

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 93 (2001)  
**Heft:** 1-2

**Artikel:** Pfeiler- und Widerlagerkolke an Brücken  
**Autor:** Oliveto, Giuseppe / Hager, Willi H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-939863>

#### 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:** 10.02.2026

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

# Pfeiler- und Widerlagerkolke an Brücken

■ Giuseppe Oliveto und Willi H. Hager

## Zusammenfassung

Kolke an Pfeilern und Widerlagern von Brücken sind im Flussbau relevant. Diese Untersuchung will die wichtigsten Resultate von an der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit der Universität von Basilicata durchgeführten Laboruntersuchungen zusammenfassen. Die erarbeitete Gleichung für den zeitlichen Kolkfortschritt wird vorerst diskutiert und der wesentliche Einfluss der densimetrischen Partikel-Froudezahl speziell erwähnt. Die Voraussetzungen, unter welchen diese Beziehung gilt, werden anschliessend mitgeteilt. Dann wird der Kolkvorgang im Übergangsregime mit demjenigen im turbulent rauen Regime verglichen. Es wird ein signifikanter Massstabseffekt gefunden, der sich bei der Übertragung von Laboruntersuchungen auf den Prototypen infolge der Viskosität des Fluids einstellt. Die Konsequenzen dieses Phänomens werden schliesslich einer Diskussion unterzogen.

## Einführung

Kolkerscheinungen an Brücken stellen auch heute noch ein wesentliches Problem der Brückenhydraulik dar, und Hochwasser richten immer wieder beträchtlichen Schaden an diesen strategisch wichtigen Bauwerken an. Obwohl in den vergangenen zwei Jahrzehnten eine Reihe von Forschungsprojekten durchgeführt wurden (Breusers und Raudkivi, 1991; Melville und Sutherland, 1988; Kohli, 1998), sind nicht alle Aspekte geklärt, insbesondere hinsichtlich der zeitlichen Kolkentwicklung. Deshalb wurde zwischen der VAW, ETH Zürich, und der DIFA, Università della Basilicata, Italien, ein grösseres Forschungsvorhaben durchgeführt, dessen Resultate im Folgenden zusammengefasst werden.

Die Experimente wurden in einem 1 m breiten, rechteckigen Kolkkanal durchgeführt. Insgesamt sind sechs Sedimente untersucht worden, drei davon praktisch uniform mit einem Plastikgranulat der Dichte  $\rho_s = 1,42 \text{ t/m}^3$  und  $d_{50} = 3,3 \text{ mm}$ , einem uniformen Sand mit  $d_{50} = 0,55 \text{ mm}$  und einem uniformen Kies mit  $d_{50} = 4,8 \text{ mm}$ . Die drei Mischungen besaßen mittlere Korndurchmesser  $d_{50} = 5,3 \text{ mm}$ ,  $1,2 \text{ mm}$  und  $3,1 \text{ mm}$  mit Standardabweichungen von  $\sigma = 1,43$ ,  $1,80$  und  $2,15$ . Brückenpfeiler der Durchmesser zwischen  $D = 0,01 \text{ m}$  und  $0,50 \text{ m}$  sowie Widerlager von Breiten zwischen  $b = 0,05$  und  $0,60 \text{ m}$  wurden verwendet. Insgesamt liegen rund 200 Einzelexperimente vor, welche zwischen wenigen Stunden und vielen Wochen gedauert haben. Das Ziel dieser Experimente war dabei, eine Beziehung zwischen der Koltiefe und der Zeit  $z(t)$  in Abhängigkeit des Pfeilerdurchmessers  $D$  oder der Widerlagerbreite  $b$ , der Geschwindigkeit  $V_o$  im Zuflusskanal (Index o) und der Zuflusswassertiefe  $h_o$ , der relativen Dichte  $(\rho_s - \rho)/\rho$  mit  $\rho_s$  als Sediment- und  $\rho$  als Fluiddichte, der Gravitationskonstanten  $g$ , der Standardabweichung des Sediments  $\sigma = (d_{84}/d_{16})^{1/2}$  und der Zeit  $t$  herzustellen.

