

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 82 (1990)
Heft: 11-12

Artikel: Tornadowirbel im Wasserbau
Autor: Hager, Willi H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939848>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 16.05.2025

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

Tornadowirbel im Wasserbau

Willi H. Hager

Zusammenfassung

Tornadowirbel lassen sich im Gegensatz zu Badewannenwirbeln als kohärente Rotationsstrukturen beschreiben, deren Achse häufig nahezu horizontal verläuft und dabei ein Ende an einer festen Wandung anlegt. Anhand von drei ausgewählten Beispielen, die umfassend mit Bildmaterial dokumentiert sind, wird das Wesen solcher im Wasserbau nicht oft angetroffenen Phänomene belegt. Dieser Beschreibung vorangestellt ist die Darstellung der bereits bekannten Forschungsergebnisse, welche zwar in ganz anderen Gebieten der Fluidmechanik angesiedelt ist. Schliesslich werden zum Abschluss die Auswirkungen von tornadoähnlichen Wirbeln auf Bemessungsfragen des Wasserbaus aufgezeigt.

Summary: Tornado type vortices

Tornado type vortices may be described as coherent rotational structures with an almost horizontal axis of which one end attaches to the solid boundary geometry. Based on three selected examples of which detailed illustration is provided, the essence of such not often met phenomena in hydraulic structures is documented. This description is headed by a short state-of-the-art relative to tornado type vortices of which the origin of analysis is in a different domain of fluid mechanics, however. The paper is concluded by a description of features by which the design of vortex-endangered structures may be influenced.

Einleitung

Nach Lugt (1983) lassen sich Tornados als säulenartige Wirbelwinde definieren, die ein Ende am Erdboden besitzen. Ihr Durchmesser kann bis zu 500 m betragen, und Rotationsgeschwindigkeiten bis zu 200 m/s wurden schon beobachtet. Die daraus sich ergebenden dynamischen Drücke können deshalb enorm werden, was wiederum das Zerstörungspotential von Tornados aufzeigt.

Tornados treten am häufigsten in den USA und in Australien, meistens nachmittags an Kaltfronten oder an Böbegrenzungen im Frühling auf. Sie lassen sich an der trichterartigen Wolkengeometrie einfach erkennen, deren Höhe zwischen 800 und 1500 m liegt. Die Fließstruktur eines Tornados ist spiralförmig, da der primären Rotationsbewegung eine Längsbewegung überlagert wird, die im Wirbelkern gegen den Grund, ausserhalb davon jedoch gegen den Himmel gerichtet ist (Bild 1a). Man beachte den nahezu radialen Zufluss zum Wirbelkern auf Bodenhöhe, der durch Druckdifferenzen und Druckschwankungen beträchtlichen

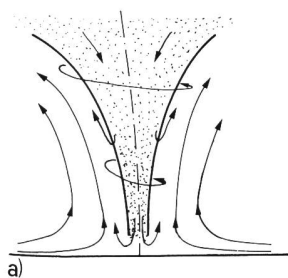
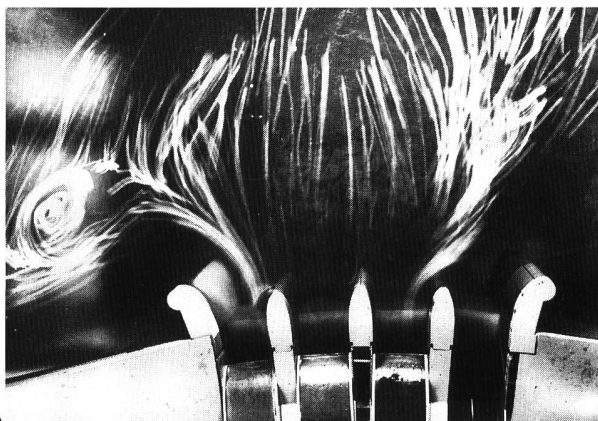
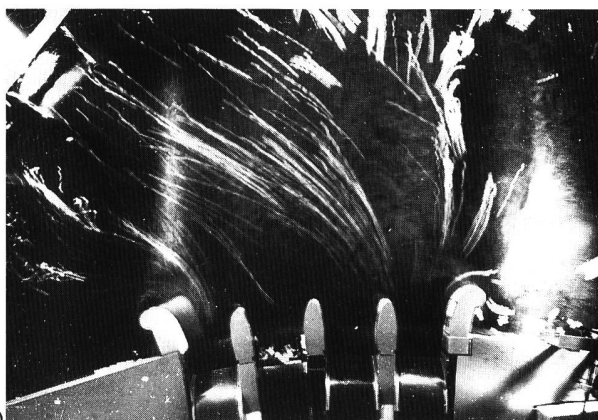


Bild 1. Tornado, a) schematisch und b) über dem Meer mit spiralförmigen Wellen (Lugt, 1983).



a)



b)

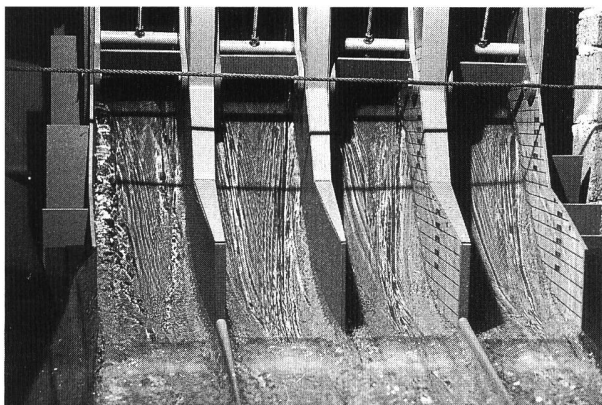
Bild 2. Asymmetrische Zuströmung zur Hochwasserentlastung (unten). a) ohne Deflektoren und b) mit Deflektoren. Sichtbarmachung der Stromlinien durch Schwimmkörper bei Langzeitbelichtung.

