



Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

REDUKTION DER KOLKE ENTLANG VON GEKRÜMMTEN UFERMAUERN DURCH ANORDNUNG VON VERTIKALEN RAUHIGKEITSRIPPEN

REDUCTION OF SCOUR ALONG CURVED RIVER BANK PROTECTION WALLS BY VERTICAL MACRO-ROUGHNESS ELEMENTS

Daniel Hersberger¹ und Anton Schleiss²

ZUSAMMENFASSUNG

Erste Erfahrungen bei Hochwasserschutzprojekten haben gezeigt, dass die Kolkiefen entlang gekrümmter Ufermauern sehr wirksam durch Anordnung von Makrorauhigkeitselementen vermindert und dadurch kostspielige Aushübe für tiefliegende Mauerfundamente vermieden werden können. Im Rahmen einer Forschungsarbeit wurden mit systematischen Laborversuchen die für die Praxis benötigten Bemessungsgrundlagen für solche Rauigkeitsrippen erarbeitet. Zudem wurden empirische, in einem breiten Bereich anwendbare Formeln für die Abschätzung der Kolkiefen entlang des Mauerfusses ermittelt. Dabei zeigte sich, dass die meisten bekannten Kolkformeln die Kolkiefen in Gebirgsflüssen mit grober und breiter Kornverteilung deutlich unterschätzen. Die an der Ufermauer befestigten Makrorauhigkeiten reduzieren die Kolktiefe sehr stark, das heisst bis zu 40 % gegenüber einer glatten Mauer. Die zwei ausgeprägten Kolklöcher einer 90° gekrümmten Mauer verschwinden praktisch vollständig, indem die Erosion gleichmässig über die Kurve verteilt wird.

Eine verbesserte empirische Kolkformel zur Abschätzung der maximalen Kolktiefe entlang einer gekrümmten Mauer für Gebirgsflüsse mit grober Sohle und breiter Kornverteilung wird vorgestellt. Im weiteren wird eine Beziehung angegeben, die die Berechnung der Kolktiefe in der Gegenwart von senkrechten Rippen erlaubt. Schliesslich werden praktische Empfehlungen hinsichtlich der optimalen Abstände der Rauigkeitsrippen sowie deren Tiefe und Form abgegeben.

Key words: Ufermauern, Kurvenkolk, Makrorauhigkeit, Gebirgsflüsse, breite Kornverteilung

¹ Dr. dipl. Bauing. ETH, 3. Rhonekorrektur, Dienststelle für Strassen und Flussbau (DSFB), Kanton Wallis, CH - 1951 Sitten, Tel.: +41-27-606 35 58; Fax: +41-27-606 35 04, email: daniel.hersberger@admin.vs.ch

² Prof. Dr. dipl. Bauing. ETH, Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), CH - 1015 Lausanne, Tel.: +41 21 693 23 82; Fax: +41 21 693 22 64; email: anton.schleiss@epfl.ch

ABSTRACT

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 for 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.

Key words: River bank protection walls, scour in bends, macro-roughness, mountain rivers, wide grain size distribution

EINFÜHRUNG

In engen Tälern des Alpenraumes durchqueren Flüsse häufig Siedlungsgebiete. Ufernahe Infrastrukturanlagen und Gebäude sind keine Seltenheit. Wegen den engen Platzverhältnissen muss die Hochwassersicherheit der Anlieger oftmals mit Ufermauern gewährleistet werden. Diese Ufermauern sind während extremen Hochwasserereignissen durch Unterkolkung gefährdet, insbesondere wenn sie sich in einer Flusskrümmung befinden. In der Vergangenheit wurde dieser Kolkgefahr mit einer genügenden Fundationstiefe begegnet.

Durch Anordnung von Makrorauigkeitselementen entlang von Ufermauern können die Kolkentiefe vermindert und dadurch kostspielige Aushübe für tiefliegende Mauerfundamente vermieden werden (Schleiss, 2000). Im Rahmen einer Forschungsarbeit (Hersberger, 2002a) wurden mit systematischen Laborversuchen die für die Praxis benötigten Bemessungsgrundlagen für solche Rauigkeitsrippen erarbeitet.

