Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 96 (2004)

Heft: 9-10

Artikel: Einfluss von vertikalen Rauigkeitsrippen auf die Kolkgefahr entlang von gekrümmten Ufermauern

Autor: Hersberger, Daniel / Schleiss, Anton

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939584

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: 13.07.2025

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

Einfluss von vertikalen Rauigkeitsrippen auf die Kolkgefahr entlang von gekrümmten Ufermauern

Daniel Hersberger, Anton Schleiss

Zusammenfassung

Kolktiefen entlang gekrümmter Ufermauern können sehr wirksam reduziert werden, indem Makrorauigkeitselemente auf die Aussenwand angebracht werden. Dies erlaubt den Verzicht auf kostspielige Aushübe für tief liegende Mauerfundamente.

Erste Erfahrungen mit Hochwasserschutzprojekten haben diesen Sachverhalt aufgezeigt. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurden die benötigten Bemessungsgrundlagen für solche Rauigkeitsrippen mit systematischen Laborversuchen erarbeitet. Die daraus resultierenden empirischen Formeln zur Abschätzung der Kolktiefe (mit und ohne Rauigkeitsrippen) sind in einem breiten Bereich anwendbar.

Es zeigte sich, dass die meisten bekannten Kolkformeln die Kolktiefe in Gebirgsflüssen mit grober und breiter Kornverteilung deutlich unterschätzen. Die an der Ufermauer befestigten Rauigkeitsrippen führen zu einer Reduktion der Kolktiefe von bis zu 40% gegenüber einer glatten Mauer. Die zwei ausgeprägten Kolklöcher in einem zu 90° gekrümmten Gerinne verschwinden praktisch vollständig, indem die Erosion gleichmässig über die gesamte Kurve verteilt wird.

Der vorliegende Artikel stellt verbesserte empirische Kolkformeln vor. Diese erlauben die Abschätzung der maximalen Kolktiefe entlang einer gekrümmten Mauer für Gebirgsflüsse mit grober Sohle und breiter Kornverteilung. Zudem werden praktische Empfehlungen bezüglich der optimalen Rippenabstände und deren Geometrie gegeben.

Résumé:

Influence de nervures verticales le long de murs de rive sur le danger d'érosion en courbe

Des premières expériences faites dans le cadre de projets de protections contre les crues ont démontré que l'érosion en courbe le long de murs de rives peut être réduite de manière efficace à l'aide d'éléments de macrorugosité. Cette rugosité permet de diminuer considérablement le coût des fondations. Dans le cadre d'un travail de recherche, les bases de dimensionnement ont été élaborées pour la mise en place de nervures verticales servant de macrorugosité. En outre, des équations empiriques permettant d'estimer la profondeur d'érosion le long de parois verticales ont été établies. Il a été démontré que la plupart des équations d'érosion connues sous-estiment considérablement la profondeur d'érosion pour les rivières de montagnes avec une granulométrie étendue. La macrorugosité disposée le long de murs de rives apporte une réduction de l'affouillement pouvant aller jusqu'à 40% par rapport à un mur lisse. Les deux fosses d'érosion observées dans une courbe de 90° disparaissent pour ainsi dire totalement au profit d'une érosion répartie régulièrement sur la courbe.

Une formule empirique améliorée servant de base à l'estimation de la profondeur d'érosion maximale en courbe est présentée. Cette dernière est valable pour les rivières de montagnes comportant une granulométrie étendue. Une autre équation permet le calcul de l'affouillement en présence de nervures verticales. Finalement, des recommandations pratiques sont suggérées, indiquant l'espacement optimal des nervures ainsi que leur profondeur et leur géométrie.

Abstract:

Influence of vertical ribs on the scour potential along outer bank protection walls in river bends

Early experiments with flood protection projects showed that the scour along outer bank protection walls can be considerably reduced by placing macro-roughness on the wall. This allows the reduction of the depth of the foundations, which in turn has a direct impact on the cost of the project. In the framework of a research project, systematic tests were performed to establish the basis for dimensioning vertical ribs, which served as macro-roughness. Furthermore, empirical relations were established, which enabled the computation of the scour depth along the outer wall over a wide range of parameters. It was seen that most known scour formulae considerably underestimate the scour depth of mountain rivers with coarse and wide grain size distribution. Ribs, appropriately placed along the outer wall may reduce the maximum scour depth up to 40% in comparison with the scour depth along a smooth (outer) wall. The two prominent scour holes in a 90° bend almost disappear and the erosion is distributed over the whole bend.

The maximum scour depth is computed by means of an enhanced empirical formula (1). Furthermore, equation 2 gives the maximum scour depth of outer walls with vertical ribs. Both equations apply to mountain rivers with a coarse and wide grain size distribution. Finally, practical recommendations give the optimum spacing, shape and geometry of these ribs.

1. Einführung

In engen Tälern des Alpenraumes durchqueren Flüsse häufig Siedlungsgebiete. Aufgrund der engen Platzverhältnisse liegen Infrastrukturanlagen und Gebäude oft unmittelbar an den Flussufern, welche durch Ufermauern vom Flussraum abgegrenzt werden. Letztere sind während Hochwasserereignissen durch Unterkolkung gefährdet, insbesondere in Flusskrümmungen. Werden Makrorauigkeitselemente auf diesen Mauern angebracht, kann damit die Kolktiefe stark reduziert werden (Bild 1). Durch die Reduktion der Fundationstiefe können wesentliche Kosteneinsparungen erzielt werden wie praktische Erfahrungen zeigen (Schleiss, 2000). Im Rahmen einer Forschungsarbeit am Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) der ETH Lausanne (EPFL) (Hersberger, 2002a) wurden mittels Laborversuchen die Bemessungsgrundlagen für solche Rauigkeitsrippen erarbeitet.

Bild 1. Ufermauern mit Rauigkeitsrippen in Gurtnellen an der Reuss (links) und in Saas Almagell an der Vispa (rechts).
Figure 1. Murs de rive avec nervures à Gurtnellen sur la Reuss (à gauche) et à Saas Almagell sur la Vispa (à droite).

