

# Kolkproblematik in aufgeweiteten Flussabschnitten

Christian Marti, Gian Reto Bezzola, Hans Erwin Minor

## Kurzfassung

Zur Wahrung des Hochwasserschutzes und aus ökologischen Gründen werden heute kanalisierte Flussstrecken abschnittsweise wieder aufgeweitet. Bei genügend grosser Breite kann dabei ein verzweigtes Gerinne mit entsprechend tiefen lokalen Kolken entstehen. Seitliche Ufersicherungen müssen dann auf diese grossen Kolk-tiefen ausgelegt werden. Modellversuche an der ETH-Zürich zeigten, dass entlang Ufersicherungen mit Kolk-tiefen gerechnet werden muss, die maximal das 6-7fache der mittleren Abflusstiefe betragen. Auf der Basis der Versuchsergebnisse und eines Vergleichs mit bekannten Berechnungsansätzen werden Empfehlungen für die praktische Abschätzung von Kolk-tiefen in verzweigten Gerinnen abgeleitet.

## Einleitung

Im Sinne eines nachhaltigen Hochwasserschutzes besteht heute vermehrt die Tendenz, den Fliessgewässern wieder einen Teil ihres früheren Raumes zurückzugeben. Ziel ist die Schaffung oder Erhaltung von grosszügigen Abflusskorridoren. Lokale Flussaufweitungen dienen darüber hinaus auch als Geschiebeablagerungsstrecken und zur Reduktion fortschreitender Sohlenerosion.

Bei den in alpinen Gewässern üblichen Gefällen und dem vorhandenen Sohlenmaterial, bilden sich in aufgeweiteten Flussabschnitten alternierende Kiesbänke oder bei noch grösserer Breite ein verzweigtes Gerinnemuster. Dies führt zu einer Zunahme der Strukturvielfalt sowie zu stark variablen Strömungsverhältnissen, so dass Aufweitungen auch aus ökologischer Sicht sehr interessant sind (Abb. 1).



Abb. 1: Aufgeweitete Strecke an der Thur bei Niederneuenform, Kanton TG & ZH, Schweiz (Foto: C. Hermann, BHC, Frauenfeld).

Bei engen Platzverhältnissen wird in Aufweitungsstrecken eine stabile seitliche Begrenzung notwendig. Diese kann aus einem durchgehenden Längsverbau oder aus Bühnen bestehen. Im Vergleich zu einer Kanalstrecke müssen solche Uferschutzmassnahmen in einer Aufweitung aber einiges tiefer fundiert werden. Massgebend werden die maximalen Kolk-tiefen, die in verzweigten Flüssen entstehen können.

Nachfolgend werden verschiedene Ansätze zur Bestimmung der maximalen Kolk-tiefe in verzweigten Gerinnen vorgestellt. Diese werden mit experimentellen Daten verglichen und bezüglich ihrer Einsetzbarkeit für die praktische Dimensionierung beurteilt.

### Bestehende Ansätze

Zur Bemessung der Fundationstiefe von Brückenpfeilern in verzweigten Flüssen und zur Bestimmung der Quertiefe von Gas- oder Ölleitungen untersuchte MOSLEY (1982) am Ohau River in Neuseeland Vereinigungskolke. Er fand, dass die Kolk-wassertiefe  $h_K$  bei der Vereinigung zweier Gerinnearme die gemittelte Wassertiefe  $\bar{h}$  der beiden Zuflussarme um den Faktor 3 bis 4 übersteigt. Weiter gibt er eine Beziehung für die Kolkwassertiefe in Funktion der Abflüsse der beiden Gerinnearme an:

$$h_K = 0.531 \cdot \bar{Q}^{0.343} \quad \text{in [m]} \quad \text{mit: } \bar{Q} = Q_L + Q_R \quad \text{in [m}^3/\text{s]} \quad (1)$$

ASHMORE und PARKER (1983) verglichen am Sunwapta River in Kanada erhobene Messdaten mit Daten aus hydraulischen Modellversuchen. In die Auswertungen wurden weiter auch die Daten der oben zitierten Arbeit von MOSLEY (1982) sowie dessen Daten aus Modellversuchen mit kohäsivem Sand einbezogen. ASHMORE und PARKER konnten zwischen den gemessenen Kolkwassertiefen  $h_K$  und globalen Parametern, wie dem totalen Abfluss  $Q$ , der Flussbettbreite  $B_F$  oder dem mittlerem Sohlgefälle  $J$  keine relevanten Korrelationen finden. Sie geben aber die relative Kolk-tiefe  $h_K/\bar{h}$  als Funktion des Winkels  $\gamma$  an, welchen die beiden Zuflussarme einschliessen:

$$\frac{h_K}{\bar{h}} = 2.235 + 0.0308 \cdot \gamma \quad \text{mit } \bar{h} = (h_L + h_R)/2 \quad \text{und } \gamma \text{ in } [^\circ] \quad (2)$$

Der Ansatz ist nur gültig, wenn die Abflussmengen in den beiden Zuflussarmen nicht zu stark voneinander abweichen. Gemäss den beiden Autoren muss dazu  $0.25 < 2 \cdot |Q_L - Q_R|/\bar{Q} < 0.75$  erfüllt sein. Von HOFFMANS und VERHEIJ (1997) wird für Vereinigungskolke mit

$$\frac{h_K}{\bar{h}} = c + 0.037 \cdot \gamma \quad (3)$$

ein ähnlicher Ansatz vorgeschlagen. Der Wert für den Parameter  $c$  ist dabei vom Material der Flusssohle abhängig und liegt zwischen 1.29 für Feinsand und 2.24 für groben Kies.

