

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 94 (2002)
Heft: 3-4

Artikel: Sicherheitprobleme durch Bauwerkskolk
Autor: Herzog, Beatrice / Staubli, Richard
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939621>

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: 04.04.2025

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

Sicherheitsprobleme durch Bauwerkskolk

■ Beatrice Herzog, Richard Staubli

Einleitung

Der Verlust der Tragsicherheit durch Ausspülungen an der Foundation ist die häufigste Ursache für das Versagen von Bauwerken im Wasser. Das jüngste Beispiel ist die in der Nähe von Porto (Portugal) eingestürzte Strassenbrücke über den Douro, wo 70 Menschen ums Leben kamen. Auch in der Schweiz bestehen zahlreiche Bauwerke im Wasser, welche potenziell kolkgefährdet sind.

Die grösste Kolkentiefe wird bei Sturm oder Hochwasserabflüssen erreicht, wenn die Überwachung und die Eingriffsmöglichkeiten eingeschränkt sind.

Die theoretische Behandlung des Kolkes ist wegen des komplexen Naturprozesses, wie anschliessend gezeigt wird, nur annäherungsweise möglich. Trotzdem muss der Ingenieur Entscheide über die genügende oder mangelnde Sicherheit eines Bauwerkes fällen. Im Folgenden wird aufgezeigt, wie die Problematik angegangen werden kann.



Bild 1. Leonardo da Vinci: «Il tecnico idraulico tra sapere e saper fare» (Quelle: Leonardo e le vie d'acqua, G. Barbera, Florenz 1983).

Grundlagen

Definition

Kolk kann definiert werden als die örtlich begrenzte Ausspülung von Sohlenmaterial als Folge einer lokalen Änderung der Erosivkraft des Wassers. Meist werden Ausspülungen unmittelbar am Bauwerk darunter verstanden. Der Begriff umschliesst aber auch die Erosion von grösseren Flussabschnitten («degradation scour»).

Kolk ist nicht nur ein Phänomen der Geschiebe führenden Flüsse, sondern tritt auch in kohäsiven Seeböden auf, hervorge-

rufen durch Strömungen am Seegrund und Wellenschlag.

Kolktypen und Gesamtkolkentiefe

Allgemeiner Kolk (degradation scour d_d)
Hierbei handelt es sich um eine Erscheinung, die unabhängig vom betrachteten Bauwerk auftritt, z.B. als Folge von Änderungen in der Gerinnegeometrie oder der Geschiebezufuhr über die Zeit. So sind z.B. grossräumige Bewegungstendenzen der Gewässersohle häufig und in die Beurteilung des Gesamtkolkes mit einzubeziehen.

Kolk durch Sohlenformen (d_{sp})

Die Sohle eines Flusses ist im Querprofil nur selten eine Gerade und ändert ihre Form über die Zeit. Dies muss bei der Abschätzung des Gesamtkolkes berücksichtigt werden. Dabei sind stationäre Sohlenformen wie Kurvenkolk von instationären wie Kiesbänken oder Dünen zu unterscheiden.

Einengungskolk (contraction scour d_{sc})

Durch eine Querschnittsverengung wird die Geschwindigkeit lokal erhöht und die Sohle senkt sich auf der Länge der Einengung ab. Dieses Phänomen kann rechnerisch recht gut erfasst werden.

Lokaler Kolk (local scour d_{sl})

Hierbei handelt es sich z.B. um Pfeilerkolk, Bühnenkolk o.Ä., also Kolkformen, die stark von der Form des Bauteils und vom Anströmwinkel abhängig sind (Bild 1). Zu deren Berechnung existiert eine Vielzahl von Formeln, die meist im Labor entwickelt wurden. Auch Ausspülungen in Seeböden können dazu gezählt werden.