Der ETH-Datensatz erlaubte die Ermittlung der dimensionslosen Koltiefe  $Z = z/(D^{2/3}h_o^{1/3})$  für Pfeiler und  $Z = z/(b^{2/3}h_o^{1/3})$  für Widerlager in Abhängigkeit der densimetrischen Partikel-Froudezahl einer Sedimentmischung  $F_d = (\sigma^{-1/3}V_o)/(g'd_{50})^{1/2}$ , eines Formfaktors  $N = 1$  für den Pfeiler und  $N = 1,25$  für das Widerlager, und der dimensionslosen Zeit  $T = [\sigma^{1/3}(g'd_{50})^{1/2}/(D^{2/3}h_o^{1/3})]t$  für Pfeiler sowie  $T = [\sigma^{1/3}(g'd_{50})^{1/2}/(b^{2/3}h_o^{1/3})]t$  für das Widerlager. Diese Gleichung lautet (Oliveto und Hager, 2001)

$$Z = 0,068 N \sigma^{-1/2} F_d^{1.5} \log(T) \quad (1)$$
$$F_d > F_{di}$$

und gilt nur, falls die densimetrische Froudezahl  $F_d$  grösser als die Froudezahl  $F_{di}$  bei Bewegungsbeginn (inception) ist. Gleichung (1) bezieht sich in einfacher Weise auf die Einflüsse der Pfeiler- oder Widerlagergeometrie in  $Z$ , der dynamischen Einflüsse in  $\sigma$  und  $F_d$  und des zeitlichen Einflusses in  $T$ .

Man beachte die Begrenzung von (1) für  $F_d \leq F_{di}$ , welche eine kompliziertere mathematische Formulierung umgeht. Hinsichtlich der Zeit hingegen liegen keine Begrenzungen vor, in allen Experimenten ist nie ein sogenannter Endzustand des Kolks festgestellt worden, da es sich um einen hochturbulenten Erosionsprozess handelt.

Auch Ballio et al. (2000) mit Kolkzeiten von bis zu  $T = 10^8$  haben einen steten, wenn auch logarithmischen Kolkfortschritt festgestellt. Diese Feststellung mag für den praktischen Ingenieur irrelevant sein, da bei Anwendungen beispielsweise mit Flutwellen der Durchfluss und damit die Zuflussgeschwindigkeit sich immer verändern. Hinsichtlich des Berechnungs-konzepts in der Brückenhydraulik ist diese Aussage wichtig, da bei einer Bemessung nicht nur rein hydraulische, sondern eben auch hydrologische (und weitere) Faktoren massgebend sind.

Gleichung (1) wurde anhand der anwendbaren Literaturdaten verifiziert. Auf Grund einer detaillierten Datenanalyse sind dabei folgende Anwendungskriterien aufgestellt worden:

1. Der Kanal (oder Flussabschnitt) ist gerade, besitzt näherungsweise einen rechteckigen Querschnitt ohne wesentliche Bettformen, und die Rauigkeitsverteilung ist praktisch uniform. Dies schliesst keineswegs Sedimentmischungen aus, diese sollten jedoch nicht konzentriert auftreten.
2. Der Brückenpfeiler weist entweder kreiszylindrischen oder rechteckigen Querschnitt auf, das Widerlager ist immer rechteckig. Es lassen sich deshalb auch nahezu rechteckige Baugruben in Flüssen betrachten. Das Widerlager sollte eine Breite von mindestens 5% der Kanalbreite besitzen, sonst wird der Kolk signifikant kleiner als nach (1). Weiterhin soll die Zuflussrichtung senkrecht zur Oberwasserseite des Widerlagers sein.

Schlagworte: Brückenhydraulik, Kolkgleichung, Pfeilerkolk, Widerlagerkolk, Zeitliche Kolkentwicklung.