Schaden anrichten kann. Anhand von Schäden liessen sich Geschwindigkeiten von bis zu 150 m/s zurückrechnen. Weitere spektakuläre Eigenschaften von Tornados beschreibt Lugt (1983) eindrücklich.

Die notwendige Bedingung zur Ausbildung des Tornados ist eine instabile Scherströmung, kombiniert mit einer genügend starken Sekundärrotation. Diese Bedingungen lassen sich im Wasserbau zusammenfassen unter dem Namen «ungünstige Anströmung». In der Folge wird versucht, diesen Ausdruck auf tornadoähnliche Wirbel anzuwenden, die im hydraulischen Modellbau auftreten. Das Ziel dieses Aufsatzes ist damit einerseits die Beschreibung von Vorgängen, die sicher von einigen Lesern ähnlich beobachtet, aber leider nicht veröffentlicht wurden, und andererseits das Darstellen von Phänomenen, die bei der Bemessung normalerweise nicht auftreten dürfen.

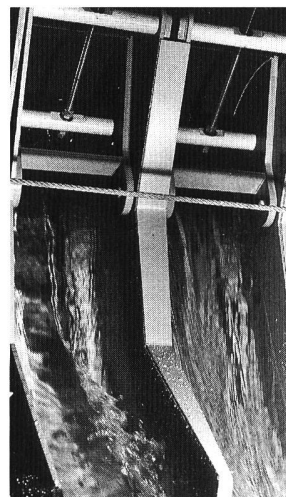
Hochwasserentlastung

Bild 2 zeigt den Grundriss einer Hochwasserentlastung, die vier schütztenkontrollierte Auslässe besitzt und dann in eine Schussrinne mündet. Infolge knapper Platzverhältnisse konnte nicht der gesamte Speichersee im Modell nachgebildet werden, womit die Anströmungsverhältnisse – besonders bei asymmetrischer Schützstellung – eine beträchtliche Rotationskomponente hervorriefen. Dadurch bildete sich die in Bild 2a) sichtbare Drehströmung im Oberwasser der linken Schütze aus. Diesem Grundriss zugehörig ist die Unterwasseransicht der Hochwasserentlastung nach Bild 3a), aus dem klar der im linken Auslass stark gestörte Ausfluss hervorgeht. Wie später noch zu erläutern ist,

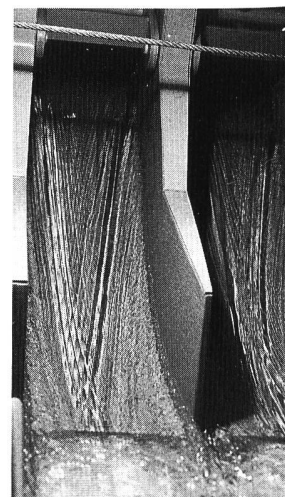


a)

Bild 3. Unterwasseransicht der Hochwasserentlastung. a) Gesamtansicht, korrespondierend mit Bild 2a), b) Wirbelbildung im linken Durchlass, c) gleiche Teilansicht wie Bild 3b), korrespondierend mit Bild 2b).



b)



c)

kann die Drehbewegung so stark werden, dass sich ein Längswirbel bildet. Dessen Ursprung ist die durch die Schütze eingeschnürte Strömung mit ausgeprägtem Unterdruck, verbunden mit der der Längsströmung überlagerten Zirkulation. Damit wird längs des Wirbelkerns Luft von der Atmosphäre angesogen und gegen die Fliessrichtung bis in den Speicher bewegt. Bild 3b) zeigt den luftgefüllten Wirbelkern im linken Durchlass und den wie Muskelstränge aussehenden, aus hauptsächlich zwei Rotationskernen gegenseitig drehenden Abfluss. Im Gegensatz dazu bleibt der Abfluss im dazu anschliessenden Durchlass nahezu ungestört.

Schliesslich zeigen die Bilder 4a) und 4b) das Oberwasser und den sich dorthin mit hoher Geschwindigkeit fortpflanzenden Wirbelschlauch. Wie eine genauere Analyse zeigt, erstreckt sich der Hohlwirbel längs der in Bild 2a) ausgeprägten Linie und führt auf den Boden des Speichers – gemäss einem der Wirbelsätze von *Helmholtz*, nach der ein Wirbel nur an Grenzflächen beginnen und enden kann. Die hauptsächlich durch Asymmetrie der Zuflussströmung hervorgerufene Hohlwirbelbildung, welche in einem Vollmodell nicht existieren würde, konnte nach Einbau von Deflektoren beseitigt werden. Bild 2b) zeigt die Strömungsrichter oben links und die damit stark verbesserte Zuströmung. Da es sich bei diesem Objekt um eine bereits bestehende Anlage handelte, konnte die Stromlinienrichtung vorerst in der Natur ausgemessen und darauf die Deflektoren im Modell angepasst werden. Die grundlegende Modifikation zeigte sich auch im Unterwasserkanal. Bild 3c) stellt den oberen Teil der Schussrinne dar, der nun mit Ausnahme von durch die Schützensnuten hervorgerufenen Stosswellen nahezu ungestört ist.