2. Modellversuche

2.1 Anordnung und Umfang der Versuche

Die der Studie zugrunde liegenden Versuche wurden in einem 1 m breiten und 90° gekrümmten Kanal (Bild 2) mit einem Radius von 6 m durchgeführt. Die über 50 Tests decken ein weites Spektrum an Abflüssen, Gefällen bei recht hohen Froudezahlen, jedoch fliessenden Strömungsbedingungen sowie verschiedenen Rippenabständen und -tiefen ab. Gemessen wurden das 3D-Geschwindigkeitsfeld, die Wasserspiegellagen, die Sohlentopographie, die Sedimentcharakteristika, die Kornverteilung der Deckschicht, der Abfluss sowie die Geschieberaten.

Senkrechte Rippen (Bild 3), welche in Abständen von 1° (114 cm), 2°, 4° und 8° an der Kurvenaussenseite angebracht waren, erzeugten die Makrorauigkeit. Nebst der Kurve wurden auch die an die Krümmung anschliessenden 1 m des Einlaufes und 2 m des Auslaufs mit den Rippen bestückt.

Auf den geraden Strecken (Ein- und Auslauf) wurden die Abstände mit zunehmender Distanz zur Kurve vergrössert (Faktor $\sqrt{2}$ im Vergleich zum vorherigen Abstand). Tabelle 1 gibt einen Überblick über die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Versuche.

Diese Versuche wurden mit 32 Laborversuchen von Peter (1986) ergänzt, welche mit weiteren Kurvenradien, B/h-Verhältnissen (Kanalbreite zu Abflusstiefe), Kornverteilungen, Abflüssen und Längsgefällen in einem 135° gekrümmten Kanal gemessen wurden.

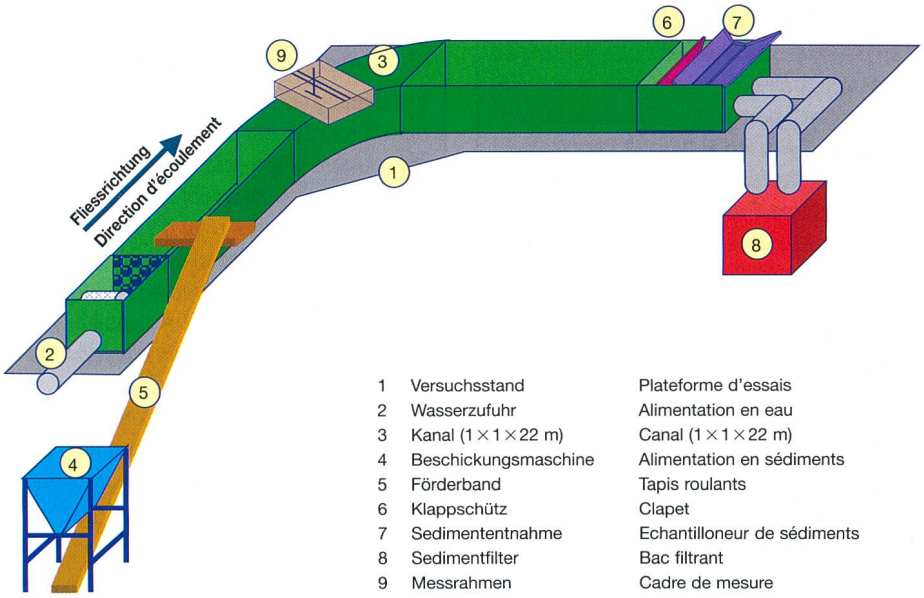

Bild 2. Schema der Versuchsanlage.
Figure 2. Installation d'essai.

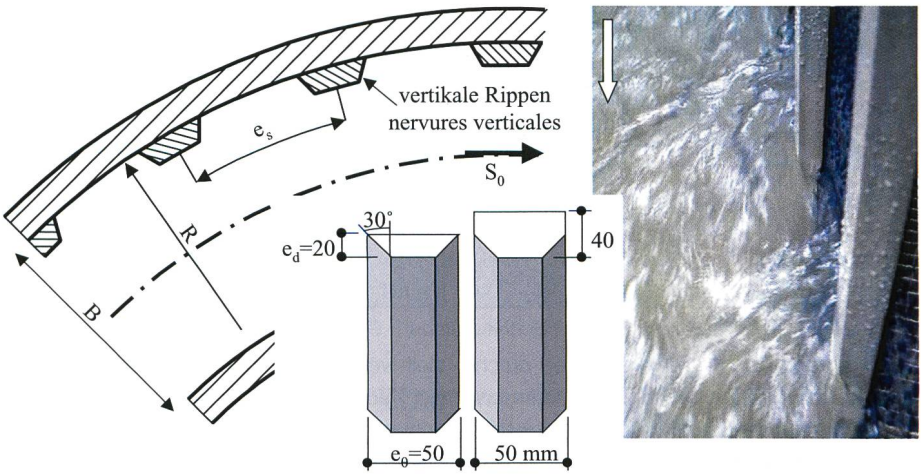

Bild 3. Anordnung und Geometrie der Makrorauigkeit und Strömung um die Rippen.
Figure 3. Disposition et géométrie de la macro-rugosité et écoulement autour des nervures.

2.2 Erkenntnisse aus den Versuchen

Ohne Makrorauigkeit an der Ufermauer entsteht ein erstes Kolkloch in der Verlängerung der inneren Seitenwand des Einlaufs, ein zweites tritt am Bogenende auf. Die Analyse der Versuche erlaubt folgende Schlussfolgerungen:

- Grosse Oszillationen des Wasserspiegels (stationäre Wellen) sowie der Kolktiefen wurden – speziell im zweiten Kolk – beobachtet.
- Den beiden Kolklöchern scheinen unterschiedliche Mechanismen zugrunde zu liegen: Das erste wird hauptsächlich durch die Richtungsänderung der Hauptströmung und der daraus folgenden Sekundärströmung verursacht (Aufprall auf der Aussenwand), während das zweite durch die zunehmenden Turbulenzen hinter der Geschiebebank an der Kanalinnenseite vergrössert wird.
- In Fliessrichtung bewegen sich die höchsten mittleren Geschwindigkeiten von der Kanalachse Richtung Aussenwand und anschliessend gegen die Sohle hin. Im ersten Kolkloch werden die höchsten Geschwindigkeiten in Bodennähe beobachtet.
- Aufgrund der breiten Kornverteilung lässt sich ein markanter Sortierungsprozess in Querrichtung beobachten. Grobe Komponenten sammeln sich an der Aussenwand im Kolkloch an, während feine Körner die innere Bank bilden (Bild 4).

