Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 112 (1994)
Heft: 38

Artikel: Wenn die Absturzströmung zur Todesfalle wird
Autor: Hager, Willi H. / Reinauer, Roger / Lauber, Guido
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-78517

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

Wenn die Absturzströmung zur Todesfalle wird

In Absturzbauwerken mit relativ kleiner Höhendifferenz ereignen sich immer wieder Unfälle, die zu besonderer Vorsicht mahnen. Solche Bauwerke finden sich etwa in Flüssen oder an Flusskraftwerken als Fixpunkte zur Aufrechterhaltung einer bestimmten Sohlenneigung. Sie sehen wenig gefährlich aus, bergen jedoch ein beträchtliches Gefahrenpotential. Im Zusammenhang mit dem Bade- und Bootssport soll deshalb auf die hydraulischen Eigenheiten von Tauchstrahlen hingewiesen werden, einerseits um vor diesen Wasserwalzengebieten zu warnen, anderseits aber auch, um die Ästhetik solcher Rotationsströmungen aufzuzeigen.

VON WILLI H. HAGER, ROGER REINAUER UND GUIDO LAUBER, ZÜRICH

Je nach Geometrie des Absturzbauwerks, der Durchflusscharakteristik und des Unterwasserstandes unterscheidet man grob zwischen freiem und eingestautem Absturz. Freie Abstürze wurden kürzlich von Hager (1993) in einem Übersichtsartikel behandelt. Im Zusammenhang mit Flüssen tritt praktisch nur eingestauter Abfluss auf. Der Unterwasserspiegel steht dann so hoch, dass er den Zufluss beeinflusst. Weiterhin unterscheidet man zwischen Tauch- und Wellstrahl, wie anschliessend ausgeführt wird (Bild 1). Der *Wellstrahl* entspricht einem Oberflächenabfluss, und ein Schwimmer oder ein Boot gelangt zwar unsanft, aber problemlos, ins Unterwasser. Wird der Unterwasserspiegel unter eine Grenzlage abgesenkt oder steigt der Durchfluss über einen Grenzwert, so bildet sich nahezu abrupt der *Tauchstrahl* aus. Ein Schwimmer wird dann vom Tauchpunkt her in die Tiefe gerissen, entlang dem Boden wieder an die Luft bewegt und gelangt infolge des Oberflächenrückstroms zum Tauchpunkt zurück. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis das Schwimmgut durch (Glück und) dichtes Nachfolgen längs der Bodenberandung in das Unterwasser ausgestossen wird.

Häufig endet ein Eindringen in das Walzengebiet aber mit einem so langen Verweilen, dass Lebewesen den Ertrinkungstod erleiden. Grund dazu ist die starke Rotationsströmung, verbunden mit einer Desorientierung infolge von Luftblasen sowie von Geschiebe- und Sedimentbewegung. Kaltes Wasser oder Feststofftransport können das Entweichen aus der Todesfalle weiter erschweren. Leutheusser und Birk (1991) zeigen anhand von Pressemeldungen die Aktualität von Unfällen an Absturzbauwerken in Kanada auf. In der Schweiz haben sich in den vergangenen Jahren ähnlich tragische Unfälle ereignet, weshalb eine Besprechung des Gefahrenpotentials von Tauchstrahlen notwendig erscheint.

