Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 82 (1990)
Heft: 5-6

Artikel: Wirbelerscheinungen im Wasserbau
Autor: Raemy, Félix
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939808

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

Wirbelerscheinungen im Wasserbau

Félix Raemy

Zusammenfassung

Verschiedene in hydraulischen Modellen beobachtete Wirbeltypen werden beschrieben und ihre möglichen unerwünschten Auswirkungen auf wasserbauliche Anlagen erläutert. Aus der Fachliteratur und anhand von Versuchsresultaten werden einige konstruktive Massnahmen zur Bekämpfung der Wirbelbildung kurz erwähnt.

Résumé: Formation de vortex dans les constructions hydrauliques

Différents types de vortex observés en modèle hydraulique sont présentés et l'influence négative qu'ils peuvent exercer sur le fonctionnement des ouvrages in situ rappelée. Tirées de la littérature existante et de résultats d'essais, quelques mesures constructives propres à combattre la formation de ces vortex sont brièvement citées.

Summary: The formation of vortices in hydraulic structures

Different types of vortices observed in hydraulic models are described and their possible negative influence on structures presented. Based on the available literature and on experimental results, some measures to reduce or to eliminate the formation of these vortices are briefly mentioned.

1. Einleitung

Das Auftreten von Wirbeln in wasserbaulichen Anlagen führt oft zu einer Verminderung deren Funktionstüchtigkeit sowie zu erhöhten Betriebs- und Unterhaltskosten. Infolge ungünstiger Zuströmungsverhältnisse, Ablösungserscheinungen durch Scherung bei grossen Geschwindigkeitsgradienten oder induzierter Rotation unterhalb eines eingetauchten Hindernisses können verschiedene Wirbeltypen entstehen. In manchen Fällen sind diese in der Lage, Luft anzusaugen und sich mit dem Abfluss durch das Bauwerk fortzupflanzen. Je nach der Art der Drallzufuhr bleiben die so erzeugten Wirbel stabil oder weisen einen intermittierenden Charakter auf. Die am meisten betroffenen Objekte sind Fassungseinläufe mit anschliessender Leitung unter Druck, Einläufe zu hydraulischen Maschinen, Schützenkammern von Grundablässen und Sammelrinnen bei seitlichen Überfällen zur Hochwasserentlastung. Die Auswirkungen der unerwünschten Wirbelbildung auf diese Anlageteile sind:

- Luft-Wasser-Abfluss mit möglichen Pulsationen in geschlossenen Leitungen und Kanälen
- Entstehung grösserer Energieverluste im System
- Reduktion der Abflusskapazität
- schlechte Beanspruchung von Turbinen und Pumpen, mit Erscheinung von schädlichen Vibrationen und Kavitation.

Aus dieser Liste, die sicher nicht vollständig ist, lässt sich die Bedeutung des Problems bereits erkennen. Dementsprechend wurde weltweit seit mehreren Jahren mit der Zielsetzung geforscht, Gegenmassnahmen zu definieren und dem projektierenden Ingenieur die nötigen Beurteilungskriterien zur Verfügung zu stellen. Die analytische Beschreibung der Wirbelentstehung und der am Bauwerk auftretenden Strömungsverhältnisse ist recht anspruchsvoll und oft sogar unmöglich. Deshalb wurden die meisten konstruktiven Lösungen anhand hydraulischer Modellversuche gewonnen.

Im Wasserbau sind die Wirbelerscheinungen an Einläufen wesentlich häufiger und wichtiger als solche an Vereinigungsbauwerken, wie sie beispielsweise in Sammelrinnen auftreten können. Sie sind somit speziell untersucht worden und bilden ein immer noch aktuelles Thema. Eine entsprechende Übersicht über den heutigen Erkenntnisstand liefert die im Jahre 1987 erschienene Monographie [1]. Diverse Einlaufwirbel und Wirbel in speziellen Situationen, die in Modellen an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich beobachtet wurden, werden im folgenden kurz beschrieben.