Gesamtkolkentiefe d_s

Die Tiefe des zu erwartenden Kolkes ergibt sich aus allen genannten Einflüssen, die am betrachteten Bauteil (überlappend) auftreten. Die Gesamtkolkentiefe beträgt damit

$$d_s = d_d + d_{sp} + d_{sc} + d_{sl}$$

Kolkentwicklung

Die zeitliche Entwicklung von Kolk unterliegt komplexen Einflüssen. Aus Sicht der Praxis ist entscheidend, dass bei hydrologischen Verhältnissen wie sie in der Schweiz vorkommen, die notwendige Ereignisdauer zur maximalen Kolkentwicklung in der Regel gegeben ist.

Messung von Kolkiefen

An zahlreichen Brückenpfeilern, Ufermauern und Tosbecken wurden in den letzten Jahren von der Verfasserin Kolkmessungen durchgeführt. Die Feldmessungen geben ein räumliches Bild der bei Mittelwasser erreichten Kolkiefen und -formen.

Die Messungen werden in der Regel mit Ultraschall vom Boot aus durchgeführt. Die Lagemessung erfolgt mit Theodolit oder mit einem Messseil.

Bei geringen Wassertiefen sind auch terrestrische Aufnahmen möglich.

Kolkmessungen während Hochwasser

Aus Sicht der Sicherheitsbeurteilung interessiert vor allem die maximal erreichbare Kolkentiefe, also diejenige, welche während Sturm oder Hochwasser auftritt. Die während des Ereignisses erreichte Tiefe ist nachträglich kaum zu erfassen, da das Kolkloch bei Abklingen des Hochwasserabflusses teilweise wieder verfüllt wird.

Die Messung von Kolk während Hochwasserabflüssen auf Flüssen ist in der Praxis schwierig zu bewerkstelligen. Das Befahren des Gewässers bei Hochwasser birgt Gefahren für die eingesetzte Equipe. Ferner sind die Messwerte meist weniger zuverlässig und weniger genau als bei Niederwasser. So sind in der Fachwelt kaum Kolkmessungen bei Hochwasserabflüssen dokumentiert.

Nachfolgend sind die Resultate zweier Messungen dargestellt, welche beide während Hochwasser durchgeführt wurden (Bild 2). Gut sichtbar ist die Änderung der Kolkentiefe und auch der Kolkform unter Einfluss des Hochwassers.

Folgen von Kolk

In der Schweiz bestehen heute noch zahlreiche Brückenpfeiler mit Flachfundationen wie auch ungezählte Laufmeter Längsverbauungen an Seen und Fliessgewässern, welche ungenügend tief fundiert oder durch grosse Sohlenschwankungen kolkgefährdet sind. Viele Mittellandflüsse zeigen heute ausserdem eine Tendenz zur Eintiefung, was Auswirkungen auf Brücken und Uferverbauungen hat. Seit den 70er-Jahren werden Bauwerke im Wasser meist auf Pfählen fundiert. Die Problematik ist daher bei neueren Bauten geringer.

Bei flach fundierten Bauwerken führt eine Unterkolkung zu einem direkten Tragsicherheitsverlust. Ausserdem sind Folge-

schäden wie Risse, Setzungen, Ausspülung der Fugen usw. häufig.

Ist das Bauwerk auf Pfählen fundiert, so hat der Kolk zwei Wirkungen: Einerseits wird die Mantelfläche für die Lastabtragung reduziert, andererseits können die Pfähle nur noch vermindert Horizontalkräfte aufnehmen. Letzteres kann zu einem Ausknicken führen. Bei Holzpfählen besteht auch die Gefahr der Abrasion des Pfahlkopfes. Bei Ufermauern kommt es oft zu Setzungen hinter der Mauer.

Bauwerke mit Caissonfundation sind im Allgemeinen gut geschützt. Vermindert sich jedoch die Einbindetiefe erheblich, verhalten sie sich wie Flachfundationen.

Einerseits stellt Kolk also selbst ein Sicherheitsproblem dar, andererseits können durch Kolk weitere Schäden am Bauteil verursacht oder deren Fortschritt beschleunigt werden.