Borda-Kanaleinschnürung

Unter einem Borda-Einlauf versteht man die unter Druck stehende, scharfkantige Einlaufgeometrie, bei der die

Rohrwände in den Ausflussraum hineinragen. Übertragen auf einen Freispiegelkanal, ergibt sich die in Bild 5 skizzierte Anordnung. Das Wasser fliesst dann bei einem genügend langen Zulaufkanal der Verengung fast uniform zu und wird längs der Seitenwände in die durch den Borda-Einlauf erzeugten Totwasserräume getrieben. Die in Bild 5b) eingezeichnete Symmetrieachse entspricht in den Versuchen einer Glaswand, es wurde also nur eine Hälfte untersucht. Der im Grundriss rechteckige Totraum zwingt der Strömung eine komplexe räumliche Strömung auf. Vereinfacht tritt das Wasser nahe der Oberfläche in den Raum ein und verlässt diesen dann bodennah durch eine S-förmige Bahn. Dabei wird der Strömung eine je nach Geometrie beträchtliche Rotationskomponente aufgezwungen, die zu zweierlei Wirbelbildung führen kann. Einerseits entstehen in den Ecken des Totwasserraumes übliche, mit vertikaler Achse ausgebildete Wirbel ähnlich wie vor Schützen (Bild 4c). Bei grosser Rotationsintensität bildet sich sogar ein Luftkern, der sich über den ganzen Totraum hinwegzieht und bei der Strömungseinschnürung mündet. Dieser Typ Wirbel beginnt und endet wie der Badewannenwirbel an der Atmosphäre.

Andererseits kann man bei bestimmten Durchflüssen eine viel intensivere Wirbelbildung mit nahezu horizontaler Achse beobachten, welche ihren Ursprung im Kontraktionsbereich der Strömung besitzt und sich längs der Scherzone zwischen Haupt- und Nebenströmung im Totwasserraum ausbildet. Es entsteht dann wiederum ein tornadoähnlicher Hohlwirbel mit grossem Durchmesser, der an der linken Wand des Zulaufkanals endet. Bild 6a) zeigt eine Seitenansicht des Modells, wobei hier die Wirbelbildung infolge zu kleinen Durchflusses nicht auftrat, während Bild 6b) den Hohlwirbel von der Seite her wiedergibt.

Wie einige Versuche zeigten, trat der Tornadowirbel nur bei einem ganz bestimmten Durchfluss auf. Das Versuchsmaterial erlaubt jedoch nicht, diesen kritischen Durchfluss in Abhängigkeit der Kanalgeometrie anzugeben. Dazu müsste

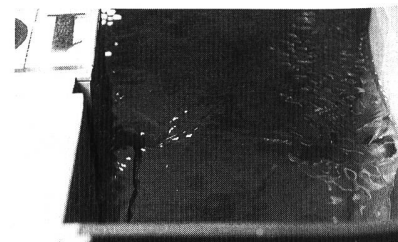
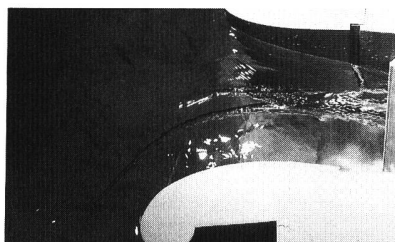


Bild 4. Oberwasseransicht des linken Durchlasses. a), links, Detail des Tornadowirbels, b), Mitte, maximale Wirbelausdehnung und c), rechts, übliche Einlaufwirbel mit vertikaler Achse vor Sektorschütze.

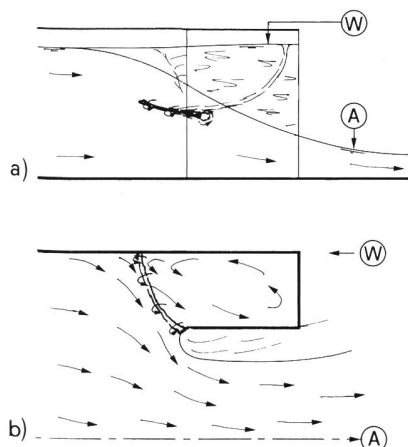


Bild 5. Definitionsskizze zum Borda-Einlauf.
a) Längsschnitt,
b) Grundriss.

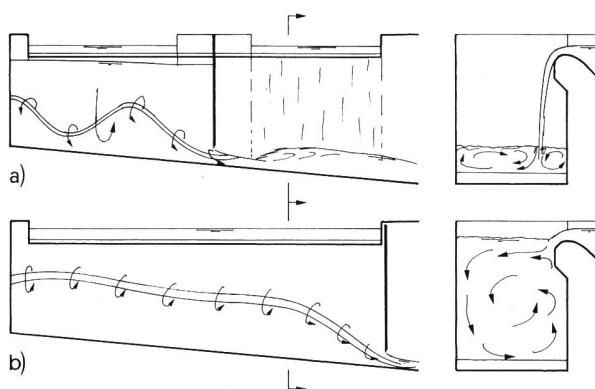


Bild 7. Schematische Skizze der Fliesszustände im Sammelkanal. a) Herbeiführen des schiessenden Abflusses stromab der Planschütze, b) durchwegs eingestaute Abfluss im Längsschnitt (links) und Querschnitt (rechts).

ein Versuchsprogramm mit systematischer Variation der wesentlichen Parameter gefahren werden.