Durch diese Beispiele wird die Vielfalt der möglichen Erscheinungsformen von Wirbeln im Wasserbau gezeigt. Insbesondere soll dabei auf die Notwendigkeit aufmerksam gemacht werden, die negativen Auswirkungen dieser Wirbel auf die Bauwerke durch angepasste konstruktive Massnahmen zu bekämpfen. Auf die Probleme, die sich aus der Umdeutung von am hydraulischen Modell beobachteten Phänomenen auf die Natur und umgekehrt ergeben, wird hier nicht eingegangen.

2. Wirbelarten

Die Wirbel können nach mehreren Kriterien klassifiziert werden. Hier werden die auftretenden Wirbeltypen in zwei Gruppen aufgeteilt: die Oberflächenwirbel und die Unterwasserwirbel.

Oberflächenwirbel

Diese typischen Wirbel entstehen an Einläufen, meistens infolge asymmetrischer Anströmung. Es handelt sich dabei um Formen wie der wohl bekannte «Badewannenwirbel». Bei genügendem Drall bildet die an der Wasseroberfläche angesaugte Luft einen freien Kern bis in das Fassungsbauwerk selber. Das Bild 1 zeigt ein Beispiel eines Einlaufwirbels. Dieser wurde am Modell im Massstab 1:60 der Anlage Aït Chouarit in Marokko vor dem Einlauf des Umleitstollens aufgenommen (Bild 2).

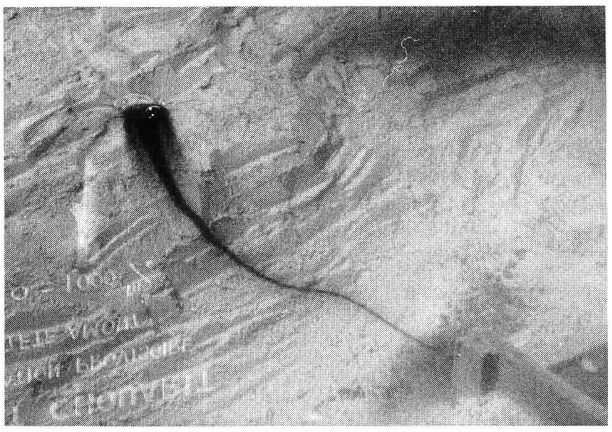

Bild 1. Modell Aït Chouarit. Oberflächenwirbel am Einlauf des Umleitstollens (siehe auch Bild 2). Unten rechts ist die rechte Flügelmauer des Einlaufes sichtbar.

Unterwasserwirbel

Die Entstehung dieser Wirbel ist hauptsächlich auf Scherung und Ablösungserscheinungen bei hohen Geschwindigkeitsgradienten zurückzuführen. Unterwasserwirbel haben meistens eine fast horizontale Achse und können bei recht unterschiedlichen Randbedingungen auftreten. Sie beginnen oder enden an einer festen Wand. Wenn eine ge-

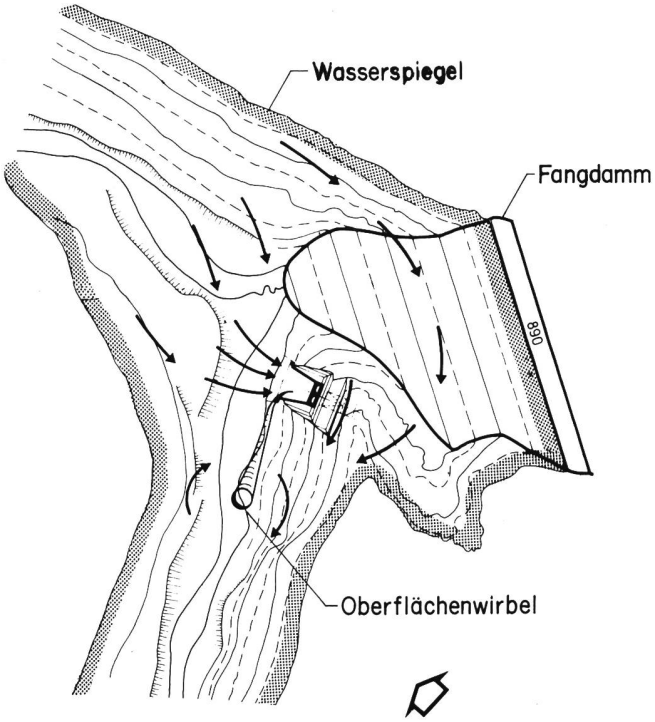

Bild 2. Modell Aït Chouarit. Grundrissskizze der Zuströmungsverhältnisse (Pfeile) vor dem eingestauten Einlauf des Umleitstollens. Die Aufnahmerichtung des Bildes 1 ist durch den grossen Pfeil (unten rechts) angegeben.