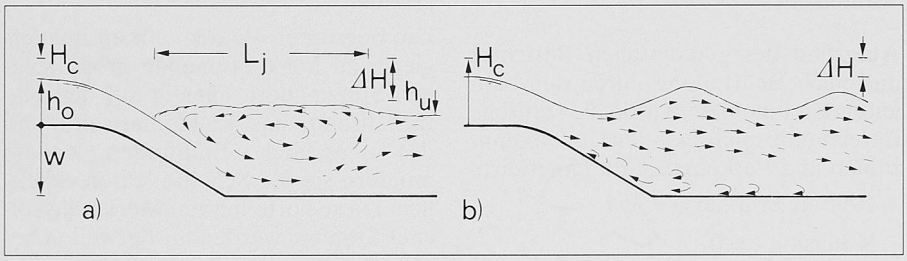

Bild 1. Abflusszustände am eingestauten Absturz. a) Tauchstrahl, b) Wellstrahl

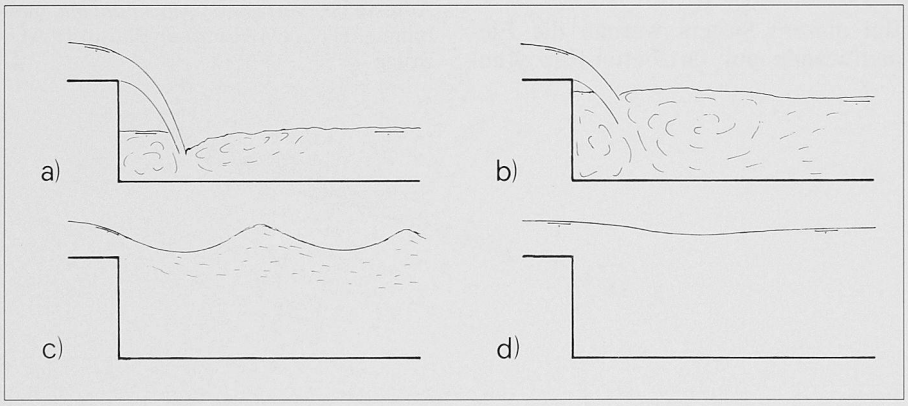

Bild 2. Abflusszustände am Absturz mit senkrechter Begrenzungswand

Hydraulik der Absturzströmung

Feste Sohle

Pagliara und Viti (1991) unterscheiden anhand der zwei Parameter $D=w/h_c$ und $E = h_u/h_c$ die Abflusszustände an einem Absturz mit senkrechter Begrenzungswand. Bild 2 bezieht sich auf den freien und rückgestauten Absturz. Dabei bedeutet w die Absturzhöhe, h_u die Unterwassertiefe und $h_c = [Q^2/(gb^2)]^{1/3}$ die kritische Tiefe (Bild 1). Nachfolgend soll das Augenmerk auf drei *Übergangszustände* gerichtet werden, nämlich auf den Übergang zwischen freiem Abfluss und Tauchstrahl (Index «t»), den Übergang W zwischen Tauchstrahl und Wellstrahl (Index «w») und den Übergang E zwischen Wellstrahl und tiefeingestautem Strömen (Index «e»).

Als Grenze zwischen den Abflusszuständen b) und c) nach Bild 2 gilt

$$D_t = 0.040E^6 \quad (1)$$

und weiter findet der Übergang zwischen dem Tauch- und Wellstrahl statt für

$$D_w = 1.2(E-1.2). \quad (2)$$

Ist schliesslich D kleiner als

$$D_e = E-1.2 \quad (3)$$

so stellt sich ein tief eingestauter Abfluss mit praktisch horizontalem Wasserspiegel ein.

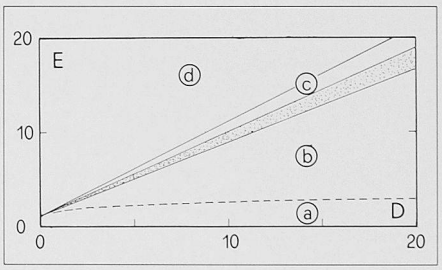

Bild 3. Abflusszustände beim Absturz nach Bild 2

Eine alternative Untersuchung stammt von Ohtsu und Yasuda (1994). Es werden die Abflüsse über den abrupten Absturz für relative Höhen D zwischen 0.45 und 20 systematisch untersucht. Dabei entspricht der Fall $D<9$ einem «niedrigen Absturz», für $D>15$ spricht man hingegen vom «hohen Absturz». Während sich beim «hohen Absturz» keine Hysterese einstellt, findet für $D<9$ der Übergang zwischen den einzelnen Abflusstypen bei Absenken und Anheben des Unterwasserspiegels bei verschiedenen Bedingungen statt.

