Einfluss von Makrorauigkeiten auf die Stabilität alpiner Gewässer

Autor(en): **Weichert, Roman / Bezzola, Gian Reto**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **94 (2002)**

Heft 9-10

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-939649

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Einfluss von Makrorauigkeiten auf die Stabilität alpiner Gewässer

Roman Weichert und Gian Reto Bezzola

Bild 1. Morphologie mit isolierten Blöcken an der Reuss.

Zusammenfassung

Der vorliegende Artikel stellt drei Ansätze vor, die sich mit der Berechnung des Fliesswiderstandes bzw. der Sohlenstabilität von Gebirgsflüssen und Wildbächen auseinander setzen. Diese Fliessgewässer zeichnen sich neben einem grossen Gefälle durch das Vorhandensein von Makrorauigkeiten aus, die bedeutenden Einfluss auf die Energiedissipation der Strömung besitzen.

Die Validität der vorgestellten Ansätze wird anhand eines ausgesuchten Abschnitts der Reuss geprüft.

1. Einleitung

Um Aussagen über das Gefahrenpotenzial von Naturgefahren treffen zu können, sind Gebietsbeurteilungen notwendig, die auf der Kenntnis der im Schadensfall massgebenden Prozesse basieren.

Bei der wasserbaulichen Beurteilung von Flussabschnitten hinsichtlich der Gefährdung durch Hochwasser spielt die Stabilität der Sohle eine entscheidende Rolle. Während sich die Sohlen von Gebirgsflüssen und Wildbächen bei mittleren Abflüssen durch eine hohe Stabilität auszeichnen, kann bei grossen Hochwasserereignissen die Belastungsgrenze der Sohle überschritten werden, infolgedessen grosse Geschiebemengen in kurzer Zeit mobilisiert werden können (Bezzola et al. 1991). Diese Feststoffumlagerungen bergen ein hohes Schadenspotenzial. So sind beispielsweise die während der Hochwasser im Herbst 2000 im Tessin und im Wallis entstandenen finanziellen Schäden zu etwa zwei Drittel auf Geschiebeumlagerungen zurückzuführen (BWG 2002). In Bereichen, in denen die Transportkapazität des Flusses nicht mehr ausreicht, das mobilisierte Feststoffvolumen weiterzuleiten, kommt es zu Auflandungen, die zu Ausuferungen und Überschwemmungen führen können (Bezzola et al. 1996). Insbesondere im Bereich von Ortschaften ist die Abflusskapazität von Wildbächen aufgrund kompakter, eingezwängter Querschnitte häufig begrenzt, sodass dort ein höheres Gefährdungsmass vorliegt (Jäggi und Abegg 1993; Bezzola et al. 1994).

Genauere Kenntnisse, bei welchen Abflüssen mit der Mobilisierung signifikanter Geschiebemengen zu rechnen ist, sind daher für die Gefahrenbeurteilung von Gebirgsflüssen und Wildbächen unerlässlich.

Reicht die Stabilität der natürlichen Sohle nicht aus, so werden technische Bauwerke eingesetzt, um die Tiefenerosion der Sohle zu verhindern. In steilen Bachabschnitten kommen dabei häufig Abstürze, Sperren, Blocksteinrampen und Schwellen zum Einsatz. Entgegen ihrer flussbaulichen Wirksamkeit werden diese Bauwerke häufig in gewässerökologischer Hinsicht nachteilig beurteilt. Hieraus entstand das Interesse, neue Verbauungskonstruktionen zu entwickeln, die den natürlichen Sohlenmorphologien nachempfunden sind.

Kenntnisse über Stabilität und hydraulische Wirksamkeit von morphologienahen Sohlenbauwerken sind dabei Voraussetzung, um eine sichere Dimensionierung durchführen zu können.

2. Morphologien steiler Fliessgewässer

Die Sohlen steiler Fliessgewässer zeigen meist eine ausgeprägte Tendenz zur Selbststabilisierung, indem sich unter hydraulischer Belastung grobe, strukturierte Deckschichten bilden, die bestimmten Mustern folgend eingeteilt werden können. Eine wegweisende Charakterisierung typischer Sohlenmorphologien in Gebirgsflüssen und Wildbächen findet sich in Schälchli (1991).