LABORVERSUCHE

Anordnung und Umfang der Versuche

Die Studie basiert auf Experimenten in einem 90° gekrümmten Kanal (Abbildung 1) mit einem Radius von 6 m, bei welchen das 3D-Geschwindigkeitsfeld, die Wasserspiegellagen, die Sohlentopographie, die Sedimentcharakteristika, die Kornverteilung der Deckschicht, der Abfluss sowie die Geschieberaten gemessen wurden. Die umfangreichen Tests decken ein weites Spektrum an Abflüssen, Gefällen bei recht hohen Froudezahlen, jedoch fließenden Strömungsbedingungen sowie verschiedenen Rippenabständen und -tiefen ab.

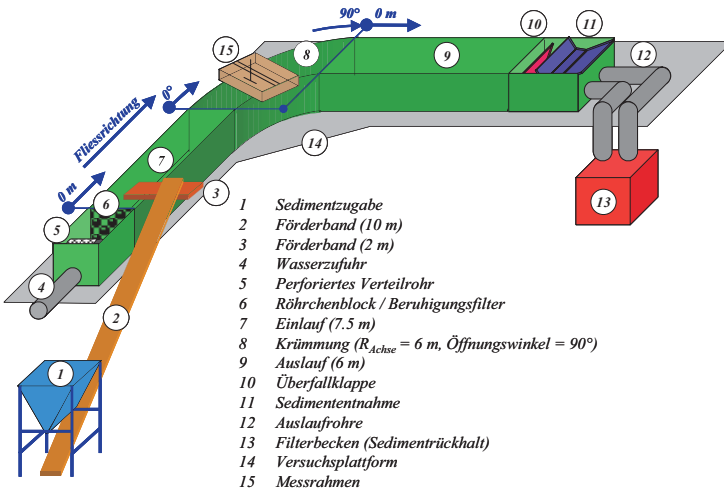


Abbildung 1: Schema der Versuchsanlage

Figure 1: The test scheme

Die Makrorauigkeit wurde durch senkrechte Rippen erzeugt (Tabelle 1), welche in Abständen von 1° (oder 114 mm), 2° (227 mm), 4° (454 mm) und 8° (908 mm) an der Aussenwand befestigt waren. Die ganze Kurve sowie der letzte Meter des Einlaufes und die ersten 2 m des Auslaufes wurden mit diesen 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 der über 50 in dieser Studie durchgeführten Versuche.

Tabelle 1: Überblick über die durchgeführten Versuche (* nur punktuelle Messungen)

Table 1: Overview over the performed tests (* only local measurements)

	ID	S_0 [%]	e_s [°]	e_d [mm]	Q [l/s]	Messungen			
						Wasser- spiegel	Sohle	Geschw.- feld	Korn- verteil.
Vor- versuche	A1	0.50	-	-	20...210	✓	✓	✓*	✓
	A2	0.50	2°	20	170...210	✓	✓	✓*	✓
Haupt- versuche	B1	0.50	-	-	70...210	✓	✓	✓	✓
	B2	0.50	4°	20	70...210	✓	✓	✓	✓
	B3	0.50	2°	20	70...210	✓	✓	✓	✓
	B4	0.50	1°	20	70...210	✓	✓	✓	✓
	C1	0.70	-	-	70...210	✓	✓	✓	✓
	C2	0.70	4°	20	70...210	✓	✓	✓	✓
	C3	0.70	2°	20	70...210	✓	✓	✓	✓
	C4	0.70	1°	20	70...210	✓	✓	✓	✓
	D1	0.35	-	-	70...210	✓	✓	✓	✓
	D2	0.35	4°	20	70...210	✓	✓	✓	✓
	D3	0.35	2°	20	70...210	✓	✓	✓	✓
	D4	0.35	1°	20	70...210	✓	✓	✓	✓
Ergänzende Versuche	E2	0.50	4°	40	70...210	✓	✓	✓	✓
	E3	0.50	2°	40	70...210	✓	✓	✓	✓
	E5	0.50	8°	40	70...210	✓	✓	✓	✓

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 zu 135° gekrümmten Kanal gemessen wurden.