Wie Pagliari und Viti (1986) genügen auch nach Ohtsu und Yasuda die Parameter D und E zur Beschreibung der Abflussverhältnisse. Für D_w erhalten sie (Bild 3)

$$D_w = \sigma(E-1.2) \qquad (4)$$

mit $\sigma = 9/8$ für zunehmenden und $\sigma = 9/7$ für abnehmenden Unterwasserspiegel bei $D<9$, und $\sigma = 1.0$ bei $D>15$. Gl. (2) liegt also etwa zwischen den beiden Zuständen für den niedrigen Absturz. Für den Übergang zwischen Wellstrahl und Strömen findet Ohtsu und Yasuda unter der Annahme einer praktisch hydrostatischen Druckverteilung ebenfalls Gl. (3), d.h. $\sigma = 1$.

Von speziellem Interesse ist die *Länge* L_j der Oberflächenrückströmung, gemessen vom Tauchpunkt bis zum Stagnationspunkt. Bedeutet $\Delta H = w + H_c - H_u$ den Energieverlust über den Tauchbereich mit $H_c = (3/2)h_c$, $H_o = w + H_c$ und $H_u = h_u + Q^2/(2gb_u^2h_u^2)$ nach Bild 1, so gilt

$$\log(L_j/\Delta H) = -4.80(\Delta H/H_0) + 2.20 \text{ für } \Delta H/H_o \leq 0.2 \qquad (5)$$

$$\log(L_j/\Delta H) = -1.71(\Delta H/H_0) + 1.58 \text{ für } \Delta H/H_o \geq 0.2 \qquad (6)$$

Die zweite Beziehung stimmt dabei mit der Gleichung für die Länge eines freien und auch eingestauten Wassersprungs überein.

Beispiel

Berechne den Abflusszustand für einen Absturz der Höhe w = 2 m, der Breite b=10m für einen Durchfluss von Q = 25 m³/s, falls der Unterwasserstand h_u = 2.5m beträgt. Mit $h_c = [25^2/(9.81 \cdot 10^2)]^{1/3} = 0.86$ m wird $D = 2/0.86 = 2.32<9$, es handelt sich demnach um einen niedrigen Absturz. Weiter beträgt der Einstauparameter $E = 2.5/0.86 = 2.9$.

Mit $D_w = 1.2(2.9-1.2) = 2.05 < 2.32$ liegt demnach ein Tauchstrahl vor. Weiter gilt mit $H_0 = 2+1.5 \cdot 0.86 = 3.3$ m und $H_u = 2.5+25^2/(19.62 \cdot 10^2 2.5^2) = 2.55$ m für $\Delta H = 3.3-2.55 = 0.75$ m, also für $\log(L_j/\Delta H) = -1.71(0.75/3.3)+1.58 = 1.19$ und damit für $L_j/\Delta H=15.5$, entsprechend $L_j = 11.7$ m. Die Länge des Tauchstrahls ist somit fast sechsmal so gross wie die Absturztiefe. Ein Wellstrahl würde sich einstellen, sobald die Beziehung $w<1.2(h_u-1.2h_c)$, entsprechend $h_u = 2/1.2+1.2 \cdot 0.86 > 2.7$ m erfüllt ist. Es genügen also geringe Durchflussänderungen oder kleine Niveauschwankungen, damit der Abflusszustand umschlägt.