Sammelkanal

Einem Sammelkanal wird das Wasser seitlich zugeführt, wie beispielsweise bei einer Hangentlastung oder bei einer Dachrinne. Demnach nimmt der Durchfluss in Fliessrichtung lokal zu. Häufig ist der Kanal im Oberwasser geschlossen; der Durchfluss steigt dann von Null an bis auf den Endwert. Über Sammelkanäle existiert eine umfangreiche Literatur, wobei sich diese im Normalfall aber lediglich auf eine eindimensionale Berechnung des Wasserspiegels bezieht (Bremen und Hager 1989). Je nach seitlicher Einleitungsgeometrie, auftretenden Froudezahlen sowie Gefälls- und Rauigkeitsverhältnissen vermag man damit eine recht zu-

verlässige Dimensionierung vorzunehmen. Der durch die seitliche Einleitung der Strömung zugeführten Rotation kann man jedoch damit nicht Rechnung tragen.

Die vorher erwähnte Untersuchung basierte auf an der ETH Lausanne durchgeführten Modellversuchen an einer 7,5 m langen Rinne der Breite $b = 0,331$ m. Es wurde versucht, sowohl strömende wie auch schiessende Abflüsse darin zu studieren. Leider hatte der Kanal keine durchsichtigen Wände, so dass die Fliessverhältnisse optisch nur von oben ersichtlich waren. Um schiessende Abflüsse zu erzeugen, wurde nach Bild 7a) eine Planschütze 2,8 m vom Oberwasserende des Kanals eingebracht und der dadurch entstehende Stauraum zur Beschleunigung des Abflusses im Unterwasser genutzt. Zu unserem grossen Erstaunen war die sich im Stauraum ergebende Strömung jedoch interessanter als das Zusammenprallen des Überfallstrahls mit dem schiessenden Abfluss. Deshalb soll ausschliesslich die eingestaute Strömung oberhalb der Planschütze hier verfolgt werden (Bild 7b).

Um die Vorgänge im Sammelkanal besser zu dokumentieren, wurden sowohl die Oberwasserseite wie auch die Schütze in Plexiglas ausgebildet. Die Strömung soll nun vorerst durch das «Fenster» im Oberwasser beschrieben werden. Dabei wird als Bezug der zwar nicht weiter wichtige Durchfluss Q genommen. Bild 8a) gibt die Fliessstruktur für $Q = 81$ l/s wieder; gut sichtbar bei solch kleinem Einstau sind die vom Überfallstrahl induzierten, gegenseitig drehenden Wirbel.

Bei $Q = 91$ l/s (Bild 8b) ist der Einstau gewachsen, gleichzeitig die Intensität der Rotation infolge kleinerer Absturztiefe jedoch reduziert. Bei noch höherer Belastung von $Q = 100$ l/s bricht die Konfiguration mit zwei Längswirbeln fast zusammen, die Einstauhöhe ist nun nahezu auf der Höhe der Überfallkante (Bild 8c). Dann, bei $Q = 107$ l/s, ergibt sich infolge des nun genügend hohen Wasserspiegels anstelle eines Tauchstrahls ein Oberflächenstrahl und entsprechend nur noch ein im Uhrzeigersinn drehender Wirbel, wie aus Bild 8d) hervorgeht. Dieser konzentriert sich deutlich bei Durchflusssteigerung auf $Q = 112$ l/s (Bild 8e), wobei nun die durch den Überfallstrahl in den Abfluss eingetragene Luft zum grossen Teil gegen das Wirbelzentrum transportiert wird. Der Wirbelkern dreht jetzt sehr schnell, da die einmal in dessen Nähe gelangten Luftblasen nicht mehr durch Auftrieb an die Oberfläche gelangen. Durch genaueres Hinschauen längs des Wirbels kann man eine geordnete Kette von Luftblasen entdecken, wir wollen sie in der Folge als «Perlenkette» bezeichnen.

Durch eine abermalige, leichte Steigerung des Durchflusses auf $Q = 113$ l/s (Bild 8f) wird die Rotation des Wirbel-