ZARN (1997) leitete aus hydraulischen Modellversuchen zwei Ansätze zur Bestimmung der mittleren Transportkapazität in Gerinnen mit grosser Breite her. Parallel dazu wurden die Versuche aber auch hinsichtlich Kolk-tiefen ausgewertet. Allerdings wurden nicht speziell Vereinigungskolke untersucht. ZARN interpretierte allgemein markante Eintiefungen gegenüber der mittleren Sohlenlage als Kolke. So wird dann

in seinem Ansatz auch nicht mehr eine Kolkwassertiefe  $h_K$  angegeben, sondern die bezüglich der mittleren Sohlenlage definierte Kolktiefe  $t_K$  (Abb. 4).

Nach ZARN ist die mittlere Kolktiefe  $t_{K\text{Mittel}}$  von der räumlich gemittelten Abflusstiefe  $h$ , von der Flussbettbreite  $B_F$  und vom massgebenden Korndurchmesser  $d_m$  des Sohlenmaterials abhängig.

$$t_{K\text{Mittel}} = -2.69 \cdot h \cdot e^{\left(-19.6/W\right)} \quad \text{mit:} \quad W = \left(\frac{B_F}{h}\right) \cdot \left(\frac{d_m}{h}\right)^{0.3} \quad (3)$$

Für die maximalen Kolkiefen, die sich in der Regel ergeben, wenn abflussreiche Teilgerinne steil auf eine harte Uferverbauung auftreffen, fand ZARN die Beziehung:

$$t_{K\text{Max}} = -6.07 \cdot h \cdot e^{\left(-17.6/W\right)} \quad (4)$$

HUNZINGER (1998), welcher mittels ähnlicher Versuche Dimensionierungskriterien für lokale Flussaufweitungen ableitete, bestätigt im Prinzip die Ansätze von ZARN. Zusätzlich untersuchte HUNZINGER die Verhältnisse bei Bühnen als Alternative zum Uferschutz mittels Längsverbau. Dabei stellte er fest, dass bei den Bühnenköpfen die maximalen Kolkiefen mit der Formel von ZARN unterschätzt werden und gibt für diesen Fall die modifizierte Beziehung an:

$$t_{K\text{Bu}} = -9.34 \cdot h \cdot e^{\left(-23.8/W\right)} \quad (5)$$

### Eigene Experimente und Auswertmethode

Die nachfolgend beschriebenen Versuchsdaten wurden im Rahmen der Studie "Morphological dynamics in braided rivers" erhoben. Analog zu den Experimenten von ZARN ist das primäre Ziel dieser Studie die Untersuchung des Geschiebetransports in leicht verzweigten Gerinnen. Im Vergleich zu ZARN wurden jedoch steilere Gefällsverhältnisse (1.5 - 2.5 %) und eine dafür typische, breitere Kornverteilung (im Modell 0.2 – 22 mm) untersucht. Zudem wurden stark variable Abflüsse und Geschiebezufuhrraten berücksichtigt. Ein Eindruck von der eigens für die Versuche erstellten 28.5 m langen und 3.2 m breiten Rinne vermittelt Abbildung 2.



Abb. 2: Übersicht der Laborrinne während eines Versuches mit stark verzweigter Morphologie.

Die Versuchsalage sowie das Konzept der Versuche sind detaillierter in MARTI (2002) resp. MARTI und BEZZOLA (2003) beschrieben. An dieser Stelle wird daher nur auf die Methodik zur Bestimmung der für die Kolkiefen relevanten Parameter eingegangen.

Ein Versuch für gegebene Bedingungen hinsichtlich Durchfluss  $Q$ , Geschiebezugabe  $Q_{b\_zu}$  und initialem Sohlengefälle  $J_{in}$  musste wegen der Geschiebebewirtschaftung (füllen der Beschickungsmaschine, leeren des Geschiebesammelkorbes) in mehrere Sequenzen unterteilt werden. Zwischen den einzelnen Versuchssequenzen wurde die Sohlentopographie im trockenen Zustand vermessen. Dazu kamen Laserdistanzmesser zum Einsatz, welche an einem automatischen XYZ-Positioniersystem angebracht sind. Bei einem Messraster von 10 cm in Rinnenlängsrichtung und 2 cm in Querrichtung resultiert eine detaillierte Aufnahme der Sohlentopographie (Abb. 3a). Mit zusätzlich angebrachten Ultraschalldistanzmessern konnte bei laufendem Versuch auch die Wasserspiegellage erfasst werden, wobei der Laser gleichzeitig die Sohle detektierte. Aus der Differenz zwischen der Wasserspiegel- und der Sohlenlage liessen sich die lokalen Abflusstiefen bestimmen (Abb. 3b).

