Dieses Gehäuse enthält neben der erforderlichen Elektronik mit modernster Signalverarbeitungs-Technologie eine Uhr, ein Thermometer, ein Pendel sowie einen «Fluxgate»-Kompass. Von primärer Bedeutung sind aber die vier 1200-kHz-Ultraschall-Wandler am unteren Ende, die in kurzer Wechselfolge als Sender und Empfänger arbeiten. Die Signalübertragung und Stromversorgung zwischen dem eingetauchten Messkopf und der im Boot mitgeführten «Deck unit» erfolgt über ein Kabel. Im Boot steht auch der PC, der die erhobenen Daten mittels einer raffinierten Software laufend auswertet und graphisch auf dem Bildschirm darstellt.

Die vier Ultraschall-Wandler sind so angeordnet, dass sie ihre nur 1,5° breiten Schallkeulen in einem Winkel von 30° zur Vertikalen aussenden und das entsprechende Echo empfangen. Die Keulen bilden also gleichsam die Kanten einer viereckigen Pyramide, deren Spitze sich im Gehäuse befindet und deren Grundfläche letztlich das Flussbett bildet (Bild 1).

Die Messung

Die Strömungsgeschwindigkeit wird als Geschwindigkeit der im Flusswasser enthaltenen Partikel (respektive Inhomogenitäten) bestimmt. Von diesen Partikeln wird also vorausgesetzt, dass sie gegenüber ihrem Umgebungswasser keinen Schlupf aufweisen. Das Messprinzip beruht auf dem Dopplereffekt des von den Partikeln reflektierten Ultraschalls. Nach Aussenden eines Ultraschallsignals werden empfängerseitig in softwaremässig vorgegebenen Zeitabständen Empfangsfenster geöffnet. Dadurch werden nur Echos aus ganz bestimmten Messvolumina erfasst. Der Abstand eines Messvolumens vom Transducer-Kopf ist bestimmt durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit und der bis zur Fensteröffnung verflossenen Zeit. Jedes Messvolumen liefert so die in ihm vorherrschende Strömungskomponente in axialer Richtung der Strahlkeule (Bild 1).

An sich würden drei Schallkeulen genügen, um die Geschwindigkeit jeweils dreidimensional zu erfassen. Die

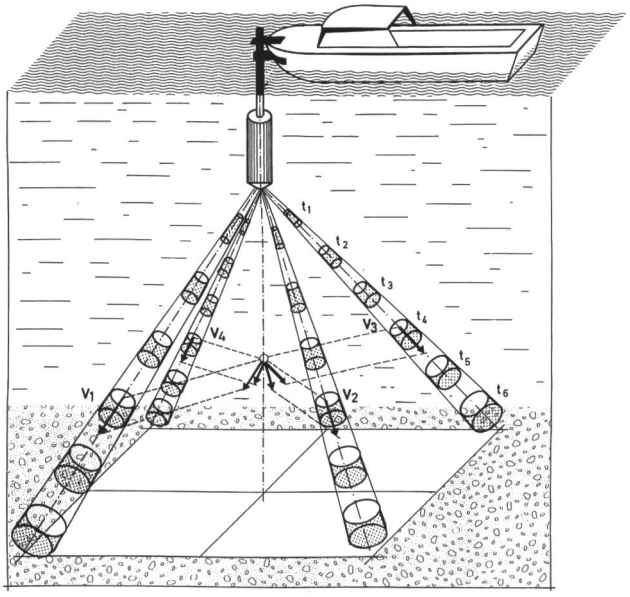

Bild 1. ADCP-Einsatz mit Messboot: Die Sensoren sind in einem 0,5 m hohen Gehäuse (hier überproportional gross dargestellt) enthalten. Das Schema der Ultraschallkeulen deutet die Unterteilung der Wassermassen in Schichten an sowie die Art der Geschwindigkeitsermittlung.

vierte Schallkeule dient aber der Kontrolle beziehungsweise der Fehlerrechnung. Dies ist notwendig, weil ja die einzelnen Komponenten nicht ortsgleich erfasst werden, jedoch bei der Auswertung wie ortsgleiche Komponenten auf der Mittelsenkrechten unter dem Messkopf behandelt werden. Da die Strömung in der durch die vier Keulen aufgespannten Pyramide nicht immer als homogen betrachtet werden darf, müssen entsprechende Fehler erkennbar sein.