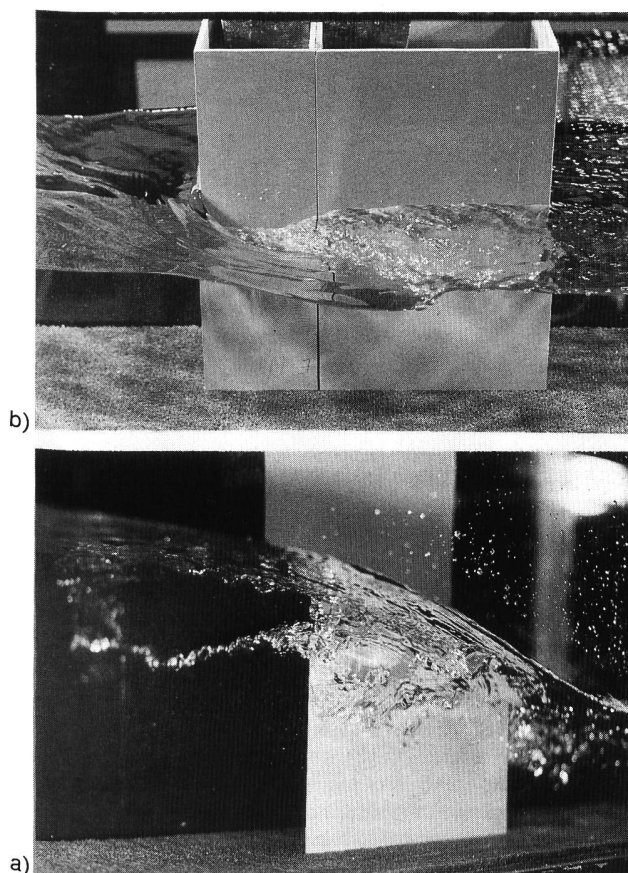
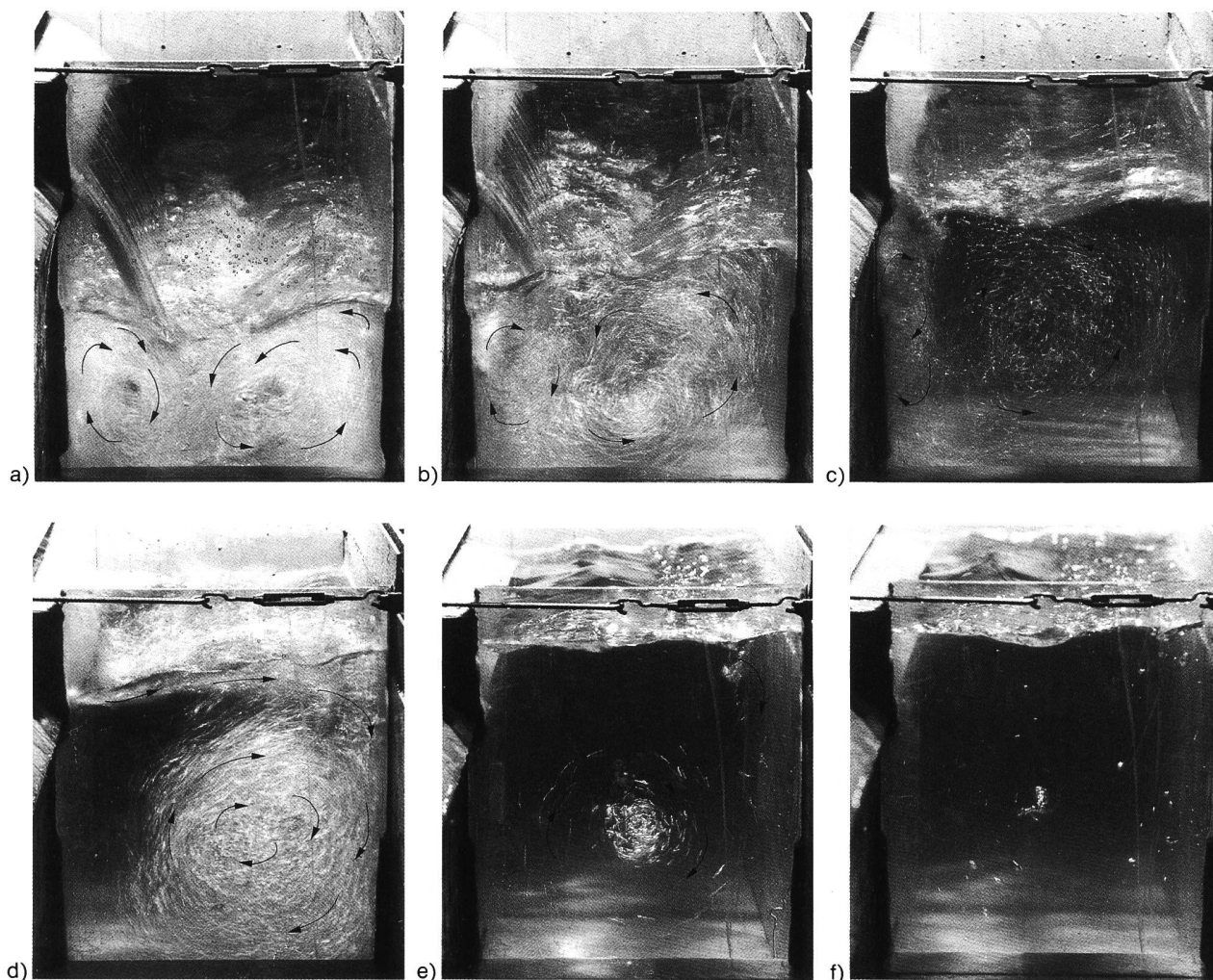


Bild 6. Seitliche Ansichten des Borda-Einlaufs. a) ohne und b) mit Hohlwirbelbildung.