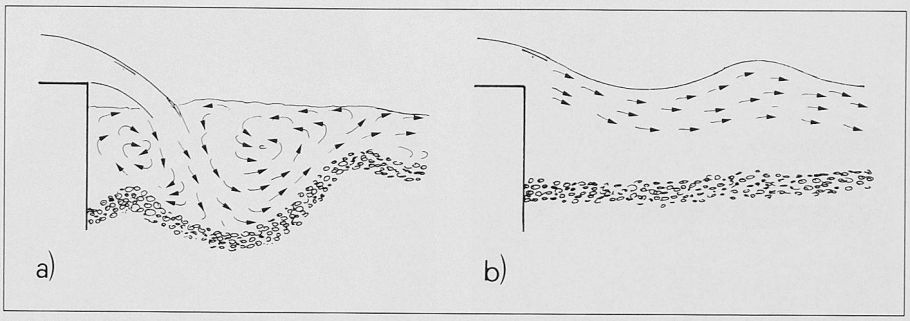

Bild 4. Absturzströmung bei beweglicher Sohle. a) Tauchstrahl, b) Wellstrahl

Bewegliche Sohle

Liegt anstelle einer festen Sohle natürliches Material im Unterwasser eines Absturzes vor, so kann sich ein *Kolk* ausbilden. Bei der Bemessung des Absturzes interessiert vor allem die Kolktiefe und die Lage des Sohlenminimums, da rückschreitende Erosion die Fundation gefährden könnte. Die entsprechende Strömung in der Kolkwanne wurde erst in jüngerer Zeit systematisch untersucht, und ein Übersichtsartikel stammt von Hager (1994).

Im Endzustand bildet sich beim Tauchstrahl eine *wiegenförmige Sohle* mit zwei Erhebungen aus. Beim Wellstrahl bleibt jedoch die Sohle nahezu *eben*, da kein direkter Angriff auf diese erfolgt (Bild 4). Der Einfluss der Sohlengeometrie auf die Strömung bleibt klein, so dass in erster Näherung die Übergangskriterien der festen Sohle auch für die bewegliche Sohle anwendbar sind.

Bei beiden Abflusstypen wird die maximale Kolktiefe wesentlich durch die dichtemessende (densimetrische) *Froudezahl* bestimmt mit

$$\mathbf{F}_d = \frac{V_o}{[(\Delta\rho/\rho_o)\, g d_n]^{1/2}} \qquad (7)$$

Dabei bedeuten V_O die Eintauch- bzw. die Zuflussgeschwindigkeit, $\Delta\rho$ die Dichtedifferenz zwischen Granulat und Wasser, ρ_0 die Fluiddichte, g die Erdbeschleunigung und d_n der massgebende Korndurchmesser. Die Kolktiefe verändert sich mit $\mathbf{F}_d$, für $\mathbf{F}_d < 2$ resultiert jedoch kein Kolk. Obwohl der Kolk beträchtliche Tiefen von mehreren Metern annehmen kann, ist das Vorhandensein von der Oberfläche her nicht erkennbar, und der Kolk stellt somit eine zusätzliche Gefahr für den Schwimmer dar. In der Folge sollen die sich ergebenden Strömungen anhand