Das Lasersignal wurde auf Grund der Brechung an der Wasseroberfläche verfälscht und musste daher korrigiert werden. Lokal verfälschten starke Wellen und intensive Trübung das Lasersignal zusätzlich. Deshalb wurde die Messung unmittelbar nach dem Beginn einer Versuchssequenz gestartet. Somit konnten die Abflusstiefen auch aus der Differenz zwischen der gemessenen Wasserspiegel- und der vorgängig im trockenen Zustand erfassten Sohlenlage bestimmt werden (Abb. 3c).

Ein Vergleich dieser beiden Messmethoden für die Sohlenlage und den daraus bestimmten Abflusstiefen zeigte, dass die räumlich gemittelten Werte gut übereinstimmen. Durch Ausreisser des Lasersignals können lokal allerdings grössere Abweichungen zwischen den beiden Messungen entstehen (Abb. 4). Während die mittleren Abflusstiefen auf der Auswertung der Messungen bei laufendem Versuch basieren, wurden die lokalen Kolk- und Wassertiefen hingegen aus den Messungen der Sohlenlage im trockenen Zustand beziehungsweise als Differenz aus dieser und der nachfolgend erhobenen Wasserspiegellage ermittelt.

Die Bestimmung der Kolkiefen  $t_K$  erfolgte nach dem gleichen Prinzip wie bei ZARN (1997). Aus der detaillierten Sohlenvermessung wurde profilweise – also alle 10 cm – die mittlere Sohlenhöhe berechnet und mittels linearer Regression durch diese Punkte die mittlere Sohlenlage im Versuchsgerinne bestimmt. Wiederum profilweise wurde nun jeweils die grösste negative Abweichung zu dieser mittleren Sohlenlage ermittelt. Die von ZARN definierte mittlere Kolkiefe entspricht dem arithmetischen Mittel dieser profilweise bestimmten grössten Abweichungen. Die maximale Kolkiefe hingegen entspricht der maximalen Abweichung aus allen Querprofilen.

Aus der hier beschriebenen Untersuchung werden insgesamt 7 Versuche bei stationären Abflüssen und Geschiebezugaben in die Auswertung einbezogen. Davon wurden 6 Versuche bei einer Flussbettbreite von  $B_F = 3.0 \text{ m}$  und ein Kontrastversuch bei einer Breite  $B_F = 0.3 \text{ m}$  durchgeführt. Nach Erreichen eines Gleichgewichtszustandes im Laborgerinne, wurde ein Versuch noch zwischen 24 und 129 Stunden weiter betrieben, was 2 bis 13 Versuchssequenzen entsprach. Für die Auswertung wurden nur die Messdaten dieser Versuchssequenzen berücksichtigt. Die Messresultate der einzelnen Sequenzen wurden für den jeweiligen Versuch zu einem Datensatz zusam-

mengefasst. Für mittlere Werte wurde dabei jeweils das arithmetische Mittel gebildet, die Maxima hingegen entsprechen jeweils dem absolut grössten Wert.