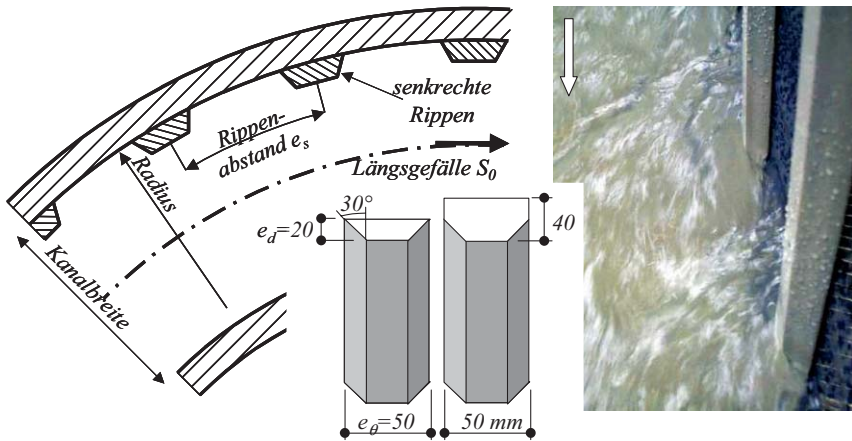


Abbildung 2: Anordnung und Geometrie der Makrorauhigkeit und Strömung um die Rippen
Figure 2: Placement and geometry of the macro-roughness and flow around the ribs

Erkenntnisse aus den Versuchen

Ohne Makrorauhigkeit 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 Kolkiefen wurden - speziell im zweiten Kolk - beobachtet.
- Den beiden Kolklöcher scheinen unterschiedliche Mechanismen zu Grunde 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.

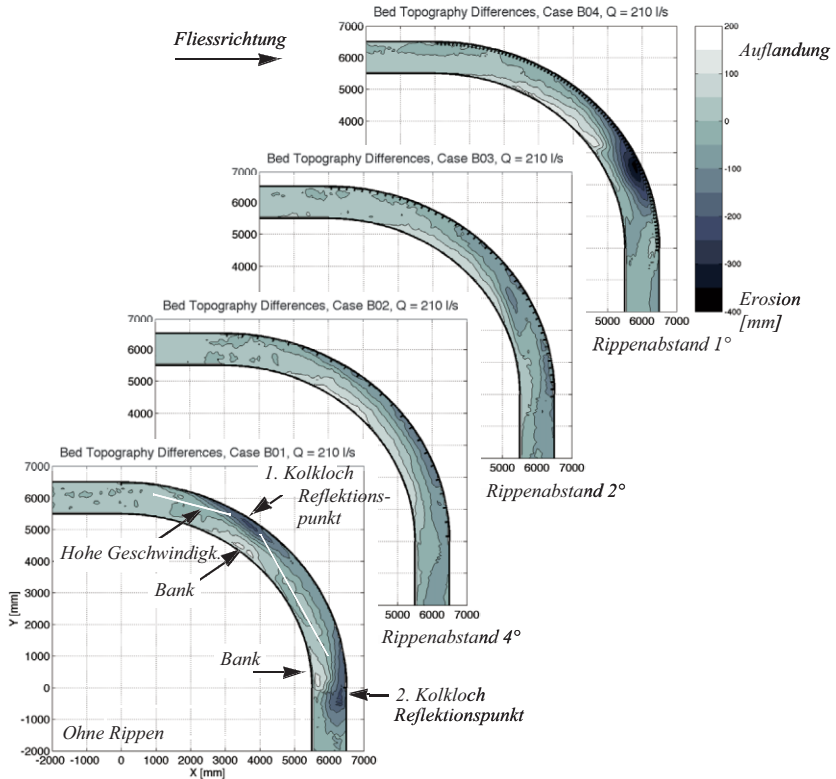


Abbildung 3: Vergleich der Sohlenlagen nach Versuchen mit $Q=210$ l/s bei einem Gefälle von 0.5%
Figure 3: Comparison of the bed topography after tests at $Q=210$ l/s at a bed slope of 0.5%

Durch Anbringen von senkrechten Rippen entlang der Kurvaussenseite können der Kolkprozess sowie die Strömung markant beeinflusst werden. Die Makrorauigkeit hat folgende Auswirkungen:

- Die Kolkentiefe entlang der Aussenwand wird stark reduziert und die ausgeprägten Kolklöcher verschwinden praktisch vollständig (Verteilung des Kolkes über die Krümmung, siehe Abbildung 3).
- Mit steigender Wandrauigkeit bewegt sich das erste Kolkloch flussabwärts, während das zweite ungefähr an gleicher Stelle verbleibt (Abbildung 3).
- 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 (detailliert in Hersberger, 2002b).
- Entlang der Aussenwand kann an der Wasseroberfläche eine sekundäre Strömungszelle (Abbildung 4, Zelle 2) beobachtet werden. Die Größe dieser Zelle ist proportional zur Reduktion der Kolkentiefe (siehe auch Hersberger, 2002b).