3. Das Fluid ist normalerweise Wasser und das Sediment üblicherweise Sand oder Kies. Anhand der allgemeinen Analyse lassen sich aber auch Fluide und Sedimente verwenden, deren Viskosität nahe bei Wasser und deren Dichteunterschiede nicht zu klein oder zu gross sind.

4. Die Zuflussbedingungen sind zeitlich unverändert zu betrachten, allgemein können jedoch sowohl die Zuflussgeschwindigkeit, die mittlere Zuflusswassertiefe, der mittlere Korndurchmesser und die Standardabweichung mit der Zeit variieren. Falls diese zeitlichen Funktionen gegeben sind und falls keine abrupten Änderungen auftreten, lässt sich der zeitliche Kolkfortschritt ebenfalls mit (1) ermitteln.

5. Der mittlere Korndurchmesser sollte höchstens rund  $0,1 h_o$  betragen, damit Makro-Rauheitseffekte nicht dominieren. Um viskose Einflüsse auszuschliessen, hat der mittlere Korndurchmesser  $d_{50}$  bei Sand-Wasser-Zweiphasenströmungen mindestens 0,8 mm zu betragen.

6. Bezeichnet man das Verhältnis zwischen Zuflussgeschwindigkeit  $V_o$  und der Geschwindigkeit, bei der das Bett im Zuflusskanal in Bewegung gerät als Stabilitätszahl (threshold number), so hat diese Zahl höchstens 1,2 zu betragen. Gleichung (1) bezieht sich demnach wesentlich auf so genannte Klarwasserkolke. Weiterhin stellen sich unter dieser Voraussetzung und bei Materialien mit  $d_{50} > 0,8$  mm keine beträchtlichen Bettformen ein.

Die Standardabweichung des ETH-Datensets von der Gleichung (1) war besser als 10%, mit Maximalabweichungen bis zu 20% sowie Ausreissern bis zu rund 30%. Diese Genauigkeit wird für Anwendungen im Flussbau als genügend betrachtet. Im Folgenden sollen einige Konsequenzen von (1) besprochen werden.

## Charakteristika der neuen Kolkgleichung

Gleichung (1) lässt sich nicht einfach mathematisch besprechen, da sie eine Log-Funktion enthält. Für Relativzeiten  $2 \times 10^3 < T < 5 \times 10^7$  lässt sich  $\log(T)$  jedoch besser als  $\pm 5\%$  durch die Potenzfunktion  $1,85T^{1/12}$  approximieren. Dann erscheinen in (1) nur noch Potenzen aller involvierten Parameter, gilt doch (2), falls als Bezugsgrössen  $d_{50}$  und  $g'$  betrachtet werden. Deshalb besitzt die densimetrische Froudezahl  $F_d$  den massgebenden Einfluss auf den Kolkfortschritt, gefolgt von den Einflüssen der Element-Querabmessung  $D$  (oder  $b$ ) sowie  $\sigma$ , wogegen der Einfluss der Wassertiefe im Zuflussbereich  $h_o$  bescheiden ist. Wird (1) auf die Querabmessung  $D$  (oder  $b$ ) bezogen, so folgt (3) anstelle von (2).

$$\frac{z}{d_{50}} = \frac{1}{8} N \sigma^{-17/36} F_d^{1.5} \left( D^{2/3} h_o^{1/3} / d_{50} \right)^{11/12} \left[ (g'/d_{50})^{1/2} t \right]^{1/12} \quad F_d > F_{di} \quad (2)$$

$$\frac{z}{D} = \frac{1}{8} N \sigma^{-17/36} \left[ V_o / (g' D)^{1/2} \right]^{3/2} \left( D^{29} h_o^{22} / d_{50}^{51} \right)^{1/72} \left[ (g'/D)^{1/2} t \right]^{1/12} \quad F_d > F_{di} \quad (3)$$