Bilder 8a) bis f). Bildung des Hohlwirbels. Details siehe Text.

kerns nochmals bedeutend erhöht; dann stellt sich ein Tiefdruckgebiet von solcher Stärke ein, dass sich die Luftblasen zu einem Luftschlauch vereinigen. Das ganze Phänomen der Bildung des Luftschlauches hängt aber eng zusammen mit der Abflusseinschnürung durch die Schütze (Bild 7b). Da die Blasen selbst zur Bildung des Luftschlauches nicht ausreichen, wird vom schießenden Unterwasser der Wirbelkern mit Luft gefüllt, bis dort nahezu atmosphärischer Druck herrscht. Dank der grossen Rotation schwimmt dabei der gesamte Hohlwirbel nicht auf, sondern bleibt bei einem gewissen Durchfluss stabil wie ein Kreisel längs der Wirbellinie im Zentrum des Querschnitts stehen.

Der Übergang von der «Perlenkette» zum Wirbelschlauch ist abrupt und mit bedeutenden Vibrationen verbunden. Bild 8g) zeigt die Anfangsphase des Wirbelschlauches, und in Bild 8h) ist eine ausgebildete Wirbelstruktur erkennbar. Der Durchmesser beträgt nun rund 7 % der Kanalbreite, also im eingeschnürten Querschnitt schon ein beträchtliches Mass, und dementsprechend ergibt sich eine merkbare Spiegelhöhung im Oberwasser der Schütze.

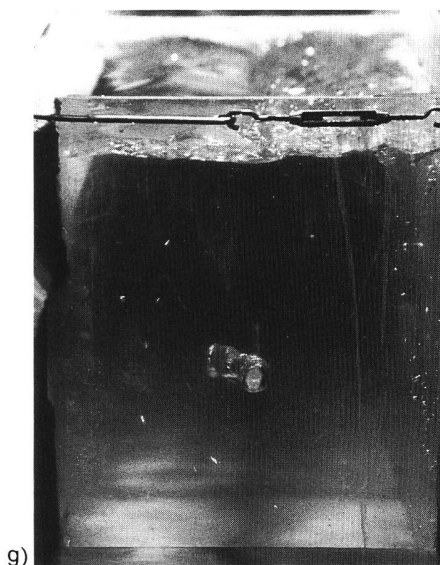
Bild 8i) bis k) zeigt einige Anordnungen der «Perlenkette», also den Übergangsbereich, bevor sich der Tornadowirbel einstellt. Die Luftbläschen stehen im Zentrum des Tiefdruckgebietes und bewegen sich wellenförmig längs der Wirbellinie. In Bild 9 sind einige typische Ansichten vom Unterwasser her dargestellt. Die simultane Erscheinung von Hohlwirbel und Badewannenwirbel erkennt man deutlich aus Bild 9a) und b). Das zweite Bild zeigt zudem eindrück-

lich die bereits oben festgestellte Bildung von rotationsbehaftetem Schützensausfluss, verbunden mit dem Luftsaugbereich (vergl. Bild 3a links). Aus Bild 9c) wird das Ausmass des Hohlwirbels im Unterwasserbereich deutlich, und Bild 9d) gibt die Oberfläche des Wirbels klar wieder. Diese ist üblicherweise glatt und nahezu wie eine Haut, besitzt aber auch Wellen, die sich längs des Schlauches bewegen. Schliesslich gibt es sogar krampfaderartige Verwindungen, die von Keller und Escudier (1980) einer genaueren Analyse unterzogen wurden.

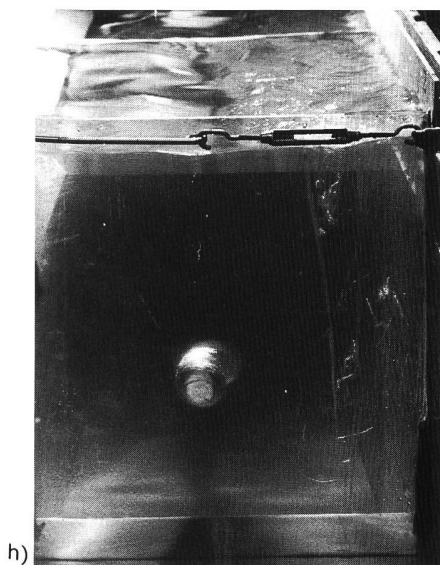
Schliesslich zeigt Bild 10 verschiedene Erscheinungsformen des Wirbels, glatt und fast prismatisch wie in Bild 10a), verdreht und unruhig wie eine Nabelschnur in Bild 10b) oder wellenförmig und sehr ausgeprägt wie ein Dickdarm in Bild 10c). Eine kleine Änderung eines Basisparameters, beispielsweise des Durchflusses oder der Einstauhöhe, bedingt meistens das Zusammenfallen des Hohlwirbels. Bild 10d) zeigt links noch die Rotationsstruktur, rechts aber die Luftblasen, die den Kernbereich des Wirbels verlassen haben und nun zur freien Oberfläche aufsteigen.