Durch Anbringen von senkrechten Rippen entlang der Kurvenaussenseite können der Kolkprozess sowie die Strömung

markant beeinflusst werden. Die Makrorauigkeit hat folgende Auswirkungen:

- Die Kolktiefe entlang der Aussenwand wird stark reduziert und die ausgeprägten Kolklöcher verschwinden praktisch vollständig (Verteilung des Kolkes über die Krümmung, siehe Bild 5).
- Mit steigender Wandrauigkeit bewegt sich das erste Kolkloch flussabwärts, während das zweite ungefähr an gleicher Stelle verbleibt (Bild 5).
- Die ohne Rippen beobachteten Oszillationen des Wasserspiegels werden durch die Makrorauigkeit in etwa halbiert und der Kolk entwickelt sich gleichmässiger.
- Die Strömung wird stark beeinflusst; die höchsten Geschwindigkeiten in Fliessrichtung werden von der Aussenwand ferngehalten und somit der Kolk am Fuss von Schutzmauerfundationen reduziert (Bild 6).
- Entlang der Aussenwand kann an der Wasseroberfläche eine sekundäre Strömungszelle (Bild 7, Zelle 2) beobachtet werden. Die Grösse dieser Zelle ist proportional zur Reduktion der Kolktiefe (siehe auch Hersberger, 2002b).
- Ein optimaler Rippenabstand ist von grosser Bedeutung, da ein schlecht gewählter Abstand die Kolktiefe sogar vergrössern kann (Bild 5).
- Die Sedimenttransportkapazität wird durch die Rippen reduziert. In natürlichen Flüssen wird dies durch eine Zunahme des Gefälles kompensiert.

Bild 4. Sortierungsprozess in Querrichtung; ohne Rippen (oben), mit Rippen (unten).
Figure 4. Tri granulométrique radial; sans nervures (en haut), avec nervures (en bas).

Parameter/Paramètre	*Hersberger*	*Peter (1986)*	*Total*
Anzahl Versuche/nombre d'essais	*54*	*32*	*86*
R_c/B	*6*	*2, 3,5*	*2 ÷ 6*
Q [l/s] *Fr* *Re [×1000]*	*150 ÷ 210* *0,68 ÷ 0,97* *44 ÷ 63*	*2 ÷ 48* *0,3 ÷ 1,2* *0,7 ÷ 1,4*	*2 ÷ 210* *0,3 ÷ 1,2* *0,7 ÷ 63*
d_m *[mm]* σ	*8,5* *1,8*	*0,45 ÷ 5,1* *1,2 ÷ 3,2*	*0,45 ÷ 8,5* *1,2 ÷ 3,2*
Rippenabstand/espacement nervures *Rippentiefe/épaisseur nervures*	*1 ÷ 8°* *2 ÷ 4 cm*	– –	*1 ÷ 8°* *2 ÷ 4 cm*

Tabelle 1. Überblick über die durchgeführten Versuche.
Tableau 1. Aperçu des essais effectués.

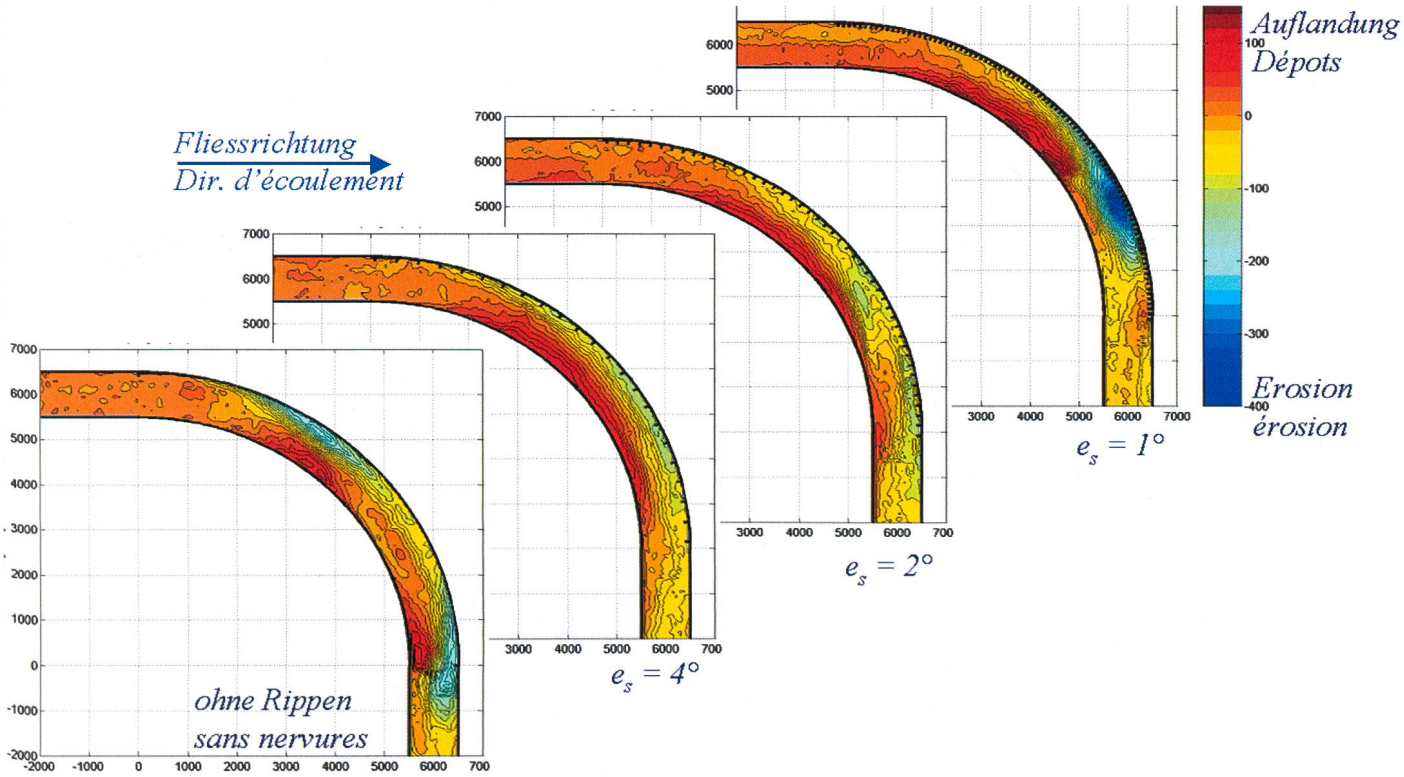

Bild 5. Vergleich der Sohlenlagen nach Versuchen mit Q = 210 l/s bei einem Gefälle von 0,5%.
Figure 5. Comparaison de la topographie du lit après les essais pour Q = 210 l/s et S_0 = 0,5%.