Vorhersage von örtlichem Kolk

Berechnungsformeln aus der Kolktheorie

In der zahlreich vorhandenen Literatur werden ca. 35 unterschiedliche Kolkformeln für die Vorhersage des örtlichen Kolks vorgeschlagen. Die verwendeten Parameter sind im Allgemeinen dieselben, und zahlreiche Formeln folgen der Form

Kolktiefe am Pfeiler =

$$k \cdot \left(\frac{b}{y}\right)^n \cdot y \quad \text{resp.} \quad k \cdot \left(\frac{b}{y}\right)^n \cdot y \cdot F^m$$

b = Pfeilerbreite, y = Wassertiefe, k = Faktor für Pfeilergeometrie und Anströmwinkel usw., F = Froude-Zahl

Einige der häufig verwendeten (und z.T. offiziell empfohlenen) Kolkformeln sind lediglich die Umhüllende anderer anerkannter Formeln und führen auf Kolkformen, die für die Praxis zu konservativ sind. So schreibt Hamill [5]: «if they predicted the true state of affairs, there would be very few bridges still standing in Arizona...». Übertragen auf unsere Verhältnisse kann gesagt werden: Würde man sich nur auf Kolkformeln abstützen, würden zahlreiche nicht gefährdete Bauwerke unnötig trockengelegt und saniert, andernorts hingegen Gefährdungen übersehen.

Vergleich mit effektiv gemessenen Kolkformen

Es wurden in mehreren Mittellandflüssen Feldmessungen von Kolkformen mit den theoretischen Kolkformen verglichen. Bild 3 zeigt die Ergebnisse für einen Brückenpfeiler in der Reuss.

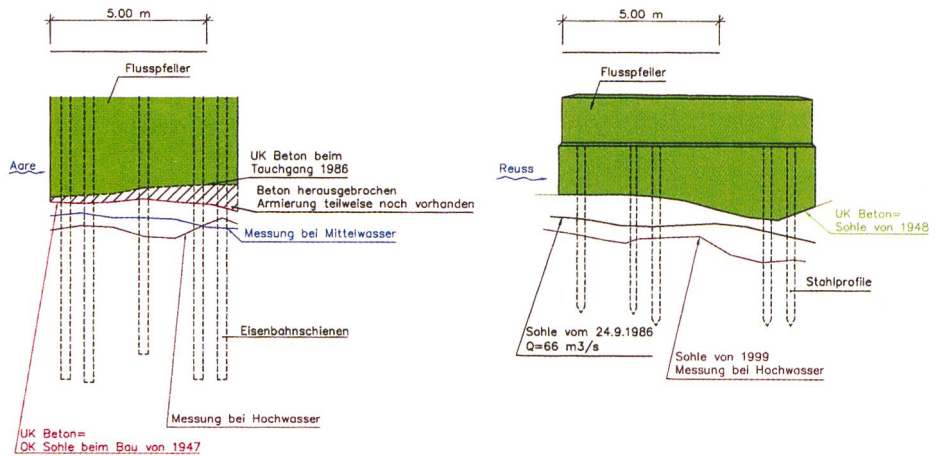


Bild 2. Entwicklung der Flusssohle über längere Zeit. Die Messungen 1999 wurden während Hochwasserabflüssen rund um die Flusspfeiler durchgeführt (Aare im Vogelsang, Reuss bei Gnadenthal).

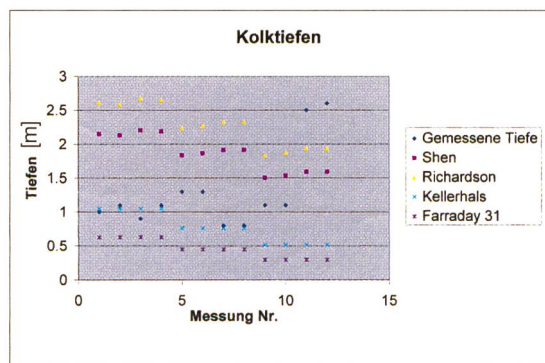


Bild 3. Vergleich von berechneten und effektiven Kolkformen für verschiedene Abflüsse (zwei Pfeiler).



Bild 4. Bei einer Tauchinspektion können Unterkolkung wie auch Schäden am Bauteil festgestellt werden: freigelegte Armierung im Kolkloch einer nur siebenjährigen Brücke im Rhein.