Ausblick

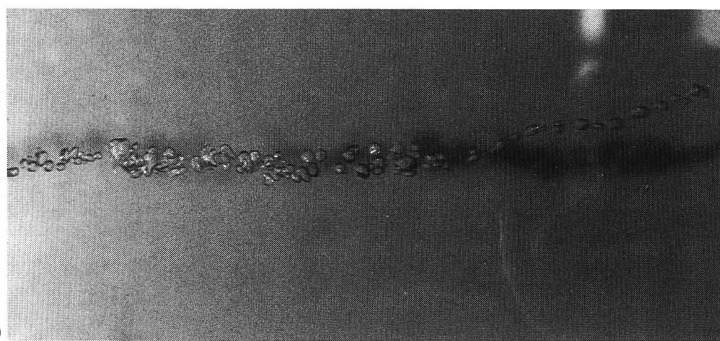
Nach Kenntnissen des Autors wurden die als Hohlwirbel bezeichneten Rotationsstrukturen bis heute für Freispielaflüsse noch nicht beschrieben. Dies ist erstaunlich, handelt es sich doch um sehr ausgeprägte, nicht übersehbare Begleiterscheinungen von Strömungen, die sich ge-



g)



h)



i)



j)



k)

Bilder 8g) bis k). Bildung des Hohlwirbels. Details siehe Text.

gebenenfalls sogar sehr nachteilig auf die Primärströmung auswirken. Als Gründe können dieselben angegeben werden wie bei als üblich bezeichneten Wirbeln. Es handelt sich einerseits um die Abminderung der Durchflusskapazität infolge der Bildung von Luft/Wasser-Gemisch oder gar des Entstehens durchgehender Luftschläuche und andererseits um Begleiterscheinungen der hochturbulenten Strömungen. Diese umfassen Druckschwankung und Schwingungsanfachung von Strömungselementen bis hin zur Vibration. Im Modell hat sich dagegen keine Kavitation eingestellt. Diese und die gefährlichere Begleiterscheinung der Kavitationserosion treten aber auf und können dann zu zusätzlichen Problemen führen.

Normalerweise müssen im Wasserbau Wirbelerscheinungen möglichst durch konstruktive Massnahmen reduziert oder gar unterdrückt werden. Ratschläge dazu erteilt beispielsweise *Knauss* (1987). Im vorliegenden Bericht wurde diesem Gesichtspunkt jedoch keine Aufmerksamkeit gewidmet. In jedem Falle gilt es, die Anströmung sowohl baulich wie auch hydraulisch möglichst symmetrisch auszubilden. Der Erfolg dieser Massnahme geht klar aus dem ersten Fallbeispiel hervor. Im zweiten und dritten Beispiel ist die Anströmung asymmetrisch, weshalb versucht werden muss, Toträume wie bei der Borda-Verengung auch aus

anderen Gründen wie Sedimentation oder Brackwasserbildung möglichst zu vermeiden. Bereits mit Leitwänden können beachtliche Erfolge erzielt werden.

Bei Sammelkanälen, die normalerweise nicht durch Schützen rückgestaut werden, darf der hocheingestaute Fall nicht angestrebt werden. Es ist durchaus denkbar, dass Tornadowirbel sich bei extremer Überbelastung von Anlagen wie beim Boulder-Damm dann einstellen könnten. Die hier als Fallbeispiel 3 gewählte Anordnung könnte sich bei Sammelkanälen mit anschliessender Galerie ausbilden, in der schiessender Abfluss herrscht, das Sohlengefälle also rund 1 % übersteigt. Ist nämlich der Eintrittsquerschnitt in den Tunnel zu knapp bemessen, gerät er unter Druck und wirkt wie ein Durchlass unter schützenartigem Abflusstyp. Der Hohlwirbel würde sich dann einstellen, wenn der Rückstau bis zur Überfallkrone hinführt und der Tauchstrahl in den Wellenstrahl umschlägt. Bei extremer Belastung ist dieses Strömungsverhalten durchaus denkbar und kann dann zur Katastrophe führen. Es gilt deshalb, auf Sekundärströmungen anfällige Abflüsse besonders kritisch auf Versagen hin zu prüfen. Dazu reichen jedoch rechnerische Kriterien nur in Ausnahmefällen aus, wie der vorliegende Aufsatz anhand von Modellversuchen mit tornadoähnlichen Wirbeln zu zeigen versucht.

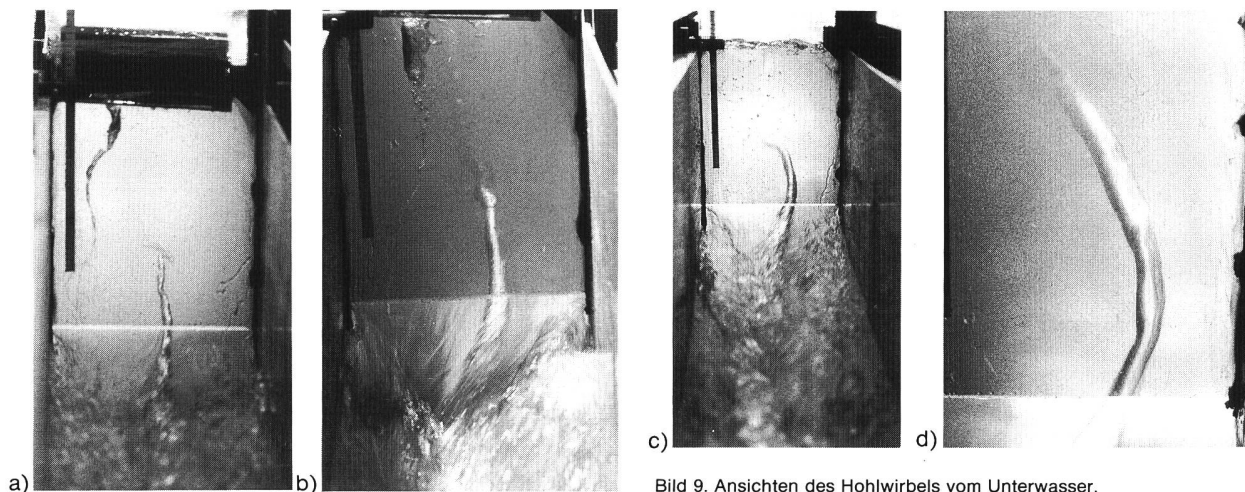


Bild 9. Ansichten des Hohlwirbels vom Unterwasser.