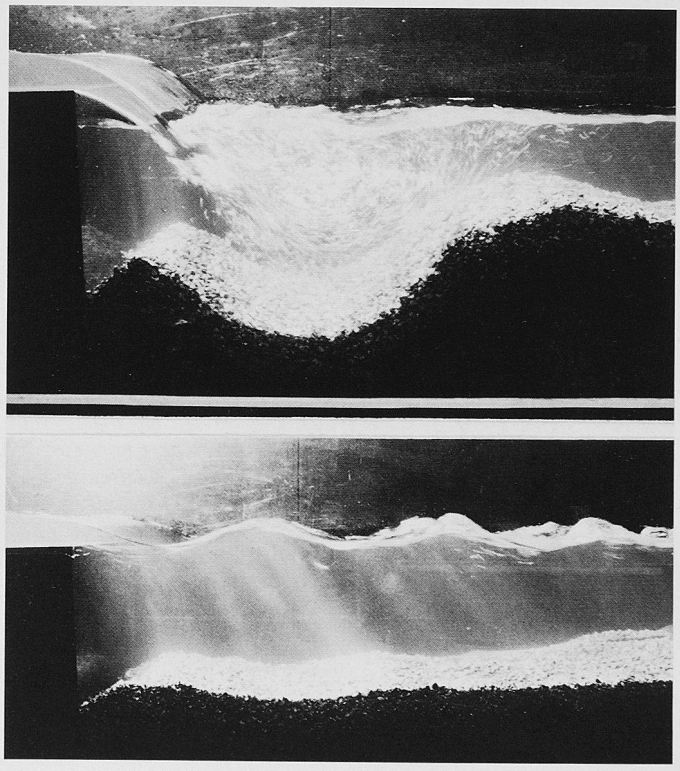

Bild 5. oben: Tauchstrahl, unten: Wellstrahl, von der Seite gesehen

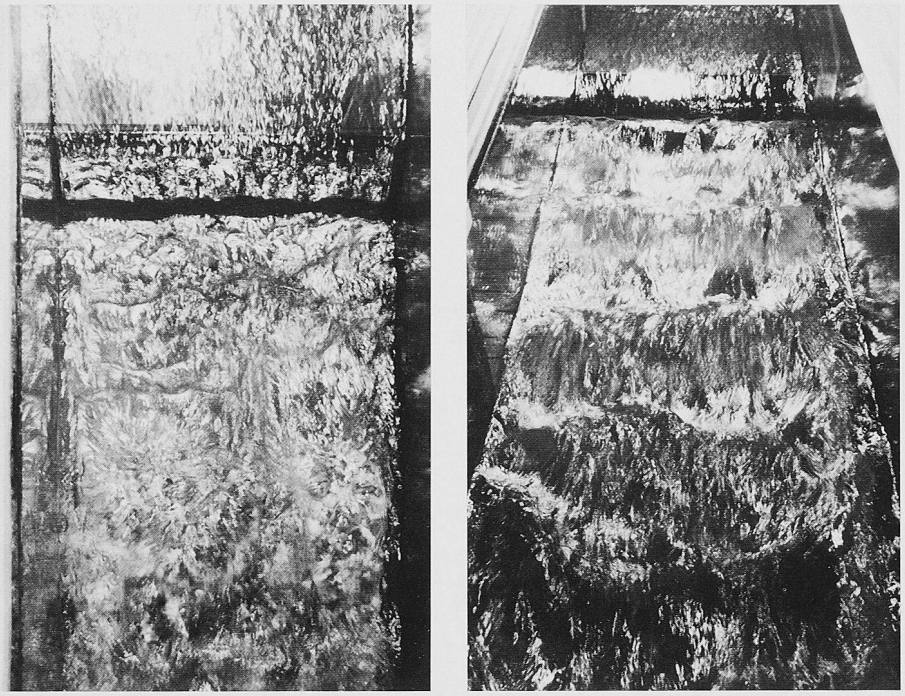

Bild 6. Oberflächenströmung beim Tauchstrahl (links), Wellstrahl (rechts)

von ausgewählten Bildern besprochen werden.

Photographische Dokumentation

Bild 5 stellt den Abfluss bei Tauch- und Wellstrahl einander gegenüber. Man beachte den konzentrierten Eintauchvorgang beim *Tauchstrahl,* das Diffundieren des Strahls, den Aufprall auf die Kolkwanne, die Strahlteilung mit einer Sekundärströmung stromauf und dem Hauptabfluss stromab entlang der steilen Kolkböschungen, ein Aufsteigen des Strahls an die Oberfläche, die abermalige Stromteilung in den Oberflächenrücklauf, der am Tauchpunkt walzenförmig wiederum in die Hauptströmung eingetragen wird. Das Unterwasser vom Oberflächen-Stagnationspunkt ist vergleichsmässig ruhig, und praktisch alle Luft ist dem Abfluss entwichen.

Der *Wellstrahl* (Bild 5 unten) besitzt eine ausgeprägte Oberflächenstruktur mit stehenden Längs- und Kreuzwellen. Sieht man von der nahezu stagnierenden Bodenschicht des Abflusses ab, so handelt es sich beim Wellstrahl grundsätzlich um den gewellten Wassersprung. Obwohl derselbe Durchfluss wie beim Tauchstrahl herrscht, wird praktisch keine Luft in den Abfluss eingetragen. Auf dem Boden bewegt sich kein Partikel, es treten also keine Kolkprobleme unter diesem Abflusszustand auf.