Der Einfluss der Korngrösse auf den Kolkfortschritt ist demnach rund  $d_{50}^{-2/3}$  und damit relativ signifikant. Es lässt sich auch feststellen, dass der kombinierte Parameter  $(\sigma \cdot d_{50})^{2/3}$  etwa der massgebenden Korngrösse für die Kolkentwicklung entspricht. Man erkennt auch den relativ grossen Einfluss der Standardabweichung und folgert insbesondere, dass unter sonst gleichen Bedingungen eine Mischung beträchtlich weniger erodiert wird als ein Einkorn ( $\sigma=1$ ). Dieser Effekt zeigt sich als so genannte *Sediment-Abpfälsterung*, bei welcher sich nur noch die Grobkomponente im Kolkloch befindet und damit einen natürlichen Kolschutz zu bieten vermag. Im Flussbau wird diese Tatsache durch Blockwurf häufig angewendet, um damit Bauwerken die nötige Stabilität beispielsweise während Hochwassern zu gewährleisten. Die vorliegende Beziehung erlaubt in der Tat auch eine Abschätzung der notwendigen Blockwurfdimensionen.

## Maximale Kolktiefe

### Bewegungskriterium und Kolkgleichung

Chabert und Engeldinger (1956) haben als erste die maximal (Index  $M$ ) mögliche Kolktiefe festgestellt beim Übergang zwischen Klarwasserkolk und genereller Bettbewegung (live-bed scour), entsprechend einer *Threshold* (Index  $t$ ) densimetrischen Froudezahl  $F_t = V_o / V_t = 1$ . Dabei stellt  $V_t$  die Zuflussgeschwindigkeit dar, bei der die Flussohle im Zuflussbereich zum Pfeiler oder Widerlager in Bewegung gerät. Oliveto und Hager (2001) haben Beziehungen für  $F_t$  im viskosen, im Übergangs- und im turbulent rauen Regime in Abhängigkeit des Relativkorndurchmessers  $D^* = (g'/v^2)^{1/3} d_{50}$  angegeben. Man kann dabei auch  $D^* = d_{50}/d_R$  betrachten, mit dem Refe-

renzdurchmesser  $d_R = (v^2/g')^{1/3}$ . Für Sand und Wasser entsteht somit  $d_R = 0,04$  mm bei einer Temperatur von rund 20°C. Da Gleichung (1) nur für  $d_{50} > 0,8$  bis 0,9 mm anzuwenden ist, sollen lediglich das Übergangs- und das turbulent rau Regime betrachtet werden, mit (4) für  $10 < D^* < 150$  und (5) für  $D^* > 150$ . Zusätzlich zu den bereits eingeführten Parametern erscheint der hydraulische Radius  $R_h$ , welcher im Flussbau oft durch die Zuflusswassertiefe  $h_o$  angenähert werden kann. Wird nun  $F_t = 1$  verlangt, so lässt sich die Geschwindigkeit  $V_o$  eliminieren, und es folgen (6) und (7) anstelle von (3).

Die Gleichungen (6) und (7) sind identisch mit der Ausnahme des Terms  $d_{50}^{-6} d_R^{-9}$  für das Übergangsregime und  $d_{50}^{-15}$  im turbulent rauen Regime. Für maximale Kolkbedingungen nimmt deshalb die auf den Pfeilerdurchmesser (oder die Widerlagerbreite  $b$ ) bezogene Grösse  $z_M/D$  schwach zu mit  $\sigma$ ,  $g'$  und  $d_{50}$ , mässig nimmt sie zu mit der Elementbreite  $D$  (oder  $b$ ) und signifikant mit der Zuflusswassertiefe  $h_o$ .