- Auch die beiden Enden der Kurve werden durch die Makrorauigkeit beeinflusst; oberhalb der Kurve nimmt die Wassertiefe infolge Energieverlust in der Kurve zu (und führt zu einer Auflandung) und unterhalb kann eine geringe Zunahme des Kolks in der Kanalmitte beobachtet werden.
- Der Geschiebesortierungsprozess wird durch die Rippen kaum beeinflusst (Schleiss & Hersberger, 2001). Einzig die Ausdehnung der groben Ablagerungen entlang der Aussenwand wird vergrössert (Bild 4).

Mit einem optimalen Abstand der Rippen kann eine beachtliche Reduktion der Kolktiefe beobachtet werden (bis zu beinahe 40%). Diese ist vor allem für grosse Abflüsse und grosse Gefälle ausgeprägt (Bild 8). Werden die Rippen jedoch zu nahe beieinander angeordnet, zieht dies unter Umständen sogar eine Erhöhung der Kolktiefe im Vergleich zur Situation mit einer glatten Mauer nach sich (in Bild 5 für den Rippenabstand 1°).

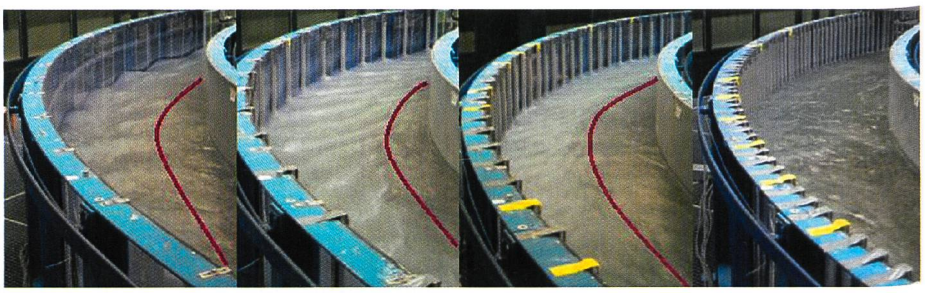

Bild 6. Abflussverhältnisse für verschiedene Rippenabstände (von links nach rechts: ohne Rippen, alle 4°, 2°, 1°).
Figure 6. Ecoulement pour différents espacements des nervures (de gauche à droite: sans nervures, tous les 4°, 2°, 1°).

3. Vergleich der Versuchsresultate mit bestehenden Kolkformeln

Ein Vergleich der Versuche mit bestehenden Kolkformeln zeigt, dass die meisten Beziehungen die Kolktiefe für Gebirgsflüsse mit breiter Kornverteilung deutlich unterschätzen (Tabelle 2 und Hersberger & Schleiss, 2002a). So muss die maximale Kolktiefe mit einem Korrekturfaktor F_K von bis zu 2,4 multipliziert werden, um die gemessenen Werte zu erreichen. Einzig die Formeln von Peter (1986) und Reindl (1994) überschätzen die Kolktiefe. Im Mittel wurden die besten Resultate mit der Formel von Bridge (1976) erzielt, jedoch mit einer breiten Streuung. Dies ist ein Hinweis darauf, dass diese Formeln bei Anwendung für Gebirgsflüsse wesentliche Parameter nicht berücksichtigen.

4. Vorschlag einer verbesserten Kolkformel

4.1 Glatte Mauer

Ohne Makrorauigkeit wurden die besten Resultate mit einer Kolkformel erzielt, welche auf derjenigen von Bridge basiert. Anstelle der Konstanten 11 wurde eine von den Verhältnissen h_m/B und R_c/B abhängige, empirische Beziehung eingefügt. Damit werden die Abflussverhältnisse sowie die Kurvengeometrie berücksichtigt.

$$\sin\beta = 0.394 \cdot \left(11 - 23 \cdot \frac{h_m}{B}\right) \cdot \frac{R_c}{B} \cdot \tan\phi \cdot \frac{\eta}{B},\ R^2 = 0.82 \qquad (1)$$

Geltungsbereich: $0.3 < Fr < 1.2$; $2 < R_c/B < 6$; $6.5 < h_m/d_m < 39$

Die *Positionen der maximalen Kolke* können mit folgenden Funktionen berechnet werden:

$$\alpha_1 = \sigma \cdot \left(0.58 \cdot \frac{B}{h_m} + 12.7 \cdot \frac{S_c}{\sigma - Fr}\right) + 1.4 \cdot Fr_d \cdot \frac{V}{V*} - 6.6,\ R^2 = 0.83 \qquad (2)$$

$$\alpha_2 = 12.6 \cdot Fr_d - 0.9 \cdot \left(\frac{R_c}{B}\right)^2 + 91.6,\ R^2 = 0.60 \qquad (3)$$

Diese beiden Gleichungen illustrieren, dass unterschiedliche Parameter die Kolkbildung beeinflussen, so ist das erste Kolkloch beispielsweise wesentlich von der Kornverteilungsbreite σ abhängig, nicht aber das zweite.