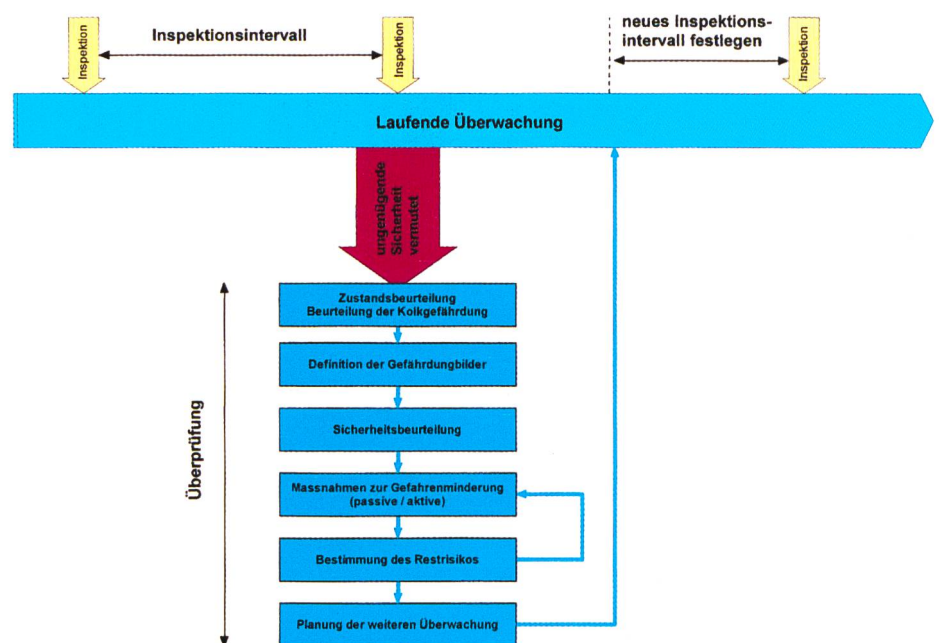


Bild 5. Überwachung und Überprüfung.

Es ist ersichtlich, dass die Feldmessungen erheblich von den Resultaten der verschiedenen Formeln abweichen. In Beispiel von Bild 3 wird die Kolktiefe bei Mittelwasser bei beiden Pfeilern tendenziell über-

schätzt, bei Hochwasser für einen Pfeiler deutlich unterschätzt (Messungen 11 und 12). Die Abweichungen sind jedoch nicht systematisch, sondern für jedes Bauwerk je nach lokalen Einflüssen verschieden.

Probleme der Praxis

Die Berechnung der wahrscheinlichen Kolk-tiefe und damit auch die Dimensionierung von Schutzmassnahmen bereitet in der Praxis ei-nige Probleme:

- Die meisten Formeln wurden im Labor ent-wickelt. Oft ist der Gültigkeitsbereich be-züglich Wassertiefe und Bauwerksab-messungen, vor allem aber bezüglich des Sohlenmaterials, unbekannt oder völlig ortsfremd. Es können ausserdem signifi-kante Massstabeffekte nachgewiesen werden [6]. Die Übertragbarkeit der For-meln ist stark eingeschränkt.
- Die Resultate verschiedener Kolkformeln unterscheiden sich um bis zu 500%. Es ist schwierig, die erwartete Kolk-tiefe ohne Messungen zuverlässig zu prognostizieren.
- Die konservative Abschätzung der Kolk-tiefe durch eine Umhüllende verschiedener Formeln ist fallweise für den Neubau von Bauteilen im Wasser durchaus geeignet, da eine tiefere Foundation einen Neubau oft nicht wesentlich verteuert. Für die Sicher-heitsbeurteilung bestehender Bauwerke gemäss SIA 469 hingegen ist sie vollkom-men ungeeignet.
- Für die Blockdimensionierung zu Kolk-schutzzwecken stehen zwar zahlreiche theoretische Ansätze zur Verfügung, hinge-gen sind die effektiven, lokal wirkenden Kräfte weitgehend unbekannt und können im Feld nicht gemessen werden. Dies be-trifft z.B. Parameter wie die lokal vorherr-schenden Geschwindigkeiten, aber auch die Druckverteilung (Turbulenzen) oder die lokale Konzentration der wirkenden Sus-pension.
- Lokale Gegebenheiten wie seitliche Zu-flüsse, exakte Pfeilergeometrie (Caisson, Spundwände), das Verhältnis von Pfeiler-breite und Kolk-schutz zur Flussbettbreite usw. bleiben trotz grossem Einfluss auf die Kolk-tiefe in den meisten Formeln unberück-sichtigt.