### Vereinfachungen

Um eine Vorstellung von den hydraulischen Verhältnissen zu erhalten, soll eine typische Kolkzeit von  $t = 10^5$  s, entsprechend einem guten Tag, und ein Sand-Wasser-Material betrachtet werden, für welches die relative Erdbeschleunigung  $g' = 16$  tm/s<sup>2</sup> beträgt. Für einen Pfeilerdurchmesser  $D$  von rund 1 m lässt sich der zusätzliche Zeiteffekt in (7) vernachlässigen, entsprechend  $[(g'/D)^{1/2} t]^{1/12} = [(16/1)^{1/2} 10^5]^{1/12} = 2,93$ . Da der Effekt von  $\sigma$  klein ist, sei  $\sigma = 1$ . Einsetzen in (6) und (7) ergibt dann (8) und (9). Infolge des Näherungscharakters dieser Beziehungen lassen sich weitere Vereinfachungen rechtfertigen, um damit übersichtliche Resultate zu erhalten.

$$F_t = \frac{V_o}{1,08 (g' d_{50})^{1/2} \sigma^{1/3} D^{*1/12} (R_h/d_{50})^{1/6}} \quad 10 < D^* < 150 \quad (4)$$

$$F_t = \frac{V_o}{1,65 (g' d_{50})^{1/2} \sigma^{1/3} (R_h/d_{50})^{1/6}} \quad D^* \geq 150 \quad (5)$$

$$\frac{z_M}{D} = 0,140 N \sigma^{1/36} \left( h_o^{40} / d_{50}^6 d_R^9 D^{25} \right)^{1/72} \left[ (g'/D)^{1/2} t \right]^{1/12} \quad F_d > F_{di} \quad 10 < D^* < 150 \quad (6)$$

$$\frac{z_M}{D} = 0,265 N \sigma^{1/36} \left( h_o^{40} / d_{50}^{15} D^{25} \right)^{1/72} \left[ (g'/D)^{1/2} t \right]^{1/12} \quad F_d > F_{di} \quad D^* \geq 150 \quad (7)$$

$$\frac{z_M}{D} = 0,41N \left( h_o^{40} / d_{50}^6 d_R^9 D^{25} \right)^{1/72}$$

$$F_d > F_{di} \quad (8)$$

$$\frac{z_M}{D} = 0,78N \left( h_o^{40} / d_{50}^{15} D^{25} \right)^{1/72}$$

$$10 < D^* < 150 \quad (9)$$

$$\frac{z_M}{D} = 0,50N \left( h_o^{12} / d_{50} d_R^3 D^8 \right)^{1/24}$$

$$F_d > F_{di} \quad (10)$$

$$\frac{z_M}{D} = 0,95N \left( h_o^3 / d_{50} D^2 \right)^{1/6}$$

$$D^* \geq 150 \quad (11)$$

Beispielsweise gilt  $h_o^{40}/D^{25} \rightarrow h_o^{39}/D^{24}$ . Die Wassertiefe ist oft rund 100-mal grösser als die mittlere Korngrösse, womit  $(h_o/d_{50})^{1/24} = 100^{1/24} = 1,21$  und deshalb für  $z_M/D$  (10) und (11) resultieren.

Die letzte Beziehung ist speziell einfach und besagt, dass die absolute Kolktiefe  $z_M$  nach einem Tag gleich  $N$  mal dem Faktor  $(D/d_{50})^{1/6}$  mal der Masslänge  $(h_o D)^{1/2}$  entspricht. Heute wird die maximale Kolktiefe

häufig nach den Beziehungen von Melville und Sutherland (1988) abgeschätzt, mit  $z_M/D = 2,4$  für Pfeiler und etwa  $z_M/D = 3$  für Widerlager. Für rund  $h_o/D = 3$  und wiederum  $h_o/d_{50} = 100$  findet man nach (11)  $z_M/D = 2,9N$ . Man beachte, dass in der heutigen Bemessungspraxis die in (10) und (11) enthaltenen Parameter keinen Eingang finden.