- Ein optimaler Rippenabstand ist von grosser Bedeutung, da ein schlecht gewählter Abstand die Kolkentiefe sogar vergrössern kann (Abbildung 3).
- Die Sedimenttransportkapazität wird durch die Rippen reduziert. In natürlichen Flüssen wird dies durch eine Zunahme des Gefälles kompensiert.
- 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. Einzig die Ausdehnung der groben Ablagerungen entlang der Aussenwand wird vergrössert (Schleiss & Hersberger, 2001).

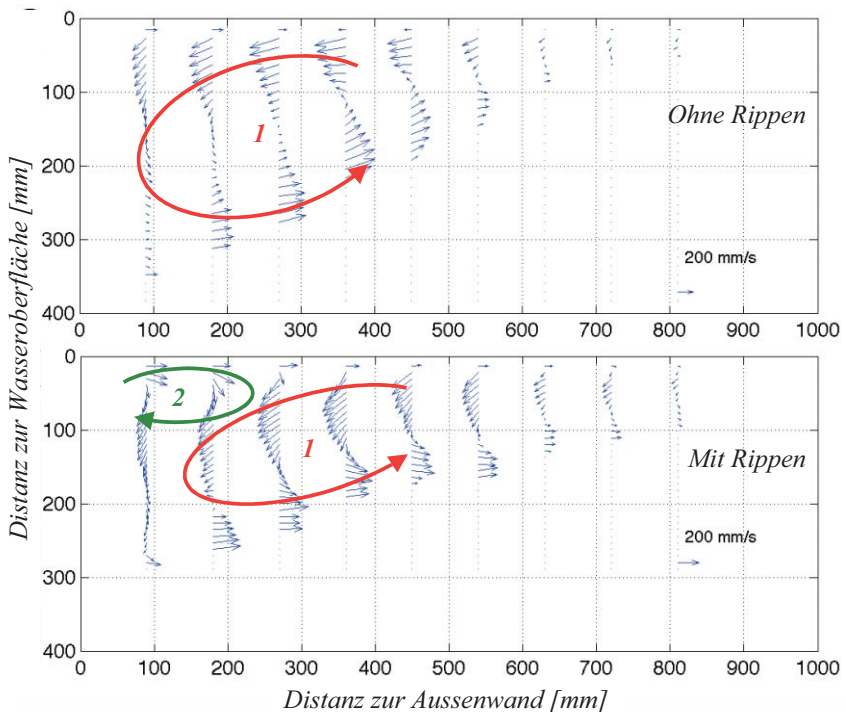


Abbildung 4: Sekundärströmung in ersten Kolk (in Fliessrichtung) 1: Hauptzelle, 2: Sekundärzelle
Figure 4: Secondary current (in flow direction) 1: main cell, 2: secondary bank protection cell

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

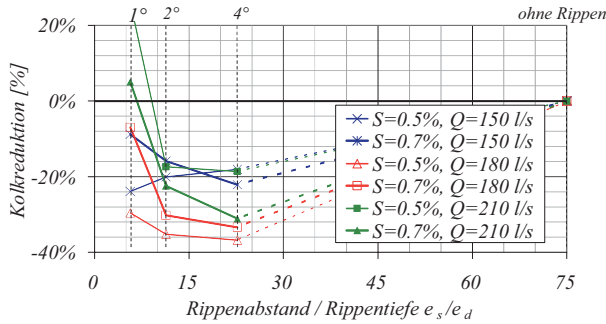


Abbildung 5: Reduktion der maximalen Kolktiefe
Figure 5: Reduction of the maximum scour depth

VERGLEICH DER VERSUCHSRESULTATE MIT BESTEHENDEN KOLKFORMELN

Ein Vergleich der Versuche mit bestehenden Kolkformeln zeigt, dass die meisten Beziehungen die Kolkentiefe für Gebirgsflüsse mit breiter Kornverteilung deutlich unterschätzen (Tabelle 2 und Hersberger & Schleiss, 2002a). So muss die maximale Kolkentiefe 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 Kolkentiefe. Im Mittel wurden die besten Resultate mit Bridges (1976) Formel erzielt, jedoch mit einer breiten Streuung. Dies ist ein Hinweis darauf, dass wesentliche Parameter nicht berücksichtigt worden sind.