In der Natur lässt sich ein Abfluss nur von der Oberfläche her beobachten. Bild 6 (links) bezieht sich auf den *Tauchstrahl* mit der typischen Querlinie am Tauchpunkt und der relativ ruhigen – und dadurch trügerischen und heimtückischen – Oberflächenrückströmung. Durch den aufsteigenden Abfluss erscheint die Oberflächenstruktur ähnlich wie schwach siedendes Wasser. Beim *Wellstrahl* tritt an der Oberfläche die typisch gewellte Struktur auf. Je nach der Zulauf-Froudezahl brechen die Wellenzüge, oder es bilden sich ungebrochene Wellen wie in Bild 6 (rechts) aus. Die Oberflächengeschwindigkeit ist überraschend gross in Fliessrichtung, so dass sich ein Entkommen aus der Absturzzone problemlos gestaltet. Die Darstellungen von Bild 6 sind jedoch insofern trügerisch, als dass sich in der Natur häufig nicht so eindeutige Strömungen ausbilden, sei es infolge der Profilgeometrie, der detaillierten Absturzausbildung oder infolge von sich am Boden befindenden Blöcken. Bild 7 bezieht sich auf Seitenansichten mit ausgeprägter Wellenbildung.

Gefahrenpotential

Schwimmgut, welches über Abstürze bewegt wird, erleidet je nach Abflusstyp vollständig unterschiedliche Bewegungen. Beim Wellstrahl wird es zwar unsanft, aber doch eindeutig ins Unterwasser bewegt. Die Bodenströmung ist vernachlässigbar, während die Oberflächenströmung praktisch ungebremst ins Unterwasser gelangt. Wasserbauer versuchen deshalb, solche Strömungen

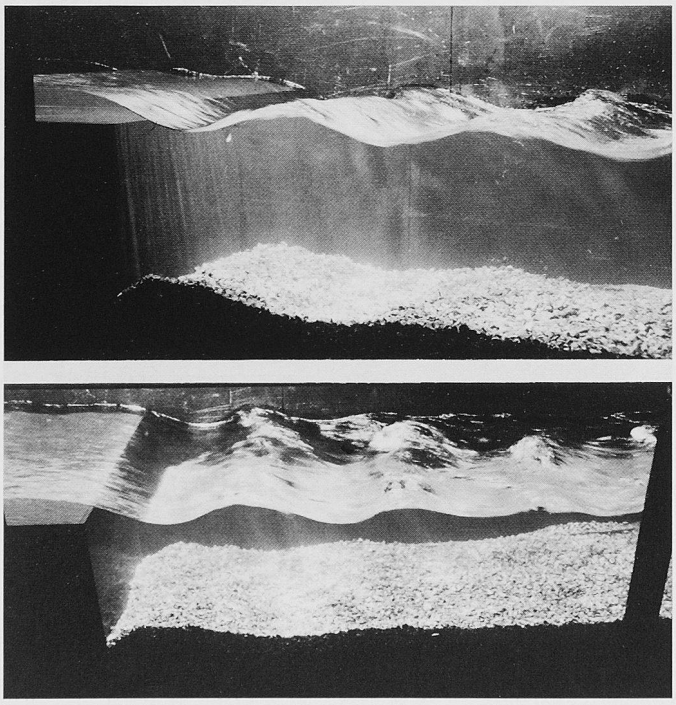

Bild 7. Seitliche Ansichten des Wellstrahls

Referenzen

Hager, W. H. (1993): Absturzbauwerke. «Schweizer Ingenieur und Architekt», 111 (4): 50–56.

Hager, W. H. (1994): Kolkloch infolge von Wasserstrahlen. «Österreichische Wasserwirtschaft», erscheint im Heft 7/8.

Leutheusser, H. J., und *Birk, W. M.* (1991): Drownproofing of low overflow structures. *Journal of Hydraulic Engineering*», 117 (2): 205–213; 118(11): 1586–1588.

Ohtsu, I., und *Yasuda, Y.* (1994): Characteristics of flow over drop structure. Intl. Conf. «Hydraulics in Civil Engineering», Brisbane: 223–228.