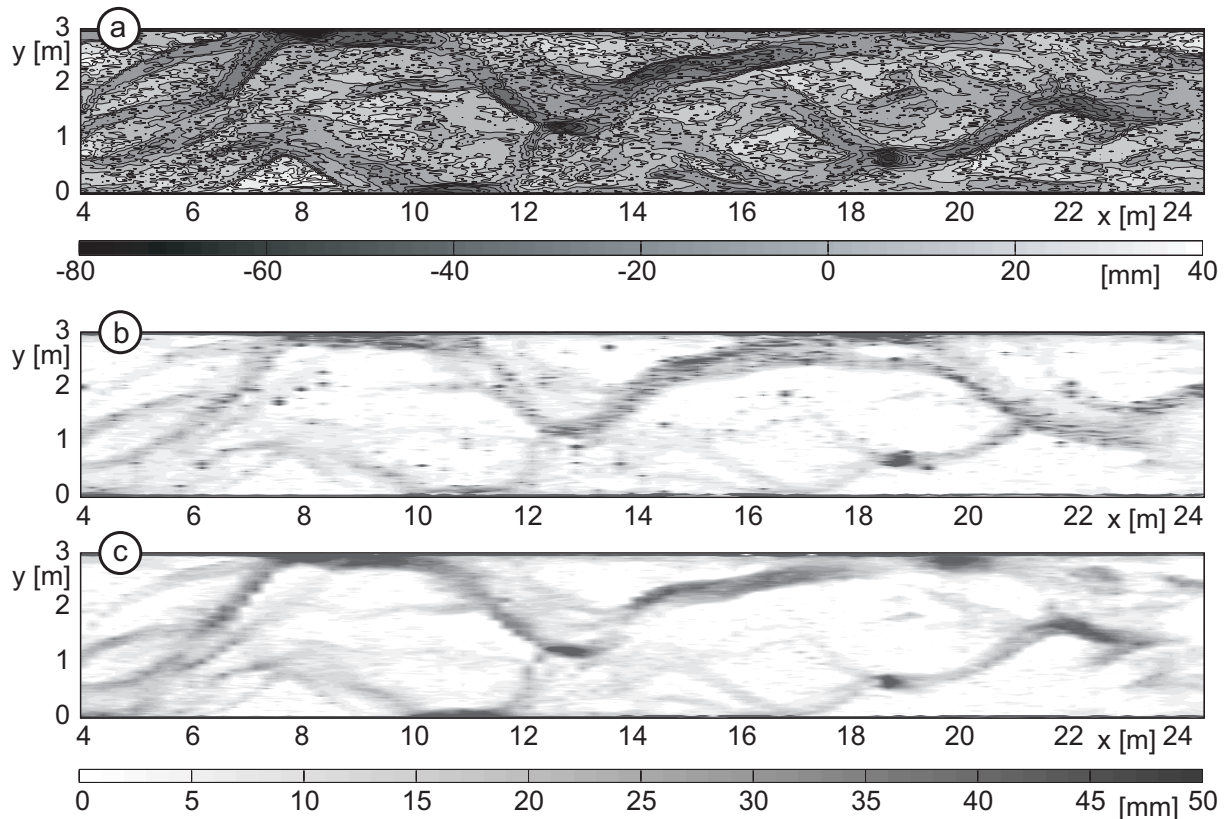


Abb. 3: a) Höhendifferenzen zur mittleren Sohlenlage im trockenen Zustand, gemessen vor der Versuchssequenz S4-1/12.  
 b) Wassertiefen zu Beginn der Versuchssequenz S4-1/12, bestimmt aus der Wasserspiegelmessung mittels Echolot und der gleichzeitig mit dem Laser durch den Abfluss hindurch detektierten Sohle.  
 c) Wassertiefen, berechnet als Differenz aus der Wasserspiegellage und der vorgängig im trockenen Zustand vermessenen Sohle.

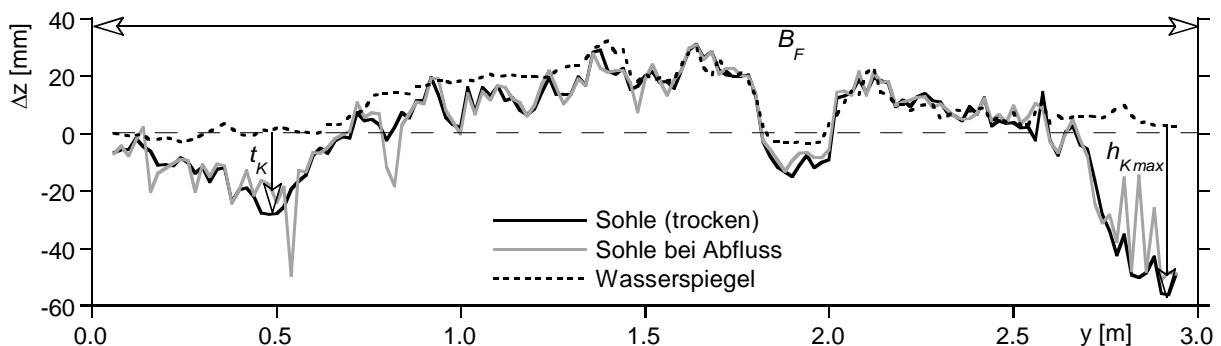


Abb. 4: Vergleich zwischen der vor der Versuchssequenz S4-1/12 im trockenen Zustand mit dem Laser gemessenen Sohle und der durch den Abfluss hindurch aufgenommenen Sohle während des Versuches im Querprofil  $x = 9.4$  m. Eingezeichnet ist auch die gleichzeitig mit dem Echolot gemessene Wasserspiegellage sowie die mittlere Sohlenlage und ausgewählte Kolkiefenparameter.

Zusätzlich werden auch Resultate aus 9 Versuchen mit instationären Abflüssen und Geschiebezufuhrdaten vorgestellt. Ausgewertet wurden dabei aber lediglich maximale Kolk- und Abflusstiefen, die beim Durchgang der Spitzenabflüsse der simulierten Hochwasserganglinien erfasst werden konnten.

## Ergebnisse und Vergleich

### Vereinigungskolke

In einzelnen Versuchssequenzen bildeten sich im Gleichgewichtszustand markante Vereinigungskolke aus (Abb. 3a). Mit der im trockenen Zustand vermessenen Sohlentopographie sowie den nach Wiederaufnahme des Versuchs gemessenen Wasserspiegellagen konnten die mittleren Abflusstiefen  $h_L$  &  $h_R$  in den sich vereinigenden Gerinnearmen und daraus die mittlere Zuflusswassertiefe  $\bar{h}$  bestimmt werden. Zusätzlich wurde auch die maximale Kolkwassertiefe  $h_K$  und aus den exemplarisch in Abbildung 3c gezeigten Wassertiefen-Plots der Vereinigungswinkel  $\gamma$  ermittelt. Wie Abbildung 5 zeigt, fügen sich die so gewonnenen Werte gut in die Daten von ASHMORE und PARKER (1983) ein. Im Vergleich zu Gleichung 2 ergeben sich mit

$$\frac{h_K}{\bar{h}} = 2.076 + 0.0266 \cdot \gamma \quad \gamma \text{ in } [^\circ] \quad (6)$$

jedoch etwas andere Koeffizienten für eine Regressionsgerade durch die Messpunkte dieser Studie. Die Koeffizienten der Geradengleichung (6) liegen aber im Streubereich, den ASHMORE und PARKER durch Auswertung jedes einzelnen Datensatzes aufzeigen.