Autor *Auteur*	*Parameter* *Paramètres*	F_K	*Grundprinzip* *Basé sur*	*Geltungsbereich* *Domaine de validité*
Fargue, 1868	*R_c/B, Rauigk., V*	*0,95*	*Analytisch, Moment auf Ufer und Sohle*	*Gibt nur die max. Kolktiefe, Felddaten*
Van Bendegom[1], 1947 *Engelund[2], 1974/76* *Bridge, 1976*	*Fr_d* *$7 \cdot \tan\phi = cst$* *$11 \cdot \tan\phi = cst$*	*2,3* *1,4* *1,0*	*Analytisch, Gleichgewicht des Korns*	*[1] nur für kleine Längsgefälle, grosse B/h, r >> h* *[2] nicht für voll entwickelte Strömung*
Kikkawa et al., 1976 *Reindl, 1994*	*Fr_d, V*/V, n* *Fr_d, V*/V, n, Gs*	*1,45* *0,67**	*Analytisch, Gleichgewicht des Korns, Geschwindigkeitsverteilung*	*Gs: Sedimentsättigungsparameter, Labortests*
Zimmermann al., 1978 *Falcon Kennedy, 1983* *Odgaard, 1986*	*Fr^2_d, n* *Fr^2_d, n, θ, p* *Fr^2_d, n, θ*	*2,4* *1,9* *1,8*	*Analytisch, Gleichgewicht des Kontrollvolumens*	*Für sandige Flachlandflüsse entwickelt, Labor- und Felddaten*
Peter, 1986	*R_C/B, σ, h_m/B, Fr*	*0,85*	*Empirisch, Dimensionsanalyse*	*Geltungsbereich $R_c/B = 2 \div 6$ Basiert auf Labortests*

L: Laborversuche/Essais en laboratoire, F: Felddaten/mesures in situ
** Vergleich mit den Versuchsdaten dieser Studie/Comparaison avec les essais effectuées dans cette étude*

Tabelle 2. Untersuchte Kolkformeln.
Tableau 2. Equations d'érosion analysées.

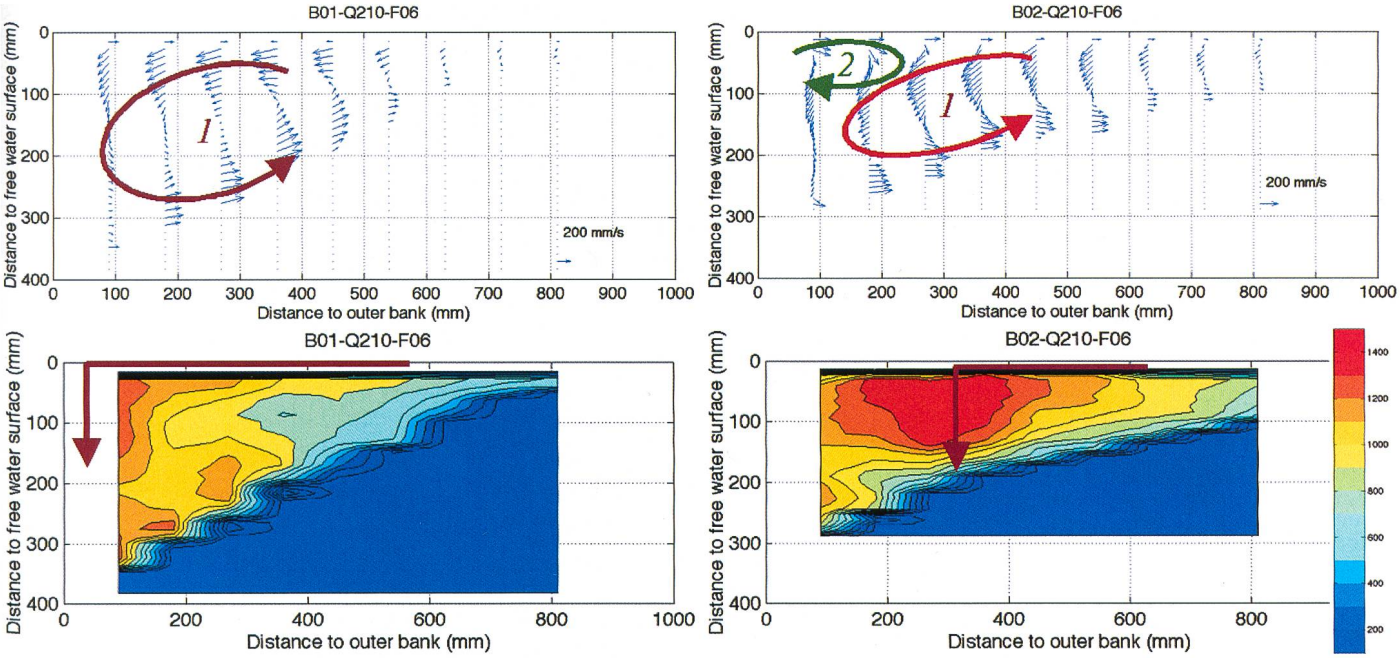

Bild 7. Sekundärströmung im ersten Kolk (oben) 1: Hauptzelle, 2: Sekundärzelle. Geschwindigkeitenkomponente in Hauptfliessrichtung [mm/s].

Figure 7. Ecoulement secondaire dans la 1re fosse (en haut) 1: cellule principale, 2: cellule secondaire. Composante de vitesses dans la direction d'écoulement principal [mm/s].

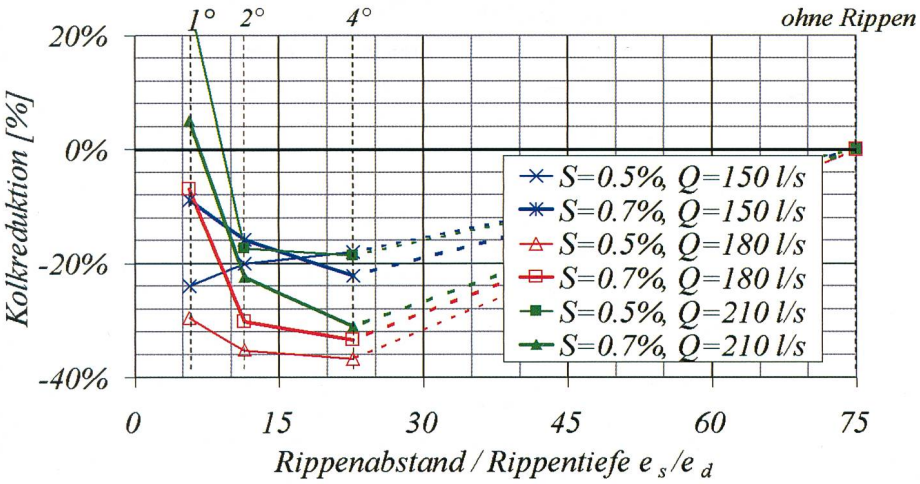

Bild 8. Reduktion der maximalen Kolktiefe in Abhängigkeit des Rippenabstandes.