Das eingesetzte Boot fährt während der Messung von einem Flussufer zum anderen. Es braucht dabei weder eine bestimmte Richtung noch Geschwindigkeit einzuhalten. Denn die Orientierung der Messwerte wird laufend durch den «Flux-gate»-Kompass besorgt. Ebenso wird eine allfällige Abweichung des Gerätes von der Vertikalen (Krängen, Stampfen, Rollen des Bootes) mit dem Pendel erfasst und die Messwerte werden entsprechend korrigiert. Zudem wird mit den vier Ultraschallwandlern neben der Strömungsgeschwindigkeit noch die Bootsgeschwindigkeit über Grund aufgenommen (und daraus der Weg des Bootes ermittelt). Diese liegt in der Grössenordnung von 1 bis 2 m/s und bestimmt damit die Messgeschwindigkeit.

Das ADCP unterteilt, wie oben dargelegt, den im Bereich seiner Pyramide liegenden Wasserkörper in Schichten von beispielsweise 0,25 m Höhe. Die horizontale Ausdehnung dieser Schichten ergibt sich aus der Bootsgeschwindigkeit und der vorgegebenen Messintervallzeit. Im Testfall von [1] wird dafür ein Wert von 20 m erwähnt. Das bedeutet, dass die Strömungsgeschwindigkeit im entsprechenden Flussquerschnitt in Querschnittselementen von 0,25 m Höhe und 20 m Länge erhoben wird. Die Integration im PC erfolgt dabei vom Startpunkt des Bootes weg laufend, so dass der Abfluss zwischen dem Startpunkt und der momentanen Position des Bootes jederzeit auf dem Bildschirm abzulesen ist. Am Ende der Fahrt ist somit auch der gesamte Abfluss bekannt. Dieser lässt sich also auf der Rückfahrt bereits durch eine weitere Messung kontrollieren.

Eindrücke von der Demonstration in der Luzerner Bucht

Anlässlich der Demonstration eines ADCP am 21. Oktober 1992 in der Luzerner Bucht wurden zuerst etwa 250 m, später etwa 80 m seewärts der Seebrücke mehrere Strömungsquerschnitte gefahren. Die dabei beobachteten maximalen Strömungsgeschwindigkeiten lagen bei etwa 7 bis 8 cm/s. Mittelte man die erhobenen Abflüsse, so stimmte der Mittelwert bis auf wenige Prozent Abweichung mit dem durch den Pegel der Landeshydrologie bestimmten Seeabfluss überein. Die einzelnen Messergebnisse wiesen untereinander allerdings Abweichungen im Bereich von etwa ±15% auf. Eine Darstellung derselben in Funktion der Zeit liess eine gewisse Periodizität vermuten, wobei die Periode etwa jener der Grundschwingung der Oberflächenseiches des Luzerner Beckens entsprach.

Die Demonstration hinterliess bei den Beteiligten den Eindruck, dass das ADCP-Gerät selbst bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten zuverlässige Abflussdaten liefert und dementsprechend auch zur Erfassung von Strömungen in Seebuchten eingesetzt werden kann.

Die Testversuche am Rhein

Im Sommer 1992 führte die deutsche Bundesanstalt für Gewässerkunde Testversuche durch, und zwar am Rhein bei ihren Limnigraphen Brohl und Kaub. In Brohl ist das Rheinbett etwa 350 m breit und 5 m tief. Die Ergebnisse lassen sich nach [1] wie folgt zusammenfassen:

Die Reproduzierbarkeit der Messungen bei verschiedenen Messfahrten war sehr gut. Bei einem Abfluss in Brohl von 1602 m^3/s ergaben sich Abweichungen von bloss ±1%.

Der Vergleich mit Flügelmessungen führte zu einer Differenz von 2,1%; dabei lag das Ergebnis der Flügelmessungen höher.

Auch der direkte, das heisst örtlich vorgenommene Vergleich einzelner Strömungsmessungen mit Flügel und ADCP ergab eine gute Übereinstimmung.

Die Tiefenmessung des ADCP stimmte völlig mit den Lotmessungen des Flügelverfahrens überein.

Die in die ADCP eingehenden Distanzen längs dem Flussbett waren, wie Fahrten über eine Messstrecke von 1000 m belegten, bis auf wenige Promille genau.