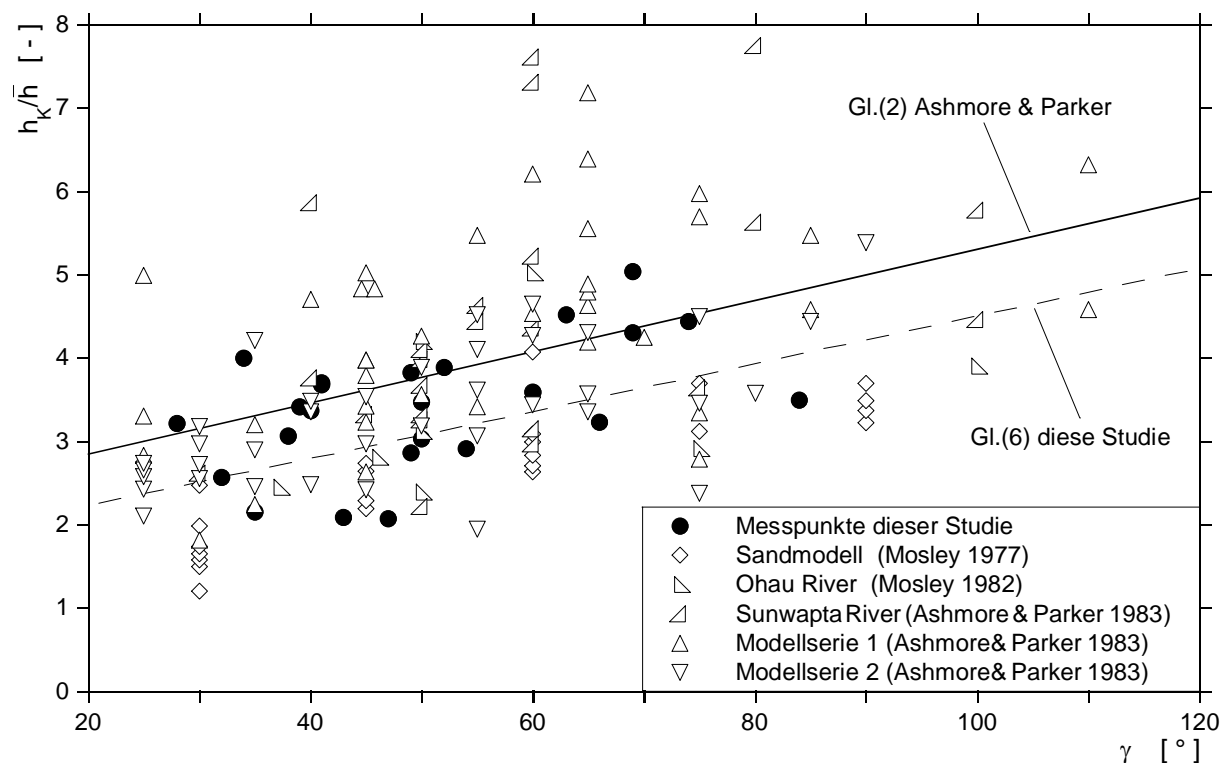


Abb. 5: Relative Kolkwassertiefe  $h_K/\bar{h}$  in Vereinigungskolken in Funktion des Winkels  $\gamma$  den die beiden Zuflussgerinne einschliessen.

### Vergleich mit dem Ansatz von Zarn

In Abbildung 6 sind die im Rahmen dieser Studie gemessenen relativen Kolkiefen  $t_K/h$  gegen den Parameter  $W = (B_F/h)(d_m/h)^{0.3}$  aufgetragen und den Daten nach ZARN gegenübergestellt. Grundsätzlich sind keine markanten Differenzen zwischen den beiden Datensätzen zu erkennen. Die Gleichung (3) und (4) nach ZARN liefern auch für steilere Verhältnisse und eine breitere Kornverteilung gute Resultate.

Abbildung 6 zeigt zudem, dass bei den Spitzenabflüssen, der in dieser Studie simulierten Ganglinien, kleinere relative Kolkiefen resultieren als bei den tieferen konstanten Abflüssen. Dies ist damit zu erklären, dass bei hohen Abflüssen, die Abnahme des Flussbettbreiten- zu Abflusstiefenverhältnis  $B_F/h$  zu einer Einebnung der Sohle führt, die durch die starke Geschiebeführung noch begünstigt wird.