Figure 8. Réduction de la profondeur d'érosion maximale en fonction de l'espacement des nervures.

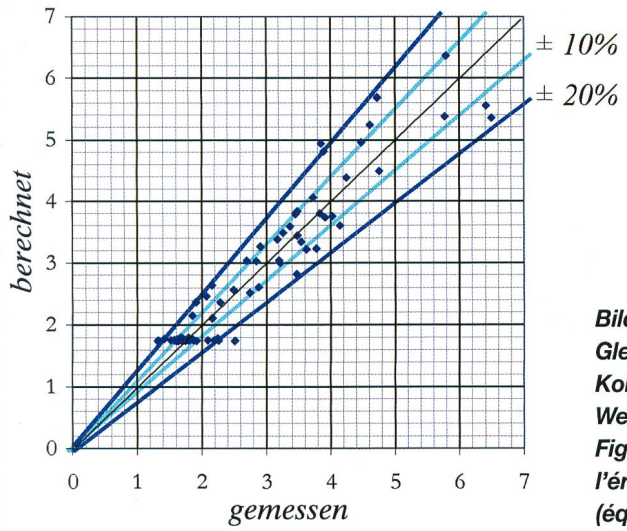

Bild 9. Vergleich der mit der Gleichung (4) berechneten Kolktiefen mit den gemessenen Werten.

Figure 9. Comparaison entre l'érosion maximale calculée (équation 4) et mesurée.

4.2 Mauer mit Rippen

Für die Versuche *mit senkrechten Rippen* entlang der Aussenwand wurde folgende Beziehung ermittelt:

$$\frac{\eta_{max}}{h_m} = 7.7 \cdot \frac{e_s}{R_h} \cdot Fr \cdot \left(0.001 + (\theta - \theta_{cr})^2\right) + 1.7 \text{, wobei } \theta \geq \theta_{cr} \qquad (4)$$

Geltungsbereich: $0.3 < Fr < 1$; $2 < R_h/B < 6$; $18 < h_m/d_m < 24$

Bild 9 zeigt, dass praktisch alle gemessenen Werte in einer Bandbreite von ±20% um die mit der Gleichung (2) berechneten Mittelwerte lagen

Diese Formel ist eine Funktion der Froudezahl und der Differenz zwischen der dimensionslosen Schubspannung und ihrem kritischen Wert. Das Verhältnis Rippenabstand zu hydraulischem Radius berücksichtigt den Einfluss der Wandrauigkeit. Dazu ist zu bemerken, dass ein optimaler Rippenabstand von zentraler Bedeutung ist, denn ein zu kleiner Rippenabstand führt zu einer Verstärkung der Erosion. Die daraus resultierende Kolktiefe kann deshalb diejenige einer glatten Mauer sogar übertreffen. Schliesslich muss erwähnt werden, dass das Verhältnis maximale Kolktiefe zu mittlerer Abflusstiefe nahe bei 1,7 liegt und die verschiedenen Parameter nur einen beschränkten Einfluss auf die Gleichung haben.

4.3 Anwendung der Formeln auf Felddaten

Um die Anwendbarkeit der Formeln auf Felddaten zu überprüfen, wurden zwei praktische Beispiele überprüft. Im August 1987 wurde das Dorf Gurtnellen an der Reuss von einem Hochwasser heimgesucht. In der Folge wur-

den an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich Modellversuche durchgeführt (Kuster, Jäggi, Bezzola, 1992). Darin wurde auch der Einfluss von Rauigkeitsrippen auf die Kolktiefe gemessen. Da die Versuche auf die während des Ereignisses beobachteten Erosionstiefen geeicht wurden, wird die Anwendbarkeit hier anhand der Versuchsmessungen überprüft.

Die folgenden Werte wurden zur Überprüfung verwendet:
$R_c = 110$ m, $B = 30$ m, $A = 150$ m^2, $S_0 = 2{,}6\%$, $d_{90} = 0{,}60$ m, $\sigma = 10$, $\phi = 38°$, $V = 4$ m/s, $Fr = 0{,}7$, $\theta = 0{,}110$, $\theta_{cr} = 0{,}047$, $e_s = 10$ m, $e_d = 0{,}6$ m und $e_\theta = 1{,}8$ m.

Zur Bestimmung der Wassertiefe im Oberwasser wurden der Wandeinfluss sowie die Staukurve berücksichtigt:
$h_m = 5{,}0$ m, $R_h = 4{,}3$ m.

Mit diesen Werten lässt sich nun die Kolktiefe berechnen. Letztere beträgt für die Gleichung (1), 14,1 m (glatte Mauern) und für Gleichung (2) 8,8 m (mit Rippen). Im Vergleich zu den im Modell gemessenen Werten (mit Rippen $\eta = 10{,}9$ m), unterschätzt die zweite Gleichung den Kolk. Wenn wir aber berücksichtigen, dass der Kurvenradius veränderlich ist und eine Unsicherheit von rund 20% bezüglich des Mittelwerts besteht, liegen die errechneten Resutate in der Bandbreite.