Tabelle 2: Untersuchte Kolkformeln
Table 2: Tested scour formulae

Autor	Parameter	F_K	Grundprinzip	Bemerkungen Eichdaten
Fargue, 1868	R_c/B , Rauhgk., V	0.95	Analytisch, Moment auf Ufer und Sohle	Gibt nur die max. Kolkentiefe, Felddaten
Van Bendegom ¹ , 1947	Fr_d	2.3	Analytisch,	¹⁾ nur für kleine Längsgefälle,
Engelund ² , 1974/76	$7 \cdot \tan \phi = cst$	1.4	Gleichgewicht des	grosse B/h , $r \gg h$
Bridge, 1976	$11 \cdot \tan \phi = cst$	1.0	Korns	²⁾ nicht für voll entwickelte Strömung
Kikkawa et al., 1976	$Fr_d, V^*/V, n$	1.45	Analytisch,	Gs: Sedimentsättigungspara- meter,
Reindl, 1994	$Fr_d, V^*/V, n, Gs$	0.67*	Gleichgewicht des Korns, Geschwin- digkeitsverteilung	Labortests
Zimmermann al., 1978	Fr_d^2, n	2.4	Analytisch,	Für sandige Flachlandflüsse
Falcon Kennedy, 1983	Fr_d^2, n, θ, p	1.9	Gleichgewicht des	entwickelt,
Odgaard, 1986	Fr_d^2, n, θ	1.8	Kontrollvolumens	Labor- und Felddaten
Peter, 1986	$R_c/B, \sigma, h_m/B,$ Fr	0.85	Empirisch, Dimen- sionsanalyse	Geltungsbereich $R_c/B = 2 \div 6$ Labortests

L: Labortests /Lab tests, F: Felddaten/ Field data,

* Vergleich mit den Versuchsdaten dieser Studie / Comparison with performed tests

VORSCHLAG EINER VERBESSERTEN KOLKFORMEL

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.

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

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

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

Abbildung 6 zeigt, dass praktisch alle gemessenen Werte in einer Bandbreite von +/- 20% um die mit der Gleichung (2) berechneten Mittelwerte lagen

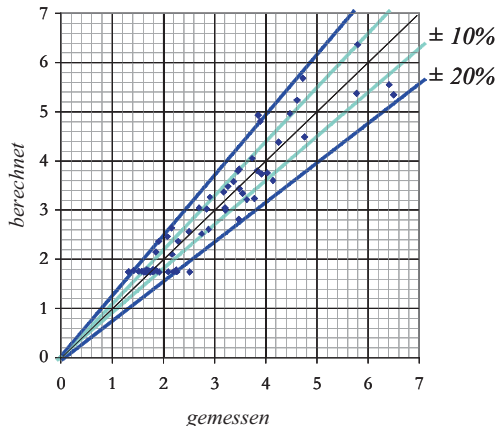


Abbildung 6: Vergleich der mit der Gleichung (2) berechneten Kolkstiefen mit den gemessenen Werten
Figur 6: Comparison between computed (equation 2) and measured maximum scour depth

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 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.

Die Positionen der maximalen Kolke (glatte Mauer) können mit folgenden Funktionen berechnet werden:

$$\alpha_1 = \sigma \cdot \left(\frac{R_c}{B} \right)^{0.58} \cdot \frac{B}{h_m} + 12.7 \cdot \frac{S_e}{\sigma - Fr} \left. \right\} + 1.4 \cdot Fr_d \cdot \frac{V}{V^*} - 6.6, R^2 = 0.83 \quad (3)$$

$$\alpha_2 = 12.6 \cdot Fr_d - 0.9 \cdot \left(\frac{R_c}{TM B} \right)^2 + 91.6, R^2 = 0.60 \quad (4)$$

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.

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 Gurtellen an der Reuss von einem Hochwasser heimgesucht. In der Folge wurden 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 Kolkentiefe gemessen. Da die Versuche auf die während dem Ereignis beobachteten Erosionstiefen geeicht wurden, wird die Anwendbarkeit hier anhand der Versuchsmessungen überprüft.