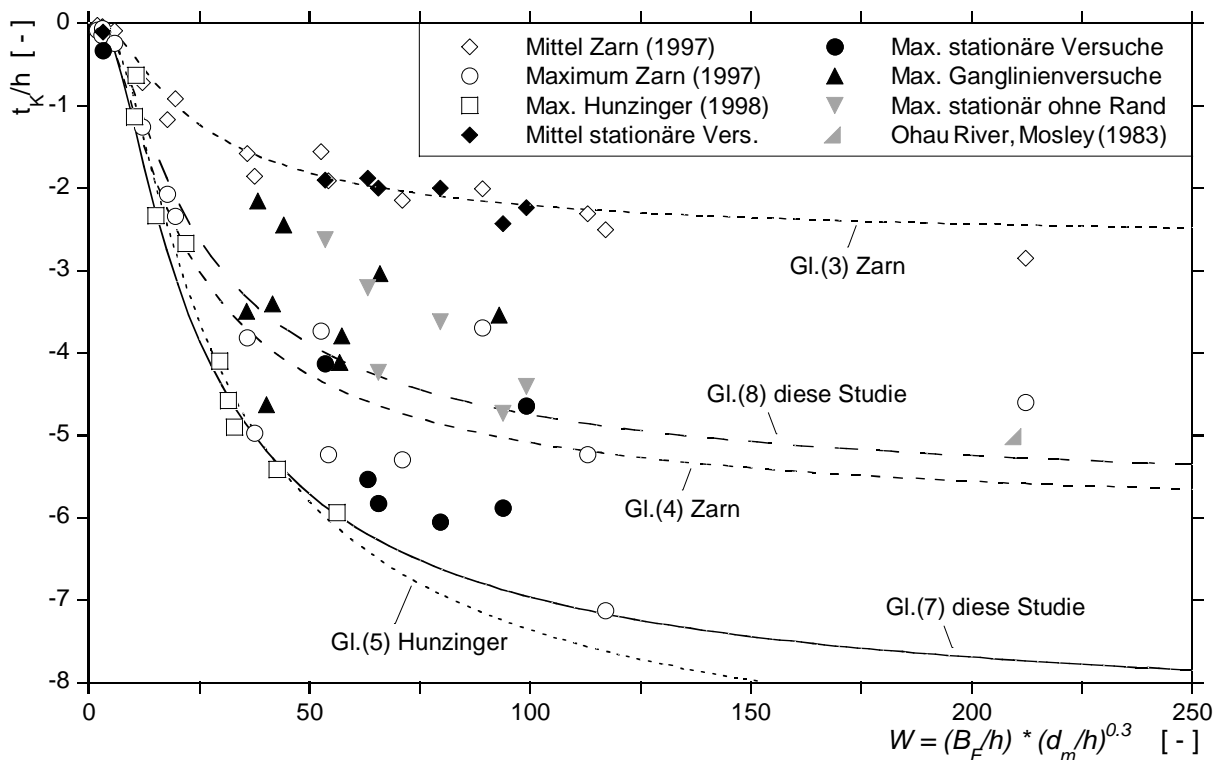


Abb. 6: Relative Kolktiefe  $t_K/h$  in Abhängigkeit des Parameters  $W$ . Die Messwerte dieser Studie sind schwarz dargestellt. Die Werte von ZARN und dieser Studie beziehen sich auf Kolkiefen in einem verzweigten Gerinne mit starrem Längsverbau entlang des Ufers, die Werte von HUZINGER dagegen auf ein mit Buhen gesichertes Ufer. Grau dargestellt sind maximale Kolkiefen im mittleren Bereich von verzweigten Flüssen ohne Randeinfluss. (Bedeutung der einzelnen Gleichungen siehe Text).

### Diskussion und Hinweise für die Praxis

#### Massgebende Kolktiefe

Ansätze zur Ermittlung der Kolkiefen in der von ASHMORE und PARKER angegebenen Form, weisen hinsichtlich der praktischen Anwendung zwei eindeutige Nachteile auf: Erstens interessiert in der Praxis die Kote der tiefsten Sohlenlage. Selbst wenn die

maximale Kolkwassertiefe noch zuverlässig berechnet werden kann, fehlen in verzweigten Gerinnen meist Angaben zur Wasserspiegellage, welche zudem in einem Querprofil noch stark variieren kann. Aus der Kolkwassertiefe lässt sich deshalb nur sehr schwer auf die Kote der tiefsten Sohlenpunkte schliessen.

Zweitens müssen für die Berechnung der Kolkentiefe lokale Abflusstiefen sowie der Winkel zwischen den beiden Zuflussarmen bekannt sein. Solche Werte stehen aber bei der Projektierung einer Aufweitung zwangsläufig noch nicht zur Verfügung.

Für die praktische Anwendung geeigneter ist hingegen der Ansatz von ZARN. Seine Kolkiefen beziehen sich konsequent auf die mittlere Sohlenlage und können daher direkt für die Planung verwendet werden. Neben der massgebenden mittleren Abflusstiefe, welche rechnerisch bestimmt werden muss, sind die übrigen benötigten Grössen grundlegende Projektierungsparameter und daher bekannt.