Folgerungen

Die Prognose der maximalen Kolk-tiefe, aber auch die Dimensionierung der Massnahmen zur Verhinderung von Kolk (z.B. Blockwürfe) ist mittels theoretischer Berechnung nur an-näherungsweise möglich. Dies kann sowohl zu Über- wie zu Unterdimensionierungen führen. Im Umgang mit der Kolkgefährdung sind daher ergänzende Ansätze notwendig, die der spezifischen Situation jedes Bauwer-kes gerecht werden.

Risikomanagement bei kolkgefährdeten Bauwerken

Der Werkeigentümer ist für die Sicherheit, aber auch die Wirtschaftlichkeit seiner Bau-

werke verantwortlich. Dies ruft nach einer adäquaten Strategie, die das Risiko richtig einschätzt, aber nicht für jedes Bauwerk blindlings den «worst-case» (die Umhüllende) annimmt. Die Anwendung von Kolkformeln hilft dem Ingenieur, wie oben beschrieben, dabei nur teilweise weiter. Eine Strategie, die mehr verspricht, setzt auf Überwachung und Überprüfung gemäss Norm SIA 469. So wer-den beispielsweise bei den SBB die kolkge-fährdeten Objekte periodisch durch Spezia-listen überprüft.

Überwachung und Überprüfung

Das wichtigste Element des Risikomanage-ments ist die Überwachungsplanung. Die Überwachung beinhaltet die laufende Beob-achtung, z.B. durch eigenes Personal (Stre-ckenunterhalt, Strassenunterhalt). Weiter ge-hören periodische oder fallweise angeord-nete Inspektionen und Kontrollmessungen dazu. Dies sind bei kolkgefährdeten Bauwer-ken die Überwachung der Kolkentwicklung durch Messungen im Feld sowie die Untersu-chung des Zustands mit Tauchern oder durch Trockenlegung (Bild 4).

Eine vollständige Überprüfung ge-mäss Norm SIA 469 wird dann erforderlich, wenn aufgrund der Überwachung eine unge-nügende Sicherheit vermutet wird. Im Rah-men der Überprüfung wird eine umfassende Sicherheitsbeurteilung durchgeführt. Diese basiert auf den Ergebnissen der Inspektio-nen, einer Zustandsbeurteilung sowie den verschiedenen Anforderungen an das Bau-werk (Tragsicherheit, Bemessungshochwas-ser, Kolk-sicherheit usw.). Der Ablauf von Überwachung und Überprüfung ist in Bild 5 dargestellt.

Wenn aus der Überprüfung hervor-geht, dass das Restrisiko zurzeit noch akzep-tabel ist und eine weitere Überwachung des Bauwerkes genügt, muss der Werkeigentü-mer festlegen, wie häufig und nach welchen Ereignissen die weiteren Inspektionen und Kontrollmessungen durchgeführt werden müssen. Wird die erforderliche Sicherheit nicht mehr erreicht, sind Massnahmen zur Risikominderung notwendig. Dies können passive Massnahmen wie eine permanente Überwachung während Hochwasserabflüs-sen und temporäre Sperrungen der Anlage sein. Wo solche Massnahmen nicht durch-führbar sind oder nicht genügen, wird eine In-standsetzung oder ein Neubau notwendig (aktive Massnahmen).