Zu erwähnen ist, dass der Flussquerschnitt mit dem ADCP-Verfahren nicht vollständig abgetastet werden kann. Es gibt an der Wasseroberfläche sowie auf dem Grund eine Schicht von 1 bis 1,2 m Stärke, wo keine Strömungsgeschwindigkeit erhoben werden kann. Aber auch die Uferbereiche liegen gleichsam im Messschatten. Diesem Mangel wird durch Extrapolation der Messwerte aus dem Kernbereich (Bild 2) wettgemacht. Er führt aber immerhin dazu, dass das ADCP-Messverfahren erst bei Wassertiefen ab 2 m voll zum Tragen kommt beziehungsweise die Genauigkeit einer Vielpunktmessung mit dem Flügel erreicht.

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde will aber gerade dieser Frage der Flachwassermessung mit weiteren Testversuchen nachgehen und überdies prüfen, ob Geschiebetrieb oder Schlamm die Messung verfälschen. Auf die Ergebnisse kann man nur gespannt sein.

Schlussfolgerungen

Mit dem ADCP steht der Hydrologie heute ein neues Messgerät zur Verfügung, um in Flüssen von 2 m Wassertiefe und mehr den Abfluss zu erheben. Sein Vorteil liegt in der kurzen Messdauer von wenigen Minuten gegenüber den beim Flügelverfahren erforderlichen Stunden. Dadurch eignet es sich auch für die Bestimmung von instationären Strömungen, wie sei bei Hochwasser auftreten. Es erlaubt also das, was bis jetzt nicht möglich war, nämlich die Messung von Hochwasserwellen. Selbstverständlich kann ein zu starker Treibzeuganfall das Messboot gefährden und dessen Einsatz verhindern.

Wie die Versuche in der Luzerner Bucht gezeigt haben, lässt sich das Gerät auch in der Limnologie einsetzen. Denn auch in diesem grossen Profil lieferte es im Vergleich zum Limnigraphen Reuss Luzern der Landeshydrologie sehr gute Werte, obschon die Strömung bloss weni-

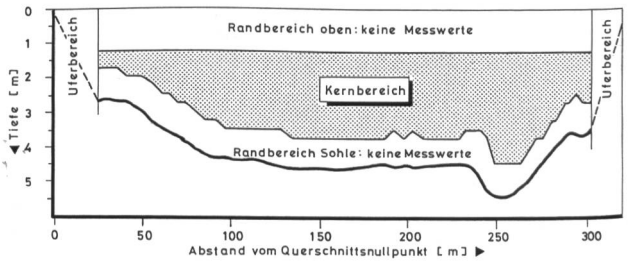

Bild 2. Messstelle Brohl, Rhein. Die Geschwindigkeit konnte nur im angegebenen Kernbereich gemessen werden; auf den übrigen Bereich wurde sie extrapoliert (nach [1]).

ge cm/s erreichte. Je nach Konfiguration kann der ADCP bis in Tiefen von 500 m arbeiten.

Abschliessend sei noch vermerkt, dass das neue Gerät sowohl temporär von einem Messboot – wie hier beschrieben – als auch stationär von festen Plattformen (Bojen, Bodenplatten usw.) aus eingesetzt werden kann.

Literatur:

[1] *Adler, M.:* Messungen von Durchflüssen und Strömungsprofilen mit einem Ultraschall-Doppler-Gerät (ADCP). «Wasserwirtschaft» *83* (1993) 4.

Adresse der Verfasser: *Daniel Vischer* und *Hanspeter Hächler,* Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zentrum, CH-8092 Zürich.

Nachträgliche Staumauerabdichtung

60 Jahre alte Staumauer aus Stampfbeton instandgesetzt

Zur Elektrizitätserzeugung wurde bei Ceresole Reale, nahe dem Aostatal, 1930 eine Staumauer aus Stampfbeton mit einem zur Wasserseite vorgesetzten Stütz- und Dichtungsgewölbe aus Granitmauerwerk errichtet (Bild 1), an der später durch Gebirgsbewegungen und Strukturveränderungen Undichtigkeiten auftraten. Deshalb verbesserte man 1952 den Dichtungsschirm im Sockelbereich und die Abdichtung des Granitgewölbes durch Injektionen und erweiterte das vertikale und horizontale Entwässerungssystem. Die weiter eingedrungenen Wassermengen machten 1982 als Grundinstandsetzung eine Abdichtung der Staumauer erforderlich, zumal die früher durchgeführte Hohlraumverfüllung hinter dem Granitgewölbe unzureichend war. Dazu wurden der Stausee entleert und die Staumauer von der Dammkrone bis zum Sockel überprüft.