Die meisten Labortests wurden im Übergangsregime durchgeführt mit einem

typischen Sediment von rund  $d_{50}=1$  mm. Verwendet man wiederum  $h_o/d_{50}=100$  und  $h_o/D=3$ , so folgt nach (10)  $z_M/D = 0,87N(h_o/d_R)^{1/8}$ , also ein Viskositätseinfluss. Für eine typische Laborwassertiefe von  $h_o=0,10$  m ergibt sich in guter Übereinstimmung mit der heutigen Bemessungspraxis dann  $z_M/D=2,3N$ . Diese Berechnungen, welche lediglich zu Vergleichszwecken durchgeführt werden, verdeutlichen klar einen signifikanten Massstabseffekt infolge von Viskosität, welcher bis heute praktisch keine Aufmerksamkeit erhielt. Demnach ist unter sonst gleichen Verhältnissen die maximale Kolktiefe im Labor rund 30% kleiner als in der entsprechenden Prototypanordnung. Diese starke Abweichung bei der Übertragung von Modell- zu Prototypverhältnissen mag die grossen Divergenzen zwischen Naturereignissen und der Nachbildung im hydraulischen Modell erklären, die bis heute zur Vorsicht vor Kolkexperimenten mahnten.

### Schlussfolgerungen

Anhand einer Dimensionsanalyse und umfassender Laboruntersuchungen ist die zeitliche Entwicklung von Pfeiler- und Widerlagerkollen untersucht worden. Für Abflüsse im nicht viskosen Regime liegt nun eine einheitliche Kolkgleichung vor, welche die wichtigsten Einflüsse zur Entwicklung des Klarwasserkolks wiedergibt. Der Einfluss der Elementgeometrie, also zylindrischer Pfeiler oder rechteckiges Widerlager, oder gar andere Geometrien, lassen sich durch den Formfaktor  $N$  in Rechnung stellen. Die zeitliche Kolkentwicklung  $z(t)$  hängt demnach von drei Einflussgrössen ab:

1. Referenzlänge ( $D^{2/3}h_o^{1/3}$ ) für den Pfeiler und ( $b^{2/3}h_o^{1/3}$ ) für das Widerlager,
2. densimetrische Froudezahl von Sedimentmischungen  $F_{dm} = \sigma^{-1/3}V_o/(g'd_{50})^{1/2}$ , mit  $\sigma=1$  für uniformes Sediment, und
3. Relativzeit  $T$ , welche anhand der Ähnlichkeitsanalyse die Charakteristika der Brückengeometrie wie auch der Granulometrie beinhaltet.

Die Voraussetzungen, unter welchen Gleichung (1) gilt, werden ausführlich diskutiert.

Im zweiten Teil werden die Einflüsse der verschiedenen Parameter erläutert und der signifikante Effekt der densimetrischen Partikel-Froudezahl neben den Abmessungen  $D$  oder  $b$  des Kolkelements festgehalten. Erstaunlicherweise besitzt die Zuflusswassertiefe lediglich einen untergeordneten Einfluss auf den Kolkvorgang.

Im dritten Teil wird der maximal mögliche Kolkvorgang betrachtet, der sich bekanntlich zwischen dem Klarwasser- und dem Threshold-Regime einstellt. Aufbauend auf Beziehungen, die diesen Übergang be-



Bild 1. Pfeilerkolk-Experiment 2. März 2000, Mischung 2,  $h_o=20,2$  cm,  $F_d=2,4$ .