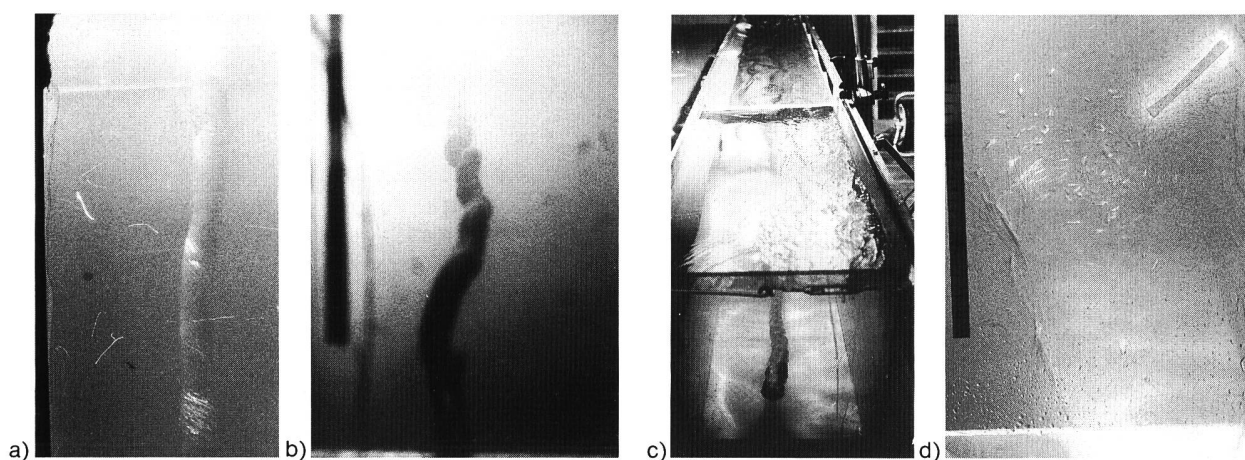


Bild 10. Erscheinungsformen des Tornadowirbels.

Literatur

- Bremen, R., und Hager, W. H. (1989): Experiments in side-channel spillways. «J. Hydraulic Engineering» ASCE, Vol. 115, Nr. 5, 617–635.
- Keller, J. J., und Escudier, M. P. (1980): Theory and observations of waves on hollow-core vortices «J. Fluid Mechanics» Vol. 99, Part 3, 495–511.
- Knauss, J. (1987): Swirling flow problems at intakes. Balkema, Rotterdam.
- Lugt, H. J. (1983): Vortex flow in nature and technology. John Wiley & Sons, New York.

Adresse des Verfassers: Dr. Willi H. Hager, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETHZ, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich.

Verdankung

Die vorliegenden Versuche wurden am «Laboratoire de Constructions Hydrauliques» der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL) durchgeführt. Der Verfasser dankt Prof. Richard Sinniger für die Unterstützung.

Programmierter, vorbeugender Unterhalt von Wasserkraftwerken

Roland Hugentobler, Philipp Schneider, Andreas Badertscher

Zusammenfassung

Bei vielen Wasserkraftwerken, vorab denjenigen, die neu in Betrieb genommen werden, ist die Leistungsgrenze aus verschiedenen Gründen praktisch erreicht. Die Anstrengungen werden sich in Zukunft deshalb vermehrt auf den Erhalt der bestehenden Anlagen konzentrieren. Die hohen Investitionen sollten über einen möglichst langen Zeitbereich erhalten bleiben. Der Turbinenhersteller Hugal hat anlässlich seines 30-Jahr-Jubiläums ein «Softwarepaket für den Unterhalt von Wasserkraftwerken» mit dem Namen Checkpoint vorgestellt. Es wurde in Zusammenarbeit mit der Softwarefirma Softline erarbeitet.

Einführung

Wenn man sich an die guten alten Zeiten zurückerinnert, an Kraftwerke, deren Turbinen während Jahrzehnten kaum je demontiert wurden, so stellt man sich zu Recht die Frage, wieso eine regelmässige Wartung heute erforderlich ist. Es wird leider bei diesen Überlegungen häufig vernachlässigt, dass der Wirkungsgrad dieser Maschinen tiefer und die Bauweise – mangels moderner Berechnungsmethoden – solider war. Zusätzlich wurden die Wirkungsgradverluste, hervorgerufen durch Abnutzungserscheinungen, weniger berücksichtigt.

Bei den heutigen, auf Leistung getrimmten Maschinen kann man sich einen Leistungsverlust oder Betriebsausfall kaum mehr erlauben. Die Verfügbarkeit der Anlage muss deshalb durch eine seriöse Wartung und vorbeugenden Unterhalt sichergestellt werden.

Auch die Sicherheit sollte bei diesen Überlegungen nicht ausser acht gelassen werden. Eine Havarie in einem Kraft-