Im Blickfeld dieses Artikels stehen Gebirgsflüsse und Wildbäche, die sich im unverbauten Zustand durch grobe Kiessohlen auszeichnen, die mit Blöcken unterschiedlicher Grösse durchsetzt sind. Die beiden ersten im Folgenden dargestellten Modelle sind anwendbar auf Morphologien, bei denen die Blöcke zufällig in der Sohle verteilt sind (Bild 1). Diese Modelle werden mit dem Begriff Blockmodelle bezeichnet und basieren vornehmlich auf den Untersuchungen von Whittaker et al. (1988) sowie von Mirajgaoker und Charlu (1963) bzw. von Fenzl und Davis (1964). Die Untersuchungen von Whittaker et al. sind dabei für relative Abflusstiefen (entspricht dem Verhältnis der Abflusstiefe h zum äquivalenten Blockdurchmesser D) von $0{,}5<h/D<4$ und für Blockkonzentrationen von $nD^2<0{,}15$ anwendbar. Hierin ist D der Durchmesser einer Kugel mit gleicher Masse und n die oberflächliche Konzentration an Blöcken [Anzahl/m^2]. Dem Blockmodell von Fenzl und Davis liegen die Versuche von Mirajgaoker und Charlu mit relativen Abflusstiefen von $1{,}25<h/D<3{,}5$ und oberflächliche Konzentrationen an Blöcken von $0{,}05<nD^2<0{,}50$ zugrunde. Der betrachtete Gefällsbereich liegt

bei den Untersuchungen von Whittaker zwischen 0,1% und 5%; die Analysen von Fenzl und Davis basieren auf Messungen in einer 0,5% geneigten Rinne. Während Whittaker et al. Blöcke in beweglicher Umgebung untersuchten, betrachteten Mirajgaoker und Charlu Blöcke auf einer festen, glatten Sohle. Demzufolge sind neben Aussagen über den Fliesswiderstand in den Untersuchungen von Whittaker et al. zusätzlich Stabilitätsbetrachtungen möglich.

Das dritte Modell beschreibt den Fall, bei dem die Blöcke zu Stufen gruppiert sind und sich zwischen den einzelnen Blockstufen nur wenige grobe Blöcke finden (Stufen-Becken-Morphologie). Dieses Modell wird nachfolgend als Stufenmodell bezeichnet und basiert auf Untersuchungen von Egashira und Ashida (1991) im Gefällsbereich von 5% bis 7,5%.

Die vorgestellten Ansätze besitzen die Gemeinsamkeit, dass sie von der Annahme ausgehen, dass eine aus groben Blöcken und einem feineren Grundmaterial aufgebaute Sohle nicht als eine homogene Mischung betrachtet werden muss. Diesem Konzept entsprechend werden die Strömungsverluste unterschieden, je nachdem, ob sie durch die Körner der Sohle oder durch die Makrorauigkeiten verursacht sind. Die Verluste sind vor allem bedingt durch Wirbel, die sich in der Ablösungszone der Rauheitselemente bilden. Das Mass der Verluste ist abhängig von Höhe, Form, Anordnung und Dichte der Rauheitselemente. Der Gesamtverlust setzt sich gemäss dem beschriebenen Konzept aus Formverlusten, hervorgerufen durch die Makrorauigkeiten, sowie Verlusten an den rauen, vergleichsweise feineren Sohlmaterialien (Kornreibung) zusammen.

Die Untersuchungen von Whittaker et al. (1988) und Fenzl und Davis (1964) gehen von stationären, gleichförmigen Abflusszuständen aus (Normalabfluss). Aufgrund des extrem unregelmässigen Strömungsverhaltens werden in Gebirgsbächen jedoch kleinräumig nie Normalabflussbedingungen erreicht. Bei den beschriebenen Morphologien sind Periodizitäten im Strömungsmuster beobachtbar, sodass der Begriff des Normalabflusses weiter gefasst werden muss und als räumliches Mittel über eine gewisse Fliessstrecke zu verstehen ist.

3. Modellvorstellung der Schadensprozesse

Die in steilen Gebirgsflüssen vorhandenen Deckschichten besitzen bei mittleren Abflüssen ein sehr hohes Mass an Stabilität. Während grosser Hochwasserereignisse kann jedoch relativ plötzlich die Pflästerungsschicht grossflächig zerstört und Grundmaterial erodiert werden. Nur sehr grosse Blöcke mit genügend Masse vermögen in Ruhe zu bleiben und weiter in den Untergrund einzusinken. Eine allgemeine Bewegung der Sohle führt in der Regel zur Destabilisierung des Böschungsfusses, was Erosion und zusätzlichen lateralen Geschiebeeintrag hervorruft. Je nach den Widerständen des Uferbereichs und der Sohle passt sich das Gerinne bei noch grösseren Abflüssen durch eine fortschreitende Verbreiterung bzw. Eintiefung so lange an, bis das Transportvermögen des Abflusses vollständig gesättigt ist oder eine Breite erreicht ist, bei der die Beanspruchung der Sohle wieder dem kritischen Wert für den Erosionsbeginn entspricht.