nügende Rotation kontinuierlich vorhanden ist, bleiben die Wirbel stabil. Sie werden sowohl in Systemen mit freiem Wasserspiegel wie bei Einläufen von Pumpensaugrohren oder bei Sammelrinnen als auch in Systemen unter Druck wie Schützenkammern von Grundablässen gefunden. Bei höherer Rotation kann der Druck im Wirbel so niedrig werden, dass äussere Luft aus der Atmosphäre vom Unterwasser her angesaugt wird (zum Beispiel an einer Grundablassschütze, siehe Abschnitt 4) oder Wasserdampf sich infolge Kavitation im Wirbelkern ansammelt. Dieses letztgenannte Phänomen wurde in einer Wirbelkammer durch *Escudier* und andere [2] eingehend beobachtet und anhand von Laser-Doppler-Anemometer-Messungen beschrieben.

3. Wirbelcharakteristiken

Auf der klassischen Strömungsmechanik basierend [1], [3], werden einige Wirbelcharakteristiken am Beispiel des Oberflächenwirbels kurz in Erinnerung gerufen. Ein solcher Wirbel wird mit folgender vereinfachender Modellvorstellung betrachtet:

- der Wirbel besitzt einen Kern, in welchem die Flüssigkeit wie ein Festkörper rotiert. Die Rotation erfolgt mit der Winkelgeschwindigkeit ω und die Verteilung der Tangentialgeschwindigkeit v_t ist linear, d.h.

  $$v_t = \omega \cdot r \quad \text{für } r \leq r_1 \tag{1}$$

  mit r = variabler Radius und r_1 = Radius des Wirbelkernes

- ausserhalb des Kernes ($r \geq r_1$) herrscht eine Potentialströmung, wo v_t umgekehrt proportional zu r ist:

  $$v_t = \frac{c}{r} \quad \text{mit } c = \text{Konstante} \tag{2}$$

Man kann zeigen, dass die Druckverteilung im Wirbel folgendermassen verläuft:

- ausserhalb des Kernes ($r \geq r_1$)

  $$p(r) = p_\infty - \frac{\rho}{2} \cdot \frac{c^2}{r^2} = p_\infty - \frac{\rho}{2} \cdot v_t^2 \tag{3}$$

- am Kernrand

  $$p(r_1) = p_\infty - \frac{\rho}{2} \cdot \frac{c^2}{r_1^2} = p_\infty - \frac{\rho}{2} \cdot [v_t(r_1)]^2 \tag{4}$$

  und in der Kernmitte

  $$p(r = 0) = p_\infty - \rho \cdot \frac{c^2}{r_1^2} = p_\infty - \rho \cdot [v_t(r_1)]^2 \tag{5}$$

mit ρ = Dichte des Wassers und
p_∞ = Druck in der ruhenden Flüssigkeit.

Der Druck nimmt somit bis zum Kernzentrum mir r ab, wo Flüssigkeit, Luft oder feste Stoffe angesaugt werden können.
Ein wichtiger Begriff bei den Wirbelströmungen ist die Zirkulation. Diese ist definiert als

$$\Gamma = \oint_s \underline{v} \cdot \underline{ds} \tag{6}$$

mit $\underline{v}$ = Geschwindigkeitsvektor
s = geschlossene Kurve
$\underline{ds}$ = Einheitsvektor tangential zu s

Für einen Wirbel, dessen Stromlinien kreisförmig vom Radius r sind, wird die Zirkulation

$$\Gamma = 2\pi \cdot r \cdot v_t \tag{7}$$

Daraus folgt mit Gleichung (2) für die Verteilung der Tangentialgeschwindigkeit ausserhalb des Kernes

$$v_t = \frac{\Gamma}{2\pi} \cdot \frac{1}{r} = c \cdot \frac{1}{r} \tag{8}$$

Nach dem kinematischen Theorem von *Helmholtz* [4] ist die Zirkulation Γ entlang eines Wirbelrohres konstant. Daraus folgt, dass ein Wirbelrohr in der Flüssigkeit nicht enden kann. Die Wirbel entstehen beziehungsweise enden an einer Wand oder an der freien Oberfläche.
Es sei hierzu bemerkt, dass die durch *Escudier* und andere [2] in ihrer Wirbelkammer gemessenen Verteilungen der Tangentialgeschwindigkeiten ausserhalb des Kernes eng mit denjenigen eines Potentialwirbels verglichen werden dürfen.