Gleichung (4), die ZARN zur Berechnung der maximalen Kolkiefen angibt, kann allerdings nicht ohne weiteres für die Festlegung der Fundationstiefe einer Ufersicherung oder flussquerenden Leitungen angewandt werden, da der Ansatz mittlere Werte liefert. Eine sichere Dimensionierung eines Längsverbaus müsste jedoch auf Extremwerten, d.h. auf einer Umhüllenden der in Abbildung 7 gezeigten Datenpunkte basieren. Eine solche Umhüllende kann zum Beispiel mittels der Funktion

$$t_{K_{max}} = -8.5 \cdot h \cdot e^{\left(-19.9/W\right)} \quad \text{mit:} \quad W = \left(\frac{B_F}{h}\right) \cdot \left(\frac{d_m}{h}\right)^{0.3} \quad (7)$$

beschrieben werden. Die durch Gleichung (7) gegebenen Kolkiefen gelten für die Situation eines mittels vertikalem Längsverbau gesicherten Ufers und sind eher konservativ, da sie auch die Extremwerte von ZARN umfassen.

Vergleicht man den Verlauf von Gleichung (7) mit den Messpunkten von HUNZINGER für die maximalen Kolkiefen bei einer Ufersicherung mit Buhnen, so fällt auf, dass Gleichung (7) auch hierfür eine gute Näherung darstellt (Abb. 6). Somit kann zur Berechnung der maximalen Kolkentiefe - unabhängig vom gewählten Uferschutz - Gleichung (7) verwendet werden.

Für Düker oder Brückenpfeiler wird die maximale Kolkentiefe in dem von Randeinflüssen ungestörten mittleren Bereich eines verzweigten Gerinnes massgebend. Dazu wurden alle Versuchssequenzen bei stationären Randbedingungen noch einmal unter Vernachlässigung eines knapp 30 cm breiten Streifens entlang des linken und rechten Rinnenrandes ausgewertet. Die grauen Symbole in Abbildung 6 zeigen, dass sich für diese Kolkwerte eine Umhüllende mit der Funktion

$$t_{K_m} = -5.8 \cdot h \cdot e^{\left(-19.9/W\right)} \quad \text{mit:} \quad W = \left(\frac{B_F}{h}\right) \cdot \left(\frac{d_m}{h}\right)^{0.3} \quad (8)$$

definieren lässt.

Mit Hilfe von Angaben aus MOSLEY (1983) kann der maximale, im Ohau River gemessene Vereinigungskolk (MOSLEY 1982), in Abbildung 6 positioniert werden. Der Vergleich mit den Datenpunkten ohne Randeinfluss aus dem zentralen Bereich des



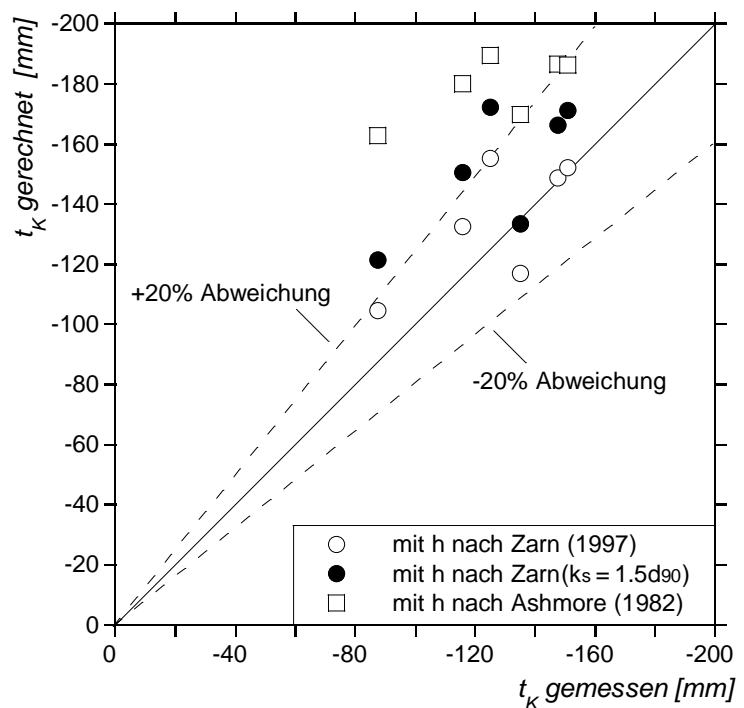
hydraulischen Modells, lässt auf eine gute Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse in die Natur schliessen.

### Einfluss der Berechnung der mittleren Abflusstiefe

Sämtliche bisher präsentierte Auswertungen basieren auf gemessenen Abflusstiefen. Im Rahmen einer Projektierung sind letztere jedoch nicht bekannt und müssen daher rechnerisch bestimmt werden. Es ist daher sinnvoll abzuschätzen, mit welcher Genauigkeit sich die Kolk-tiefen mittels der präsentierten Ansätze vorhersagen lassen, wenn nicht gemessene, sondern berechnete Abflusstiefen verwendet werden.