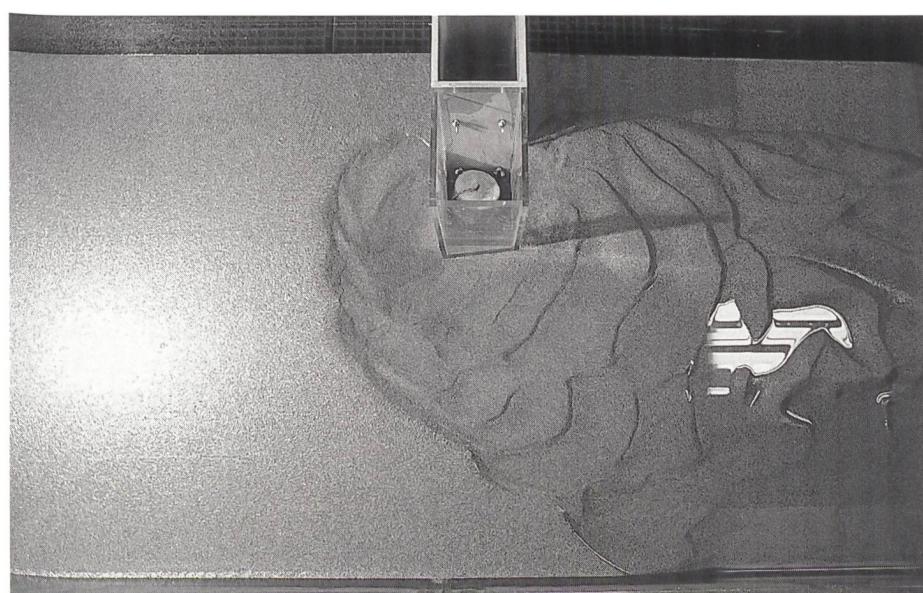


Bild 2. Widerlagerkolk-Experiment 28. September 1999,  $d_{50}=0,55$  mm,  $F_d=2,0$ ,  $h_o=20$  mm.

schreiben, werden Gleichungen für die maximal erreichbare Kolktiefe im Übergangs- und im turbulent rauen Regime abgeleitet. Anhand einer Größenabschätzung lässt sich dann ein wesentlicher Massstabseffekt ermitteln, welcher für die starken Divergenzen zwischen heutigen Modelluntersuchungen und Naturmessungen verantwortlich sein kann. Es lässt sich deshalb anführen, dass Kolkvorgänge im Labor mit grosser Umsicht auf Prototypen hochgerechnet werden müssen.

Auch geht aus den vorliegenden Untersuchungen klar hervor, dass Kolkvorgänge an Brücken im Besonderen – wie auch Kolke allgemeiner Art – keineswegs als abgeschlossenes Forschungsthema betrachtet werden können. In diesem spannenden Bereich der Hydraulik sind demnach noch eine Vielzahl von Forschungsarbeiten zu erwarten, um die wichtigsten Phänomene ingeniermässig zu beschreiben.

#### Dank

Dieses Projekt stellt eine Zusammenarbeit zwischen der Università della Basilicata, Italien, und der ETH Zürich dar. Wir möchten uns für die Unterstützung bedanken.

#### Literatur

*Ballio, F., Crippa, S., Fioroni, M., Franzetti, S. (2000): Effetto del restringimento di sezione sui processi erosivi in prossimità delle spalle dei ponti. 27 Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche Genova 1: 195–203.*

*Breusers, H. N. C., Raudkivi, A. J. (1991): Scouring. IAHR Hydraulic structures design manual 2. Balkema: Rotterdam.*

*Chabert, J., Engeldinger, P. (1956): Etude des affouillements autour des piles de ponts. Serie A. Laboratoire National d'Hydraulique: Chatou.*

*Hager, W. H., Oliveto, G. (2001): Shields' condition in bridge hydraulics. Journal of Hydraulic Engineering (eingereicht).*

*Kohli, A. (1998): Kolk an Gebäuden in Über-schwemmungsebenen. PhD thesis 12592. ETH: Zürich.*

*Melville, B. W., Sutherland, A. J. (1988): Design method for local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering 114(10): 1210–1226.*

*Oliveto, G., Hager, W. H. (2001): Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. Journal of Hydraulic Engineering (eingereicht).*

#### Adressen der Autoren

Dr. Giuseppe Oliveto, Dip. di Ingegneria e Fisica dell'Ambiente, DIFA, Università della Basilicata, I-85100 Potenza, Italy, oder über E-Mail-Adresse: gndci121@unibas.it

Prof. Dr. Willi H. Hager, VAW, ETH Zentrum, CH-8092 Zürich, Schweiz, oder über E-Mail-Adresse: hager@vaw.baug.ethz.ch

## Zeitreisen des Grundwassers

■ Rolf Kipfer

Neue Tracermethoden erschliessen die zeitliche Entwicklung im Grundwasser und zeigen, dass sich Grundwasser auf Zeitskalen zwischen Tagen und Jahrmillionen erneuert. Auch in der Schweiz, dem Wasserschloss Europas, wird «altes» Grundwasser aus tieferen Erdschichten geschöpft. Dieses Wasser stammt aus der letzten Eiszeit, erneuert sich entsprechend kaum und wird somit bergmännisch abgebaut.