Pagliara, S., und *Viti, C.* (1991): Sul comportamento di un salto di fondo rigurgitato. Idrotecnica».

baulich möglichst zu verhindern, da sonst die Böschungsstabilität gefährdet ist. Unterstrom vom Absturz ist hydraulische Energie umzuwandeln, wozu sich der in der Längenausdehnung begrenzte Tauchstrahl natürlich eignet. Es besteht damit ein Konflikt zwischen den Interessen des Wasserbaus und jenen des Wassersports. Das Gefahrenpotentials eines Absturzes wird noch erhöht durch:

- ☐ variablen Durchfluss und veränderlichen Unterwasserstand,
- ☐ individuelle Geometrie des Absturzes,
- ☐ Sohlenbewegung je nach Hochwasserlage,
- ☐ vom Wasser aus schwer einsichtbare Absturzströmung,
- ☐ zeitliche Veränderung der Strömungsparameter und,
- ☐ Überraschungsmoment der trügerischen und ruhigen Tauchstrahlströmung.

Deshalb lassen sich als *Folgerungen* anbringen:

- ☐ an einem Absturz können je nach Abflusszustand verschiedene Abflusstypen auftreten,
- ☐ je nach Absturzgeometrie kann die Strömung stark räumlich ausgebildet sein,
- ☐ auch bei kleinen Abstürzen von rund 0,5 m Höhendifferenz können Gegenströmungen auftreten, deren Geschwindigkeiten durch Schwimmen oder Rudern nicht überwunden werden,
- ☐ die Belüftung des Wassers durch den Absturzstrahl stellt häufig keine besondere Benachteiligung bezüglich Schwimmen dar, dagegen kann die ausgeprägte Oberflächenrückströmung bei Tauchstrahlen zum Problem werden,
- ☐ ein Entrinnen aus einem genügend grossen Absturz mit Tauchstrahlströmung ist häufig unmöglich.

Handelt es sich beim Absturz also um einen Wasserbau, so kann die Absturzstrecke schon bei kleinen Höhendifferenzen eine in der Regel unterschätzte Gefahr darstellen. Einerseits lässt sich der jeweilige Abflusszustand schwimmend oder vom Boot aus kaum erkennen, ist man andererseits einmal in einen Tauchstrahl gelangt, so gibt es u. U. kein Entrinnen mehr, was traurige Zahlen Jahr für Jahr belegen.

Schlussfolgerungen

Absturzbauwerke können bei der Tauchstrahlströmung eine grosse Gefahrenquelle in sich bergen, beim Wellstrahl hingegen oft problemlos überquert werden. Die beiden Abflusstypen lassen sich nicht eindeutig erkennen, und Übergänge vom ungefährlichen Wellstrahl zum gefährlichen Tauchstrahl können durch minime Änderungen ausgelöst werden. Die beiden Abflusstypen sind beschrieben, und zwar für feste und bewegliche Sohle. Anhand von Photos werden sowohl die Gefahren als auch die Ästhetik solcher Strahlen aufgezeigt.

Adresse der Verfasser: PD Dr. *W. H. Hager, R. Reinauer,* dipl. Bauing. ETH/SIA, *G. Lauber,* dipl. Bauing. ETH/SIA, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Verdankungen

Wir möchten die wertvollen Anregungen von Herrn *Peter Bäni,* Eidg. Sportschule Magglingen, und von Herrn *Herbert Hagmann,* Sicherheitsdelegierter vom Schweiz. Kanu-Verband, bestens verdanken.

Bücher

Betontragwerke mit Aussenbewehrung

Von *R. Tausky.* 1993, 168 Seiten, gebunden, Preis: Fr. 78.–. Birkhäuser-Verlag, Basel. ISBN 3-7643-2911-4

Ressourcen werden knapper, und viele bestehende Bauten in Agglomerationen der Industrieländer sind standortgebunden. Bei diesen Gegebenheiten kommt der Erhaltung vorhandener Bausubstanz und ihrer Anpassung an neue Bedürfnisse steigende Beachtung zu. Dies gilt auch für Tragkonstruktionen. Während Tragwerke in Stahl von vornherein anpassungsfähiger sind, mussten entsprechende Möglichkeiten bei Betontragwerken erst geschaffen und entwickelt werden. Das nachträgliche Anbringen äusserer Bewehrungen ist ein solches Verfahren.