Eine einfache empirische Beziehung zur Berechnung der mittleren Abflusstiefen in verzweigten Gerinnen präsentiert ASHMORE (1982). Mit seinem Ansatz werden die in den stationären Versuchen gemessenen Abflusstiefen überschätzt, mit dem Verfahren nach ZARN (1997) dagegen unterschätzt. Wird im Ansatz von ZARN allerdings für die äquivalente Sandrau- higkeit nicht wie vorgeschlagen ein Wert von  $2d_m$ , sondern ein Wert von  $1.5d_{90}$  eingesetzt, resultiert eine bessere Übereinstimmung. In Abbildung 7 werden die gemessenen maximalen Kolk-tiefen mit den berechneten Kolk-tiefen verglichen. Für die Berechnung wurde Gleichung (7) in Kombination mit den oben genannten Verfahren zur Bestimmung der mittleren Abflusstiefen verwendet. Wie Abbildung 7 zeigt, sind bei der Bestimmung der Abflusstiefen mittels angepasstem Verfahren von ZARN ( $k_s = 1.5d_{90}$ ), die berechneten Kolk-tiefen leicht grösser oder gleich den gemessenen. Daher stellt diese Kombination einen Ansatz zur sicheren Bemessung dar, bei dem gleichzeitig die Kolk-tiefen nicht massiv überschätzt werden.

*Abb. 5: Vergleich zwischen den gemessenen maximalen Kolk-tiefen und den mit Gleichung (7) berechneten Werten. Dabei wurden zur Bestimmung der in Gleichung (7) benötigten Abflusstiefen verschiedene Berechnungsverfahren verwendet.*



### Schlussfolgerungen

Die Versuchsdaten zeigen, dass in verzweigten Gerinnen infolge der grossen zu erwartenden Kolk-tiefen Uferschutzmassnahmen tief fundiert werden müssen. Unabhängig von der Art des Uferschutzes (Längsverbau oder Buhnen) kann die nötige Foundationstiefe mit der vorgestellten Gleichung (7), welche eine Umhüllende der maximal gemessenen Kolk-tiefen darstellt, dimensioniert werden. Es sei hier jedoch er-

wähnt, dass in der Praxis Buhnen nicht zwingend auf maximale Kolk-tiefen dimensioniert werden müssen, sofern sich die Bauwerke flexibel verhalten können. Ist dies der Fall, ist ein Uferschutz mittels Buhnen überlastbar und bietet auch bei einer Unterkolkung einer einzelnen Buhne meist noch ausreichenden Schutz. Wird hingegen ein Längsverbau punktuell unterkolkt, kann die Strömung im ungünstigsten Fall nach hinten durchbrechen und so grosse Schäden verursachen. Bei einem Längsverbau ist es daher notwendig, maximale Kolk-tiefen bei der Dimensionierung zu berücksichtigen, so dass bei Aufweitungen ein Längsverbau oft weniger wirtschaftlich ist, als Buhnen.

Obwohl die angestellten Vergleiche darauf hindeuten, dass sich die Versuchsergebnisse auf die Natur übertragen lassen, ist dieser Punkt vor allem für grosse Verhältnisse von Flussbettbreite zu Abflusstiefe noch zu bestätigen. Darüber hinaus besteht ein Bedarf für verbesserte Verfahren zur Abflusstiefenberechnung in verzweigten Gerinnen.

### **Literatur:**

- ASHMORE P. (1982): Laboratory Modelling of Gravel Braided Stream Morphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7, 201-225.
- ASHMORE P., PARKER G. (1983): Confluence Scour in Coarse Braided Streams. *Water Resources Research*, 19(2), 392-402.
- HOFFMANS G.J.C.M., VERHEIJ H.J. (1997): *Scour Manual*. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- HUNZINGER, L.M. (1998): Flussaufweitungen - Morphologie, Geschiebehaushalt und Grundsätze zur Bemessung. Mitteilung Nr. 159, VAW, ETH-Zürich.
- MARTI, C. (2002): Morphodynamics of widenings in steep rivers. In: *RiverFlow2002* (Ed. by D. Bousmar & Y. Zech), Vol. 2, pp. 865-873, A.A.Balkema, Lisse, Netherlands.
- MARTI, C., BEZZOLA G.R. (2003): Morphologische Dynamik in Flussabschnitten mit grosser Breite. *GAIA* 12(4), 295-299.
- MOSLEY, M.P. (1982): Scour Depths in Branch Channel Confluences, Ohau River, Otago, New Zealand. *Trans.*, 9(1), 17-24.
- MOSLEY, M.P. (1983): Analysis of the Effect of Changing Discharge on Channel Morphology and Instream Uses in a Braided River, Ohau River, New Zealand. *Water Resources Research*, 18(4), 800-812.
- ZARN, B., (1997): Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität, Mitteilung Nr. 154, VAW, ETH-Zürich.

### **Adresse der Verfasser**

Christian Marti, Dr. Gian Reto Bezzola, Prof. Dr. Hans Erwin Minor  
 Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zentrum,  
 CH-8092 Zürich  
[marti@vaw.baug.ethz.ch](mailto:marti@vaw.baug.ethz.ch), [bezzola@vaw.baug.ethz.ch](mailto:bezzola@vaw.baug.ethz.ch), [minor@vaw.baug.ethz.ch](mailto:minor@vaw.baug.ethz.ch)