4. Beispiele von beobachteten Unterwasserwirbeln

Unterwasserwirbel in einem Sammelbecken

Ein ungewöhnlicher, etwa 3,5 m langer Unterwasserwirbel wurde im Sammelbecken unterhalb des Modelles einer trapezförmigen Rinne beobachtet (Bilder 3 und 4). Bei Versuchen mit Normalabfluss in der Rinne erzeugte der ins Bekken seitlich eintretende Strahl einen kontinuierlichen Drall, der zur Bildung des horizontalen, sehr stabilen Wirbels führte. In ihrem Charakter lässt sich diese Strömungsart mit derjenigen vergleichen, die in Sammelrinnen an Hochwasserentlastungen von Staubecken vorkommt [5], [6]. Dabei werden Störungen im anschliessenden Entlastungsstollen verursacht.
Mit Videoaufnahmen sind einige Merkmale des beobachteten Wirbels qualitativ erfasst worden. Der Theorie entsprechend ist der Wirbel durch die Beckenwand begrenzt (Bild 5). Eine ausgeprägte Luftmenge sammelt sich im Kern an. Vermutlich handelt es sich hier nicht um Wasserdampf, der

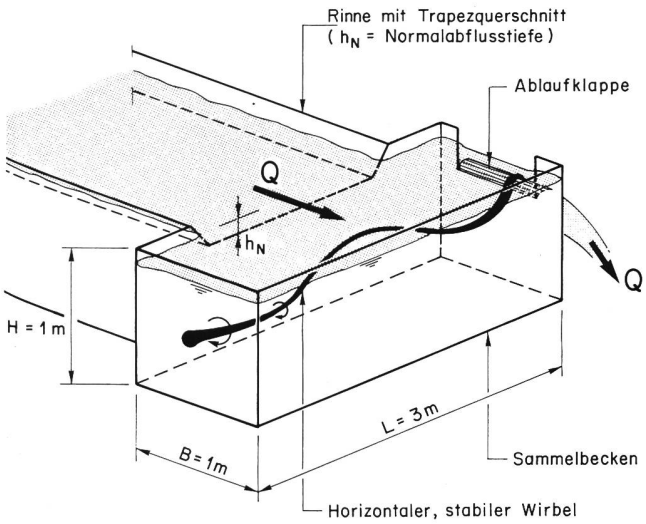

Bild 3. Unterwasserwirbel im Sammelbecken eines Labormodelles. Schematische Darstellung der Anlage.

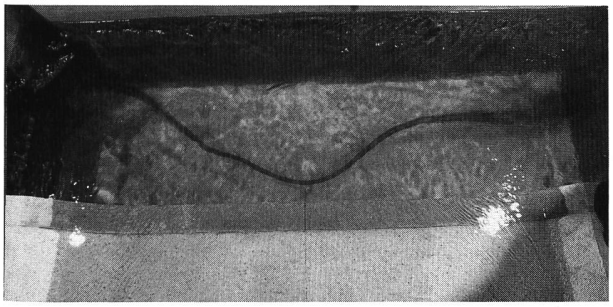

Bild 4. Sammelbecken mit dem etwa 3,5 m langen Unterwasserwirbel (von der Rinnenmündung flussabwärts aufgenommen). Visualisierung des Wirbels mittels Farbe. Im Sammelbecken selber strömt das Wasser von rechts nach links.

durch Kavitation in Erscheinung tritt, sondern um Luft, die am unteren Ende des Sammelbeckens bei der Regulierklappe angesaugt und stromaufwärts bewegt wird. Diese Luft bleibt im Kern entweder in Form von abgeschlossenen Paketen (Bild 6) oder einer wandernden «Perlenkette», die bei zu niedriger Rotation zeitweise auftritt (Bild 7).