Nomenklatur

A	[m^2]	Profilquerschnitt	section du profil en travers
B	[m]	Profilbreite	largeur du canal/profil
d	[m]	charakt. Korn-∅ der Unterschicht	diamètre caractéristique du substrat
e_d	[° oder m]	Rippentiefe (senkr. zur Kanalachse)	épaisseur des nervures (perp. à l'axe du canal)
e_s	[° oder m]	Rippenabstand (Achse zu Achse)	espacement des nervures (entre les axes)
e_θ	[° oder m]	Länge der Rippen (in Fliessrichtung)	longueur des nervures (sens de l'écoulement)
F_K	[-]	Korrektionsfaktor	facteur de correction
Fr	[-]	Froudezahl	nombre de Froude
Fr_d	[-]	Densimetrische Froudezahl	nombre de Froude densimétrique
h_m	[m]	mittlere Abflusstiefe	hauteur d'écoulement moyenne
n	[-]	Reibungskoeffizient (Zimmermann)	coefficient de frottement (Zimmermann)
p	[-]	Porosität	porosité
Q	[m^3/s]	Abflussmenge	débit
R	[-]	Pearson Korrelationskoeffizient	coefficient de corrélation de Pearson
R_c	[m]	Radius entlang der Kanalachse	rayon à l'axe du canal
R_h	[-]	Hydraulischer Radius	rayon hydraulique
s	[-]	Relative Korndichte	densité relative des sédiments $s = \rho_s/\rho_w \approx 2{,}635$
S_0	[-]	Längsgefälle der Sohle	pente longitudinale du fond
V, v	[m/s]	mittlere resp. lokale Geschwindigkeit	vitesse moyenne, resp. locale
V^*	[m/s]	Schubspannungsgeschwindigkeit	vitesse de frottement
α_1, α_2	[°]	Position des ersten, zweiten Kolklochs	position de la 1re et 2e fosse d'érosion
		(Öffnungswinkel zwischen Kurvenanfang und dem maximalen Kolk)	
β	[°]	Querneigung der Sohle	pente transversale du fond
ϕ	[°]	dynamischer Gleitreibungswinkel	coefficient de frottement dynamique
θ	[-]	Shieldsparameter	tension de frottement adim. $\theta_{cr} = 0{,}0047$
η	[m]	Kolktiefe	profondeur d'érosion
		(freier Wasserspiegel zu Sohlenlage)	(distance plan d'eau – fond)
σ	[-]	Breite der Kornverteilung	granulométrie étendue $\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$

5. Empfehlungen für die Praxis

5.1 Vor- und Nachteile der Rauigkeitsrippen entlang der Aussenwand

Senkrechte, an der Aussenwand angebrachte Rippen haben folgende Vorteile:

- Die maximale Kolktiefe wird signifikant reduziert (rund 20 bis 40% bei optimalem Rippenabstand).
- Die lokalen, tiefen Kolke verschwinden beinahe vollständig zugunsten eines über die gesamte Krümmung verteilten «Kolkkanals».
- Die grossen Variationen der Kolktiefe werden massiv reduziert und verschwinden beinahe – speziell für hohe Abflussmengen (Reduktion der Unsicherheit bezüglich Kolktiefe).
- Die Amplitude der stehenden Wellen an der Wasseroberfläche wird auf rund die Hälfte reduziert (Bild 6). Gleichzeitig wird jedoch aufgrund des Energieverlustes in der Kurve ein Ansteigen des mittleren Wasserspiegels beobachtet. Die beiden Phänomene halten sich jedoch in etwa die Waage, sodass die maximalen Wasserspiegel in der Kurve mit Rippen denjenigen ohne Rippen entsprechen.
- Die höchsten Geschwindigkeiten (in Fliessrichtung) werden von der Aussenwand in Richtung Kanalmitte gelenkt. Die grössten Werte treten in einem Abstand von rund einer mittleren Wassertiefe zur Aussenwand auf.
- Die Deckschicht entlang der Aussenwand erstreckt sich über einen weiteren Bereich als ohne Rippen (Bild 4, rechts).

Die senkrechten Rippen haben jedoch auch ihre Nachteile:

- Die Transportkapazität in der Kurve wird im Falle von relativ engen Flussquerschnitten reduziert ($B < 50 \times$ Rippentiefe). Dies wird in einem natürlichen Fluss mit einer Vergrösserung des Gefälles kompensiert (Auflandung im Oberlauf und Erosion im Unterlauf).
- Die zusätzliche Erosion im Unterlauf befindet sich in der Mitte des Gerinnes. Mit Ausnahme von Brückenpfeilern befinden sich nur selten gefährdete Bauwerke in diesem Bereich.

5.2 Abschätzung der maximalen Kolktiefe

Werden bestehende Kolkformeln zur Berechnung der Kurvenkolke in Gebirgsflüssen herangezogen, muss die Tatsache berücksichtigt werden, dass die Kolktiefe teils massiv unterschätzt wird und deshalb mit einem Korrekturfaktor berichtigt werden muss (siehe Tabelle 2).

Für glatte Mauern (ohne Rauigkeitselemente) kann die Gleichung (1) zur Berechnung herangezogen werden. Diese Gleichung erlaubt sowohl die Ermittlung der maximalen Kolktiefe als auch den Sohlenverlauf im Querprofil des maximalen Kolks.

Bei Anwendung von senkrechten Rippen kann die maximale Kolktiefe mit der Gleichung (4) ermittelt werden.

Die Lage der maximalen Kolke für glatte Mauern kann mit den Gleichungen (2) und (3) berechnet werden. Das erste Kolkloch kann mit relativ guter Genauigkeit bestimmt werden ($R^2 = 0{,}83$), das zweite bietet etwas mehr Schwierigkeiten ($R^2 = 0{,}60$).

Für alle hier vorgestellten Gleichungen (1) bis (4) muss jedoch die Anwendung auf den ihnen zugrunde gelegten Geltungsbereich eingeschränkt werden. Die Versuche wurden bei strömendem Abfluss, jedoch recht hohen Froudezahlen (> 0,3) in einem Gefällsbereich zwischen 0,44 und 0,79% durchgeführt. Das Verhältnis von Radius zu Gerinnebreite R_c/B liegt zwischen 2 und 6 und die mittlere Fliesstiefe zum mittleren Korndurchmesser des Substrats h_m/d_m zwischen 6,5 und 39. Der Einfluss der Makrorauigkeit wurde für $R_c/B = 6$ und $h_m/d_m = 18$ bis 24 studiert, findet aber bestimmt in einem grösseren Bereich seine Anwendung.

5.3 Optimale Rippenabmessungen und -abstände

Aufgrund der numerischen Untersuchungen von Gairola (1996) und der durchgeführten Versuche kann ein optimaler Rippenabstand empfohlen werden. Um eine grösstmögliche Energiedissipation entlang der Aussenwand zu erzielen, muss die Ablösungszone hinter einer Rippe wieder an die Wand gelangen, bevor sie auf die nächste Rippe trifft. In einer Geraden beträgt die Länge dieser Ablösungszone rund 12 Mal die Tiefe des Rauigkeitselements (Gairola, 1996). Die Versuche zeigen, dass der optimale Abstand auch in der Kurve in dieser Grössenordnung liegt. Deshalb kann der optimale Abstand mit rund 10 bis 15 Mal die Rippentiefe angegeben werden.