Vor einem Vierteljahrhundert erstmals angewandt, ist die Technik heute ausgereift und in vielen Ländern bewährt. Sie ermöglicht es, Mängel an bestehenden Konstruktionen zu beheben oder ihre Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit neuen Einwirkungen – wie erhöhter Nutzlast oder veränderter Art der Beanspruchung – anzupassen. Die Anwendung des Verfahrens erfordert besondere Kenntnisse des projektierenden Ingenieurs auf den Gebieten der Baustatik, der Beton- und der Epoxidharztechnologie. Es besteht eine umfangreiche Fachliteratur zu Einzelproblemen und über einzelne ausgeführte Verstärkungen, doch fehlte bisher eine zusammenfassende Darstellung der theoretischen Grundlagen und der praktischen Anwendung. Das vorliegende Buch will diese Lücke schliessen.

Verbundstützen aus quadratischen und rechteckigen Hohlprofilen

Hrsg. Schweiz. Zentralstelle für Stahlbau (SZS), Nr. C2.3., Zürich, 1993, 60 S., Abb., Tab., Diagramme, Rechenbeispiele, A4, d + f. Preis: Fr. 33.–.

Die Vorteile einer Beton- oder Mörtelfüllung für Hohlprofilstützen sind seit langem bekannt: Die Stahl-Beton-Verbundwirkung erhöht den Tragwiderstand, und der wasserhaltige Beton erhöht den Feuerwiderstand. Das Tragverhalten von Verbundstützen im Brandfall war aber früher rechnerisch nur schwer zu erfassen, und einfach anzuwendende Bemessungshilfen fehlten meistens.

Die vorliegende Publikation dient der raschen und sicheren Dimensionierung von Verbundstützen aus quadratischen Hohlprofilen. Sie enthält die theoretischen Grundlagen, Konstruktionsdetails und Berechnungsbeispiele sowie zahlreiche Knicklastdiagramme für Raumtemperatur und ISO-Normbrand. Ergänzende Angaben erlauben den Einbezug von Biegebeanspruchungen sowie die Ausweitung auf rechteckige Hohlprofile. Die Publikation beruht auf den einschlägigen Angaben der Norm SIA 161 (1990), der «Technical Note ECCS N° 55» und der europäischen Vornorm ENV 1994-1-2. Sie berücksichtigt somit die neuesten nationalen und internationalen Vorschriften und Regelwerke.

Mehrwertsteuer – das Nachschlagewerk zum Systemwechsel

Von *Stephan Kuhn* und *Peter Spinnler.* 325 S., geb., Preis: Fr. 108.–. Cosmos-Verlag, Muri BE, 1994. SBN 3-85621-100-4.

Das Werk «Mehrwertsteuer – das Nachschlagewerk zum Systemwechsel» richtet sich in erster Linie an betroffene Unternehmer und die mit umsatzsteuerlichen Fragen konfrontierten Berater. Ziel der Autoren ist es, die neuen Rechtsnormen in verständlicher Weise darzustellen, auf mögliche Probleme aufmerksam zu machen und die nötigen Querverbindungen zwischen den verschiedenen Bestimmungen herzustellen.

Das Werk ermöglicht es dem Unternehmer, sich optimal auf den Systemwechsel von der WUSt zur MWSt vorzubereiten und die bestehenden Spielräume zu seinen Gunsten zu nutzen. Anhand von Checklisten, Darstellungen, Grafiken und konkreten Beispielen wird gezeigt, welche Massnahmen vom Praktiker bezüglich Preisgestaltung, Steuerplanung, Ablauforganisation, Buchführung, Kalkulation, Software usw. getroffen werden müssen.