Die einzelnen Arbeitsschritte der Instandsetzung sind: Durch das Granitmauerwerk wurden nach einem Rasterplan bis 4,50 m lange, *selbstbohrende Injektionsanker* in die Staumauer eingebracht. Da der unter hohem Druck durch die Zentralbohrung des Bohrankers bis zur Bohrkrone eingebrachte Mörtel im Rückfluss auch den Raum zwischen Bohrloch und Anker ausfüllt, wurde neben der sicheren Ankerbefestigung dort auch die notwendige Dichtung der Risse und Hohlräume im Ankerumfeld erreicht. An den aus dem Granitmauerwerk ragenden Ankern befestigte man eine Lage Bewehrungsmatten und trug darauf eine 9 cm dicke Schicht aus wasserdichtem Spritzbeton auf und danach eine weitere, in gleicher Art bewehrte Schicht (9 cm) Spritzbeton (Bild 2). Danach deckte man diese Fläche mit einer 2,5 mm dicken PVC-Dichtungsplane ab und brachte zu deren Schutz Formelemente aus nichtrostendem Stahl an den Injektionsankern an. – Um alle Arbeiten zeitgleich auf der gesamten Wandfläche durchführen und die vorgegebene Instandsetzungsdauer von höchstens einem Jahr einhalten zu können, setzte man mehrere auf jeweils vier Aufzugsäulen voneinander unabhängig höhenverstellbare Arbeitsbühnen ein. *BG*

Bild 2. Instandsetzung der undichten Staumauer mit einer flächendeckenden, zweischaligen bewehrten Spritzbetonschicht und einer abschliessenden PVC-Dichtungsplane mit Abdeckung aus nichtrostendem Stahl.

Zusammenfassung aus «Beton», Düsseldorf, *42* (1992), Heft 5, Seite 296.

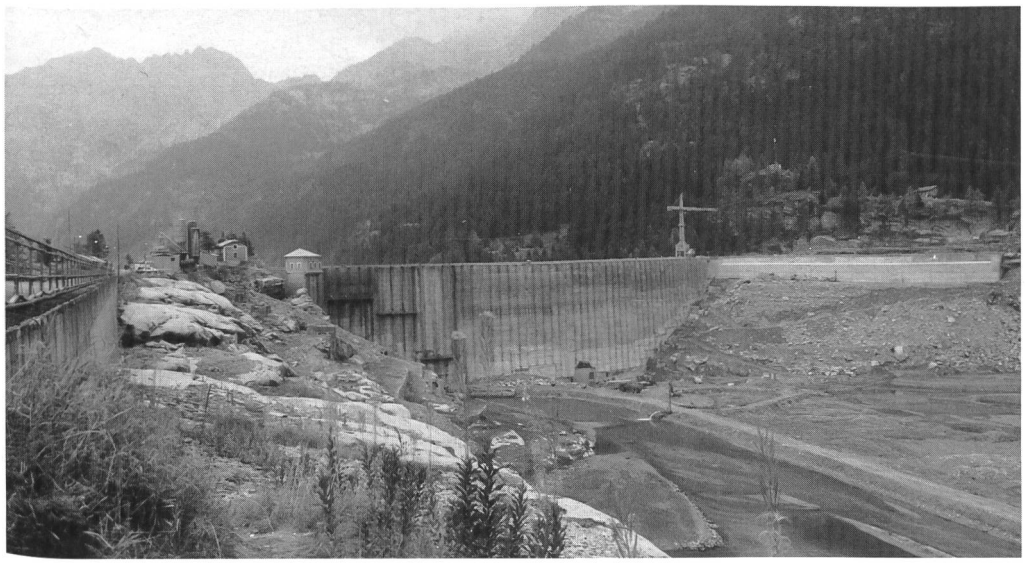

Bild 1. Betonstaumauer mit Dichtungsgewölben aus Granitmauerwerk auf der Wasserseite nach dem Entleeren des Stausees.