Die folgenden Werte wurden zur Überprüfung verwendet: $R_c = 110m$, $B = 30m$, $A = 150m^2$, $S_0 = 2.6\%$, $d_{90} = 0.60m$, $\sigma = 10$, $\phi = 38^\circ$, $V = 4m/s$, $Fr = 0.7$, $\theta = 0.110$, $\theta_{cr} = 0.047$, $e_s = 10m$, $e_d = 0.6m$ und $e_\theta = 1.8m$.

Zur Bestimmung der Wassertiefe im Oberwasser wurden der Wandeinfluss sowie die Staukurve berücksichtigt: $h_m = 5.0m$, $R_h = 4.3m$.

Mit diesen Werten lässt sich nun die Kolkentiefe 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 gemessenen Werten (mit Rippen $\eta = 10.9m$), unterschätzt die zweite Gleichung den Kolk. Wenn wir aber berücksichtigen, dass eine Unsicherheit von rund 20% bezüglich dem Mittelwert besteht, liegen die errechneten Resultate in der Bandbreite.

EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PRAXIS

Vor- und Nachteile der Rauigkeitsrippen entlang der Aussenwand

Senkrechte, an der Aussenwand angebrachte Rippen haben folgende Vorteile:

- Die maximale Kolkentiefe 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 Kolkentiefe werden massiv reduziert und verschwinden beinahe – speziell für hohe Abflussmengen (Reduktion der Unsicherheit bezüglich Kolkentiefe).
- Die Amplitude der stehenden Wellen wird auf rund die Hälfte reduziert. Gleichzeitig wird jedoch aufgrund des Energieverluste in der Kurve ein Ansteigen des mittleren Wasserspiegels beobachtet. Die beiden Phänomene halten sich jedoch in etwa die Wage, so dass 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.

Die senkrechten Rippen haben jedoch auch ihre Nachteile:

- Die Transportkapazität in der Kurve wird reduziert. 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.

Abschätzung der maximalen Kolktiefe

Werden bestehende Kolkformeln zur Berechnung der Kurvenkolks 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 Kolk-tiefe als auch den Sohlenverlauf im Querprofil des maximalen Kolks.

Bei Anwendung von senkrechten Rippen kann die maximale Kolk-tiefe mit der Gleichung (2) ermittelt werden.

Die Lage der maximalen Kolke kann mit den Gleichungen (3) und (4) 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.

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 Substrats empfohlen werden.

Die korrekte Wahl des Rippenabstands ist von zentraler Bedeutung, da der Kolk sonst 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, N° 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.

NOMENKLATUR

A	[m ²]	Profilquerschnitt
B	[m]	Profilbreite
d	[m]	charakteristischer Korndurchmesser der Unterschicht (Substrat)
e_d	[° oder m]	Rippentiefe (in radialer Richtung)
e_s	[° oder m]	Rippenabstand (Achse zu Achse)
e_ρ	[° oder m]	Länge der Rippen (in Fließrichtung)
F_K	[-]	Korrektionsfaktor der Formeln, um gemessene Kolkiefen zu erhalten
Fr	[-]	Froudezahl
Fr_d	[-]	Densimetrische Froudezahl
h_m	[m]	mittlere Abflusstiefe
n	[-]	Reibungskoeffizient (Zimmermann)
p	[-]	Porosität
Q	[m ³ /s]	Abflussmenge
R	[-]	Pearson Korrelationskoeffizient
R_c	[m]	Radius entlang der Kanalachse
R_h	[-]	Hydraulischer Radius
s	[-]	Relative Korndichte $s = \rho_s / \rho_w \approx 2.635$
S_0	[-]	Längsgefälle der Sohle
V, v	[m/s]	mittlere, resp. lokale Geschwindigkeit
V^*	[m/s]	Schubspannungsgeschwindigkeit
α_1, α_2	[°]	Position des ersten, zweiten Kolklochs (Öffnungswinkel zwischen Kurvenanfang und dem maximalen Kolk)
β	[°]	Querneigung der Sohle
ϕ	[°]	dynamischer Gleitreibungswinkel
θ	[-]	Shieldsparameter oder dimensionslose Schubspannung $\theta_{cr} = 0.047$
η	[m]	Kolktiefe (freier Wasserspiegel zu Sohlenlage)
σ	[-]	Breite der Kornverteilung $\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$

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>)
- 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 Kolkentiefe 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). Gurtellen - Bericht über die Modellversuche für das Hochwasserschutzprojekt Gurtellen-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 Sohlensausbildung 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 Strömungsbildung in einer Bodenfolge mit und ohne Rückstaufluss, *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