Unterwasserwirbel in der Schützenkammer eines Grundablasses

Der Grundablass der Anlage San Roque auf den Philippinen wurde in einem Modell im Massstab 1:38,2 an der VAW untersucht [7]. Bei der Überprüfung der mit drei Durchlässen vorgesehenen Schützenkammer konnte die Entstehung eines starken, instabilen Längswirbels durch diese Kammer bis zur Auslaufkammer beobachtet werden. Dieser Wirbel erscheint sowohl beim asymmetrischen als auch beim symmetrischen Betriebsfall, wenn bloss eine Schütze im Einsatz ist (Bilder 8, 9, 10).

Es wurde festgestellt, dass die in Strömungsrichtung vorhandene Vergrösserung des Durchflussquerschnittes zwischen dem Druckrohr und dem rechteckigen Kammervorhof Wandablösungen verursacht. Diese Ablösungen erzeugen eine Rotation, die sich in der Verengung vor der Schütze fortpflanzt und verstärkt. Der Druck im Wirbelkern sinkt dann so tief, dass Luft vom Unterwasser an der Schützenstelle angesaugt und schlagartig flussaufwärts getrieben wird. Das zeitlich kurze Auftreten des Wirbels bewirkt einen heftigen Druckstoss und eine Reduktion der Durchflusskapazität [7]. Eine eindeutige Verbesserung der Strömung in der Schützenkammer wurde durch die Querschnittsänderung des Vorhofes (Verjüngung in Fliessrichtung) und durch die Wahl eines Betriebs mit gleichzeitigem Einsatz aller drei Schützen erreicht.

5. Konstruktive Massnahmen zur Bekämpfung der Wirbelbildung

Zahlreiche Lösungsvorschläge können erwähnt werden, beispielsweise:

Einlaufwirbel

- Verbesserung der Zuströmungsbedingungen, um einen Drall zu vermeiden (u. a. Lage und Orientierung des Einlaufbauwerkes)
- Erhöhung der Wasserüberdeckung am Einlauf
- hydraulisch optimal geformte Bauwerksteile
- Einsatz von Injektoren, Leitwänden, Rechen usw.

Wirbel in Sammelrinnen

- wenn möglich, einseitigen Zufluss durch symmetrische Strahlführung ersetzen [6]
- Überfallregulierung mittels Schützen
- Konzept der Sammelrinne mit strömendem Abfluss

Wirbel in Grundablässen

- Mögliche Ablösungsquellen systematisch eliminieren, das heisst, keine brüsken Querschnittsänderungen, keine Querschnittsvergrösserungen in Strömungsrichtung oberhalb der Schützenstelle dürfen toleriert werden.
- Um beim Betrieb möglichst symmetrische Zuflussverhältnisse in der Kammer zu erreichen, müssen prinzipiell alle Schützen gleichzeitig betätigt werden.

Bild 5. Videoaufnahme des Unterwasserwirbels. Der Wirbel ist durch die hintere Beckenwand begrenzt.

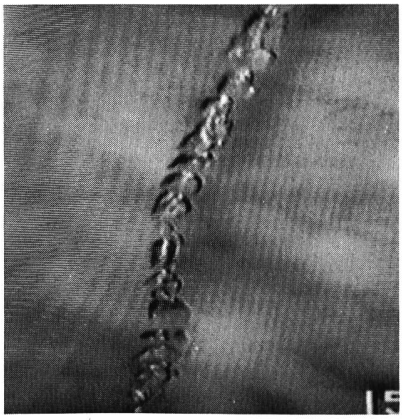

Bild 6. Aufnahme von Luftpaketen im Wirbelkern.

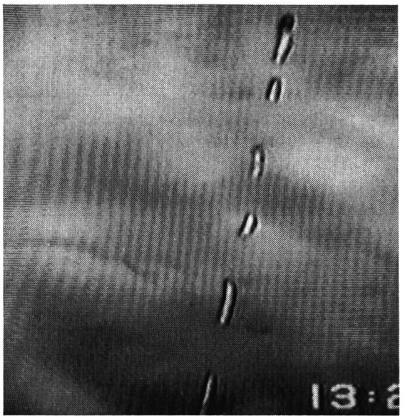

Bild 7. Bildung einer Luft-Perlenkette im Wirbelkern. Diskontinuität infolge zu niedriger Rotation.