Wahl des Berechnungsansatzes für Prognosen

Ein wichtiger Teil einer Sicherheitsbeurteilung ist die Abschätzung der maximal erwarteten Kolk-tiefe (Lastfall). Es wurde oben beschrie-

ben, dass die verschiedenen Berechnungs-ansätze sehr unterschiedliche Resultate ergeben. Umso wichtiger ist es, die objekt-spezifische Situation im Feld in eine Gesamt-beurteilung mit einzubeziehen und die Be-rechnungen mit Feldmessungen am betrof-fenen Bauteil zu eichen. Mit Hilfe von räumlichen Messungen bei Hoch-, Mittel- und Niederwasser lässt sich der spezifische örtliche Verlauf der Kolkentwicklung eingren-zen, und die Berechnungen können verifiziert und eingestuft werden.

Insbesondere sollten bauwerksspe-zifische Eigenheiten wie die lokale Flussmor-phologie, die Form des Bauteiles und der An-strömwinkel in die Wahl des Ansatzes mit ein-bezogen werden. So kann z.B. eine von der Pfeilerachse abweichende Strömungsrich-tung oder ein seitlicher Zufluss die Situation erfahrungsgemäss vollkommen verändern und die Kolkprognose stark erschweren. In solchen Fällen können die theoretischen Kolk-tiefen auch weit übertroffen werden.

Kolk-schutz an bestehenden Bauwerken

Dimensionierungsgrundlagen

Für die Ausführung von baulichen Massnah-men müssen verschiedene Grössen wie Pfahl-längen, Tiefe der Unterfangung, Block-grössen sowie weitere Bauteile wie Verbind-ungen, Stahlträger usw. dimensioniert wer-den. Als Grundlagen für die Dimensionierung sollten mindestens beschafft werden:

- Pläne des Bauwerkes, insbesondere der Foundation
- Definition der Nutzungszustände resp. Lastannahmen
- Hochwassermengen, Abflusstiefen und Fliessgeschwindigkeiten
- Abschätzung der maximalen Sohlschwan-kungen während Hochwasser
- Sturmexposition auf Seen
- Kolk-messungen in situ
- Wo möglich grossräumige Messungen der Sohlenlage über einen längeren Zeitraum zur Erkennung von Entwicklungstenden-zen
- Unterwasserkontrolle durch Taucher

Für die Berechnung der lokal wirken-den Kräfte des Wassers auf den Kolk-schutz sollen begründbare Annahmen getroffen und wo möglich mit Messungen belegt werden.

Begrenzen der Kolk-tiefe

Durch Blockwürfe kann die Kolk-tiefe be-grenzt werden. In Seen sind solche Massnah-men oft genügend. In grösseren Flüssen wer-den Blockwürfe häufig durch Wegrollen oder Eingraben der Blöcke innert weniger Jahre



Bild 6. Entscheidend für die Wirkung des Kolksschutzes ist die Qualität der Ausführung. Die Blöcke werden unter Wasser einzeln versetzt (Aarebrücke bei Koblenz).



Bild 7. Rammen von Eisenbahnschienen in der Strömung (Thurbrücke bei Müllheim).

wieder zerstört. Ein Grund dafür kann in der Überdimensionierung des Blockwurfes liegen, wenn der Abflussquerschnitt signifikant eingengt wird. Andere Schwachpunkte sind Filterkriterien und Böschungswinkel. Entscheidend ist auch die konstruktive Ausbildung des Blockwurfes (Bild 6). In den letzten Jahren wurden an verschiedenen Brückenpfeilern in Mittellandflüssen speziell gesicherte Blockwürfe eingebracht. Die Sicherung erfolgte mit Stahlprofilen. Zudem wurden nicht einheitlich grosse Blöcke verwendet, sondern eine abgestufte Mischung mit maximaler innerer Abstützung.

Sowohl im Rhein bei Zurzach wie auch in der Aare bei Koblenz und in der Reuss bei Dietwil hatten solche Kolksschutzkonstruktionen beim Hochwasser im Mai 1999 bereits die erste «Wasserprobe» zu überstehen. Nachkontrollen mit Echolot und Tauchern zeigten, dass mit dieser Bauweise eine gute Stabilität erreicht wird, ohne dass der Pfeiler beim Bau trockengelegt werden muss. Inzwischen wurden weitere Blockwürfe dieser Art ausgeführt (Bild 7).