Grundwasser bewegt sich nicht nur im Raum, es entwickelt sich vielmehr auch in der Zeit. Weltweit erneuert sich Grundwasser auf einer Zeitskala von 1500 Jahren. Bemerkenswert ist jedoch weniger die Größenordnung selbst als vielmehr ihre Variationsbreite von  $\pm 5$  Größenordnungen. In Gebieten mit direkter Flussinfiltration liegen die Grundwassererneuerungszeiten im Bereich von wenigen Tagen. In ariden Zonen steigen die Erneuerungszeiten bis gegen Hundertausende von Jahren. In stagnierendem Porenwasser erreichen sie gar die Formationsalter der sedimentären Ablagerungen.

Jede auf Nachhaltigkeit ausgerichtete Grundwassernutzung muss sich an der typischen Zeitskala der Wassererneuerung orientieren, welche für jedes Grundwassersystem individuell zu bestimmen ist. Es gilt hierbei zu beachten, dass die Grundwassererneuerungszeit allgemein dem Schwerpunkt einer Altersverteilung entspricht, die sich durch Mittelung der Verweilzeiten aller jener Strömungswege ergibt, welche durch einen bestimmten Grundwasserbrunnen gefasst werden.

#### Nicht erfasste Wirklichkeit

Die Zeit, die zwischen der Grundwasserneubildung und dem Austritt aus dem Grundwasserleiter (Aquifer) verstreicht, wird als Grundwasseraufenthaltszeit bezeichnet. Um sie zu bestimmen werden meist nummerische Grundwassermodelle verwendet, welche das Strömungsfeld auf Grund von hydraulischen Randbedingungen berechnen.

Es ist jedoch prinzipiell schwierig, die relevanten Größen, welche die Grundwassererdynamik kontrollieren, mit Grundwasserströmungsmodellen zu identifizieren. Da die verfügbare Datenmenge zur Modelldefinition stets in krassem Gegensatz zum effektiv benötigten Informationsbedarf steht, lassen sich die realen Verhältnisse im Grundwasser im Modell faktisch nie physikalisch exakt nachbilden. Dies kann dazu führen, dass Grundwassermodelle zwar die hydraulischen Daten korrekt reproduzieren, gleichzeitig aber bezüglich der zugrunde liegenden Prozesse völlig an der Wirklichkeit vorbei zielen. So können sie z.B. aus fehlendem konzeptuellem Wissen heraus weder den typischen Erneuerungszeiten noch der Einmischung

von jungem und altem Grundwasser angemessen Rechnung tragen.

#### Tracermethoden als Ergänzung zu Strömungsquellen

Im Gegensatz zu Grundwassermodellen, welche sich auf hydraulische Parameter (z.B. Piezometerstände) stützen, eignen sich transiente Tracermethoden besonders gut zur Erfassung der Grundwasserneubildung, der mittleren Grundwasseraufenthaltszeiten und der Mischung verschiedener Grundwassertypen. Die Methoden vermögen auf Grund ihrer komplementären Empfindlichkeit die konzeptuellen Schwächen von Grundwassermodellen aufzudecken und zu beheben.

Um die Unsicherheiten von Grundwasserströmungsmodellen zu reduzieren, werden heute vermehrt (isotopen-)geochemische Methoden zur Grundwasserdatierung herangezogen. Diese beruhen auf der Messung verschiedener in der Umwelt und im Grundwasser auftretender Spurenstoffe. Eingesetzt werden meist konservative Stoffe, welche weder chemisch noch biologisch aktiv sind und deren Konzentrationen im