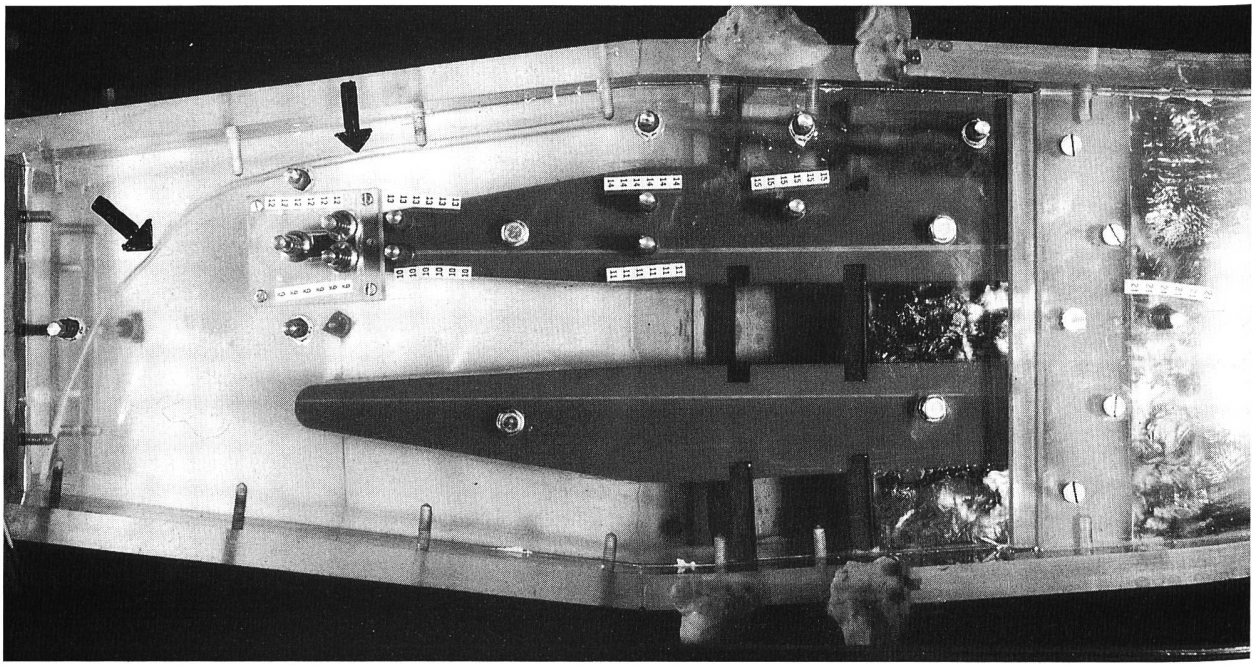

Bild 8. Modell San Roque. Wirbel in der rechten Schützenöffnung des Grundablasses, von unten aufgenommen (Pfeile). Rechts im Bild ist der Abfluss unterhalb der Schützenstelle sichtbar. (Linke und mittlere Schützen geschlossen, Strömung von links nach rechts.)