Unbefriedigende Resultate zeigen hingegen oft Befestigungen mit betongefüllten Matten, wie sie in Nordamerika häufig zur Anwendung kommen. Auch die Erweiterung der Fundamentplatten oder Fallböden aus Beton lösen das Problem nicht, da deren Rauigkeit zu klein ist und die Unterspülungen nur verschoben werden.

Vergrossern der Foundationstiefe

Durch eine genügend tiefe Einbindung des Bauteiles wird die mutmassliche Kolkentiefe abgefangen. Der Kolkentwicklung kann dann freier Lauf gelassen werden. Die Unterfangung grösserer Bauteile erfordert eine Pfahlfundation. Eine solche wurde z.B. in der Reuss an einer bestehenden Brücke ausge-

führt, wo der unterspülte Mittelpfeiler einer 90-jährigen Brücke auf vier Mikropfähle abgestützt wurde (Bild 8).

Neubauten

Bei Neubauten ist die Vorhersage der Kolkentiefe weniger problematisch, da die Mehrkosten für entsprechend tiefere Fundationen nicht stark ins Gewicht fallen. Kolk ist als wichtiges Gefährdungsbild in die Dimensionierung von Neubauten mit einzubeziehen. Flachfundationen in Geschiebe führenden Flüssen und exponierten Seelagen sollten der Vergangenheit angehören. Wichtige Entwurfsgrössen wie Anströmwinkel, Pfeilerform usw. sollten im Hinblick auf die Verminderung der Kolkgefährdung gewählt werden.

Schlussfolgerungen

Die Kolkproblematik ist umfassend und betrifft Uferverbauungen an Seen und Flüssen ebenso wie Brückenpfeiler oder Querwerke. Grossräumige Entwicklungen der Gewässer- und lokale Effekte addieren sich und müssen berücksichtigt werden.

Die theoretische Behandlung des Kolkes ist aus Sicht der Praxis für die Sicherheitsbeurteilung bestehender Bauten ungenügend. Abhilfe für jedes Bauwerk schafft eine massgeschneiderte Strategie aus lau-

fender Überwachung, periodischer Überprüfung mit umfassender Sicherheitsbeurteilung sowie passiven und aktiven Schutzmassnahmen. Bauwerkskataster und eine vorausschauende Überwachungsplanung unterstützen den Werkeigentümer beim Risikomanagement und der Werterhaltung.

Bei der Planung von Neubauten im Wasser ist Kolk ein wichtiges Gefährdungsbild.

Literatur

- [1] Bundesamt für Strassen, Bundesamt für Verkehr, Bundesamt für Wasserwirtschaft, SBB: Sicherheit von Bauwerken im Wasser, Bern 1998, erhältlich bei der EDMZ.
- [2] R. V. Farraday, F. G. Charlton: Hydraulic Factors in Bridge Design, Wallingford 1983.
- [3] H. N. C. Breusers, A. J. Raudkivi: Scouring, IAHR 1991.
- [4] ASCE Standard: Flood resistant Design and Construction, Virginia 2000.
- [5] L. Hamill: Bridge Hydraulics, London 1999.
- [6] G. Oliveto, W. H. Hager: Pfeiler- und Widerlagerkolke an Brücken, wsl 1/2-2001.
- [7] Div. Projektauswertungen, Staubli, Kurath & Partner AG, Zürich/Zug/Davos/Bern 1991–2002.
- [8] Norm SIA 469, Erhaltung von Bauwerken.



Bild 8. Vom Ponton aus werden in der Strömung Mikropfähle gebohrt (Brücke über die Reuss bei Gnadenthal).

Anschrift der Verfasser

Beatrice Herzog, dipl. Ing. ETH/SIA, Richard Staubli, dipl. Ing. ETH/SIA, Staubli, Kurath und Partner AG, Bachmattstrasse 53, CH-8048 Zürich.