Für die Versuche mit Rippentiefen von rund 2,5 Mal dem mittleren Korndurchmesser des Substrats (dies entspricht in etwa dem maximalen Korndurchmesser der Deckschicht) trat praktisch kein lokaler Kolk am Fuss der Rippen auf.

Deshalb kann für Anwendungen eine Rippentiefe von rund 2,5 Mal der mittlere Korndurchmesser des Sohlenmaterials empfohlen werden.

Die korrekte Wahl des Rippenabstands ist von zentraler Bedeutung, da der Kolk bei zu engen Abständen sogar verstärkt werden kann.

Um einen guten Übergang in die anschliessenden Flussstrecken zu gewährleisten ist eine Übergangszone empfehlenswert. Im Labor wurde diese Strecke auf rund 10 Mal die mittlere Fliesstiefe gewählt. Der Rippenabstand wurde im Vergleich zum vorangehenden Abstand (von der Kurve her) jeweils mit dem Faktor $\sqrt{2}$ multipliziert, dies mit guten Resultaten.

Verdankung

Dieses Projekt wurde durch den Schweizerischen Nationalfonds für wissenschaftliche Arbeiten (SNF, Nr. 2100-052257.97/1 und 20-59392.99/1) und das Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG) finanziert. Die Daten von Peter (1986) wurden von der Versuchsanstalt für Wasserbau (VAW) der ETH Zürich zur Verfügung gestellt.

Literatur

Bridge, J. S. (1976). Bed topography and grain size in open channel bends, Sedimentology, Int. Association of Sedimentologists, 23, 407–414.

Engelund, F. (1974). Flow and bed topography in channel bends, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 100(11), 1631–1648, November 1974.

Engelund, F. (1976). Errata to «Flow and bed topography in channel bends», Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 102(3), 416–418, March 1976.

Falcon, A. M. & Kennedy, J. F. (1983). Flow in alluvial-river curves; Journal of Fluid Mechanics 133, 1–16.

Fargue (1868). Etude sur la corrélation entre la configuration du lit et la profondeur d'eau dans les rivières à fond mobile, Annales des ponts et chaussées, 1868 zitiert in Williams, R. (1899). Flussbefestigungen erläutert an einer Flussstrecke der weissen Elster sowie Beispiele zur Nachprüfung der Fargue'schen Gesetze mit Hilfe der Stossflächen, Verlag Wilhelm Engelmann, Leipzig, 66 pp.

Gairola, A. (1996). Finite element solutions of fluid flow with heat transfer past obstructions, Ph.D. thesis Nr. 247–667, Department of Civil Engineering, University of Roorkee, India, September 1996, 212 pp.

Hersberger, D. S. (2002a). Wall Roughness Effects on Flow and Scouring in Curved Channels with Gravel Bed, PhD thesis Nr. 2632, Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), Lausanne, Switzerland (http://library.epfl.ch/theses/?display=detail&nr=2632), auch publiziert als: Communication n° 14 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) de l'EPFL.

Hersberger, D. S. (2002b). Measurement of 3D flow field in a 90° bend with ultrasonic Doppler velocity profiler, Third International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, EPFL, Lausanne, Switzerland, September 9–11, 2002, pp. 59–66.

Hersberger, D. & Schleiss, A. (2002a). Scour formulae and their applicability to coarse gravel alpine rivers, Proceedings of River Flow 2002, September 4–6, 2002, Louvain-la-Neuve, Belgium, pp. 1031–1039, Ed: D. Bousmar & Y. Zech, A.A. Balkema Publishers, ISBN 90-5809-509-6.

Hersberger, D. & Schleiss, A. (2002b). Abschätzung der Kolktiefe entlang Uferschutzmauern in Flusskurven und Einfluss vertikaler Rauigkeitsrippen, Proc. Int. Symposium: Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau, VAW, ETH, Zürich, Band 2 (Mitteilung VAW Nr. 175), pp. 215–224.

Kikkawa, H., Ikeda, S. & Kitagawa, A. (1976). Flow and bed topography in curved open channels, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 102(9), 1372–1342, September 1976.

Kuster P., Jäggi, M. & Bezzola, G. R. (1992). Gurtnellen – Bericht über die Modellversuche für das Hochwasserschutzprojekt Gurtnellen-Wiler, Band 1 & 2 (Anhang), Raport 3977, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Eidgenössische Technische Hochschule (ETHZ), Zürich, Oktober 1992.

Odgaard, A. J. (1986). Meander flow model I: Development, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 112(12), 1117–1136.

Peter, W. (1986). Kurvenkolk – Untersuchungen über Sohlenausbildung in Flusskrümmungen, Mitteilung 85 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Eidgenössische Technische Hochschule (ETHZ), Zürich, Switzerland, 165 pp.

Reindl, R. (1994). Sohl- und Strömungsausbildung in einer Bodenfolge mit und ohne Rückstaueinfluss, Ph.D thesis, Institut für Wasserbau, Leopold-Franzens-Universität, Innsbruck, 174 pp.

Schleiss, A. (2000). Uferschutz an Gebirgsflüssen, wasser, energie, luft, Baden, Switzerland, 92. Jahrgang, 9/10, 271–280.

Schleiss, A. & Hersberger, D. (2001). Grain sorting process and scour in a curved channel with coarse gravel bed, Proceedings of the 29th IAHR Congress, September 16–21, 2001, Beijing, China, Theme D, Volume 2, 140–145.

van Bendegom, L. (1947). Eenige beschouwingen over riviermorphologie en rivierverbetering, De Ingenieur, 59(4), 1–11.

Zimmermann, C. & Kennedy, J. F. (1978). Transverse bed slopes in curved alluvial streams, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 105(1), 33–48.

Anschrift der Verfassser

Daniel Hersberger, Dr. dipl. Bauing. ETHL, 3. Rhonekorrektion, Dienststelle für Strassen und Flussbau (DSFB), Kanton Wallis, CH-1951 Sitten, Tel. 027 606 35 58; Fax 027 606 35 04, E-Mail: daniel.hersberger@admin.vs.ch

Anton Schleiss, Prof. Dr. Bauing. ETHZ, Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), CH-1015 Lausanne, Tel. 021 693 23 82, Fax 021 693 22 64, E-Mail: anton.schleiss@epfl.ch