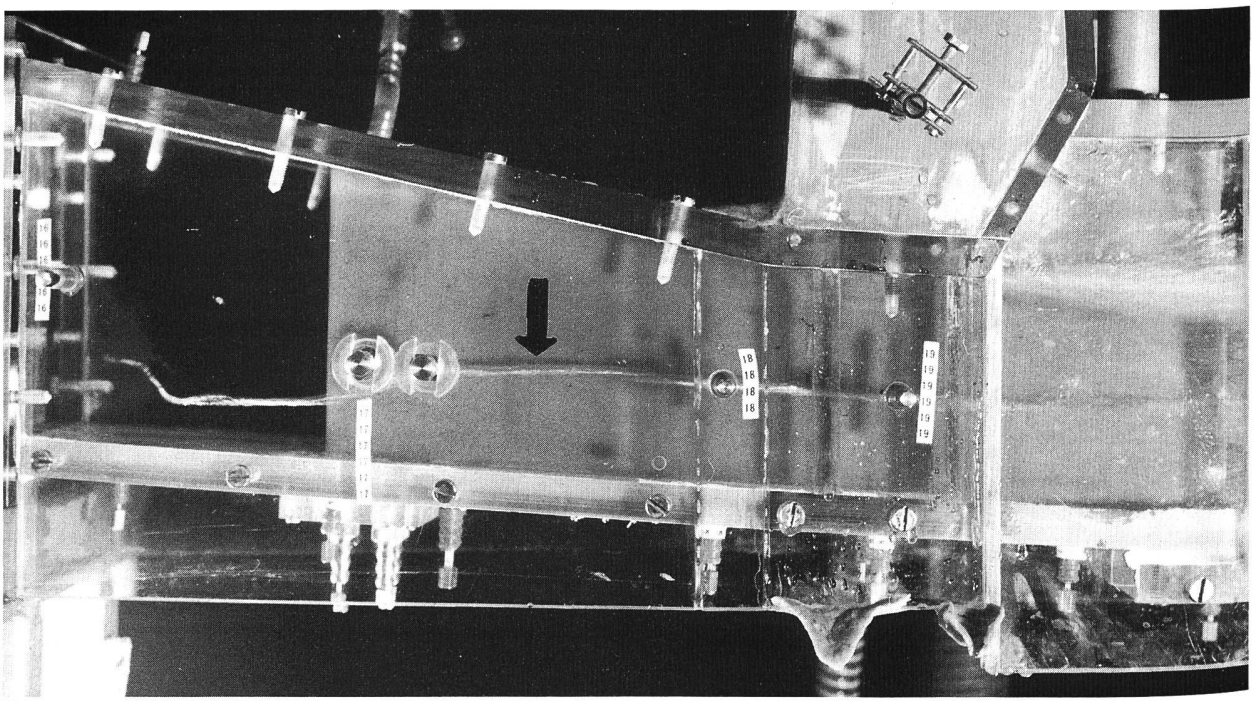

Bild 9. Modell San Roque. Seitenansicht des in der rechten Schützenöffnung des Grundablasses entstehenden Wirbels (siehe auch Bild 8). Das Wasser strömt von links nach rechts.

6. Schlussfolgerungen

Im Wasserbau sind Wirbelerscheinungen wegen ihrer meist ungünstigen Auswirkungen auf die Bauwerke unerwünscht und werden dementsprechend bekämpft. Auch bei nicht aussergewöhnlichen hydraulischen Verhältnissen können sie beobachtet werden.

Obwohl heute besonders zur Vermeidung von Einlaufwirbeln Massnahmen bekannt sind, bleibt die Durchführung eingehender Modellversuche empfehlenswert und gegebenenfalls notwendig. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Phänomen der Wirbelbildung komplex und von örtlichen Randbedingungen abhängig ist.

Literatur

[1] International Association for Hydraulic Research (IAHR): «Swirling Flow Problems at Intakes», Hydraulic Structures Design Manual 1, *J. Knauss,* Coordinator-editor, A. A. Balkema, Rotterdam, 1987.

[2] *Escudier, M. P., Bornstein, J.* and *Zehnder, N.:* Observations and LDA measurements of confined turbulent vortex flow, «Journal of Fluid Mechanics», Vol. 98, part 1, 1980, pp. 49–63.

[3] *Tietjens, O.:* «Strömungslehre», Erster Band, Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1960.

[4] *Helmholtz, H.:* Über Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen, «J. reine und angew. Math.», Band 40, 1858.

[5] *Hartung, F.:* Gestaltung von Hochwasserentlastungsanlagen bei Talsperrendämmen, «Wasserwirtschaft» *62,* Nr. 1/2, 1972.

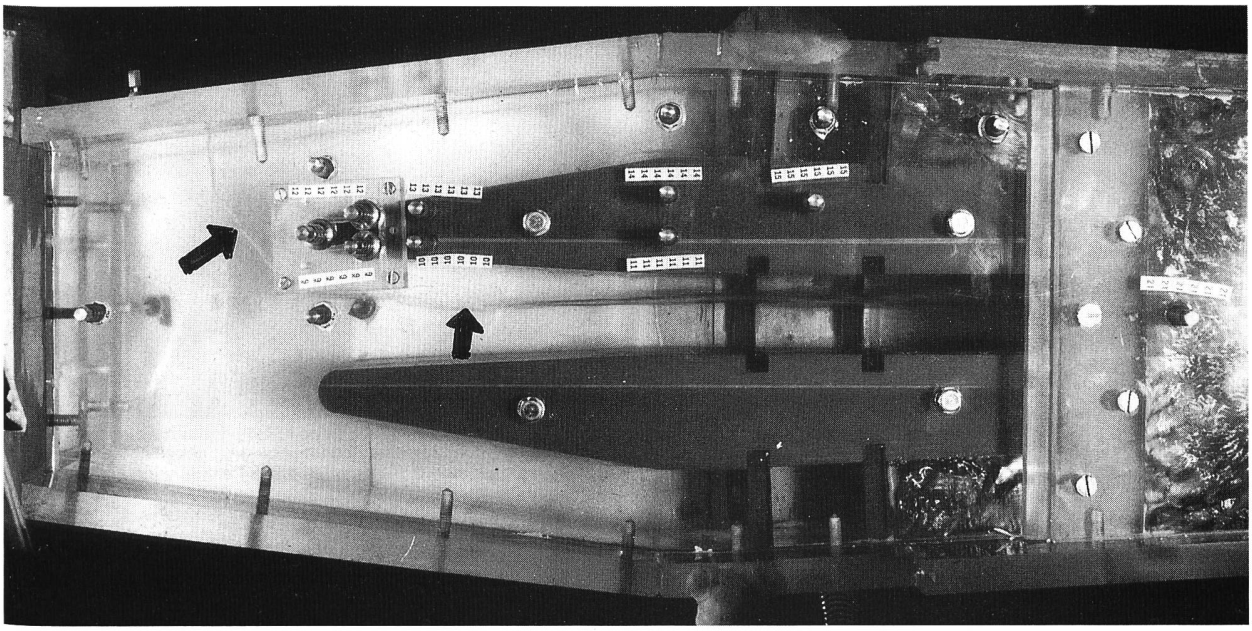

Bild 10. Modell San Roque. Wirbelbildung in der mittleren Schützenöffnung des Grundablasses (Pfeile), von unten aufgenommen (die beiden anderen Schützen sind geschlossen). Strömung von links nach rechts.

[6] *Bretschneider, H.:* Kopfbauwerke bei Schussrinnen, «Die Wasserwirtschaft» *61*, Nr. 5, 1971.

[7] *Anastasi, G.:* Besondere Aspekte der Gestaltung von Grundablässen in Stollen, «Wasserwirtschaft» *73*, Nr. 12, 1983.

Adresse des Verfassers: Dr.-Ing. *Félix Raemy,* Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich.

Murgänge und Hochwasser im Puschlav

Historische und aktuelle Analysen im Val Varuna

Gianni Paravicini, unter Mitarbeit von Dieter Rickenmann und Markus Zimmermann

Einleitung

Das Puschlav, bis vor wenigen Jahren als unberührte Landschaft im südlichen Graubünden nur wenigen Naturliebhabern vertraut, hat mit den Wasserverheerungen im Juli und August 1987 vorübergehend sehr medienwirksam an Bekanntheitsgrad dazugewonnen. Die grosse Solidarität aus der ganzen Schweiz in Form von direkter und indirekter Hilfeleistung hat die Bevölkerung mit grossem Dank entgegengenommen.

Die Ereignisse mit den katastrophalen Zerstörungen im historischen Flecken Poschiavo und mit enormen Schäden längs Bächen und Flüssen im ganzen Einzugsgebiet riefen nach einer umfassenderen Ursachenanalyse des vorgefallenen Naturgeschehens. Seit Menschengedenken sind

Bild 1. Das Val Varuna nach den Murgängen vom Juli 1987. Unterhalb der Felsen des Piz Varuna erkennt man einen aufgerissenen Schneefleck. Dies war der Ausgangspunkt verschiedener Murgänge. Von 2700 m ü. M. bis zum Kegelhals 1180 m ü. M. wurde das Varunatal erodiert, in besonderen Talabschnitten über 10 m tief. Der grösste Teil des ausgeräumten Schuttes wurde auf dem Kegel deponiert. (Foto *A. Godenzi,* Chur)