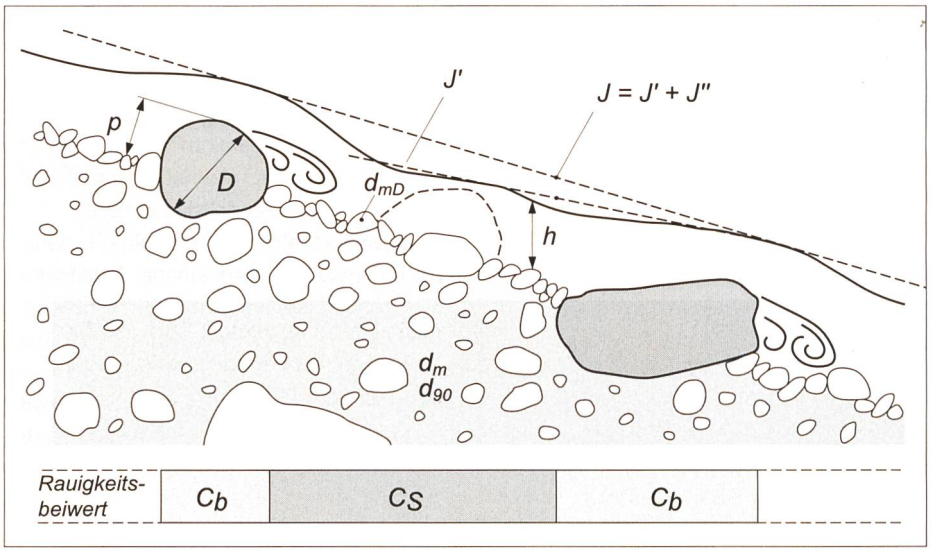

Bild 2. Morphologie mit isolierten Blöcken.

4. Blockmodelle

Die zur Abschätzung der Sohlenstabilität notwendigen hydraulischen Parameter sind in der Regel nur über eine vorgängige Abflussrechnung ermittelbar. Dies stellt in den meisten anwendbaren Verfahren ein wesentliches Problem dar, da die komplexe Fragestellung des Erosionswiderstands mit der nicht minder komplexen Fragestellung des Fliesswiderstands des Gerinnes gekoppelt werden muss.

Aufgrund des bimodalen Charakters der Kornverteilungen der hier betrachteten Sohlenmorphologien und des im Vorigen beschriebenen Konzepts des Aufteilens der Strömungsverluste in Kornrauigkeit und Formrauigkeit wird angenommen, dass der gesamte Fliesswiderstand der Sohle der Summe der vorhandenen Teilwiderstände entspricht. Es wird zwischen dem durch das Grundmaterial verursachten Teilwiderstand (Kornrauigkeit) und dem durch die als Makrorauigkeiten wirkenden Blöcke bzw. Sohlstufen verursachten Teilwiderstand (Formrauigkeit) unterschieden. Das Bild 2 zeigt ein schematisches Längenprofil eines charakteristischen Flussabschnitts. Aus den Bildern ist auch die Definition der wichtigsten, in den Berechnungsmodellen verwendeten Parameter ersichtlich.

Blockmodell nach Whittaker

Die Bestimmung der Beanspruchung des Grundmaterials erfolgt weitgehend nach Whittaker et al. (1988). Der Widerstand des Grundmaterials wird mit Hilfe des Shields-Ansatzes ermittelt. Der Einfluss der Deckschichtbildung auf die kritische Schubspannung des Grundmaterials wird nach Günter (1971) berücksichtigt. Die Abflussberechnung basiert auf dem Fliessgesetz nach de Chézy.

- *Abflussberechnung*

Für den Fliesswiderstand des Grundmaterials c_S wird nach Keulegan (1938) die Beziehung

$$c_S = \frac{v_m}{v'_*} = 2{,}5 \cdot \ln\left(\frac{12 \cdot R_S}{k_S}\right)$$

formuliert. Hierin ist v_m die mittlere Fliessgeschwindigkeit, v'_* die auf das Grundmaterial bezogene Schubspannungsgeschwindigkeit, R_s der hydraulische Radius des Sohlquerschnitts und k_s das massgebende Rauigkeitselement des Grundmaterials. Für k_s (äquivalentes Sandrauigkeitsmass) wird $1{,}5 \cdot d_{90}$ angesetzt.

Für den Fliesswiderstand der Blöcke c_b gilt:

$$c_b = \frac{v_m}{v''_*} = 2{,}5 \cdot \ln\left(\frac{12 \cdot R_S}{k_b}\right)$$

In dieser Gleichung stellt k_b das massgebende Rauigkeitselement der Blöcke dar und kann nach Whittaker et al. mit

$$k_b = n \cdot D^3 \cdot \left(17{,}8 - 0{,}47 \frac{h}{D}\right)$$

berechnet werden. Des Weiteren ist v''. die auf die Blöcke bezogene Schubspannungsgeschwindigkeit.

Der Gesamtwiderstand der Sohle c setzt sich dann wie folgt zusammen:

$$\frac{1}{c^2} = \frac{1}{c_S{}^2} + \frac{1}{c_b{}^2}$$

Mit der Kenntnis von c berechnet sich die mittlere Fliessgeschwindigkeit der Strömung zu

$$v_m = c \cdot v_* = c \cdot \sqrt{g \cdot R_s \cdot J}$$

Die Berücksichtigung des Wandeinflusses bei kompakten Gerinnen, d.h. die Berechnung des hydraulischen Radius des Sohlquerschnitts, erfolgt nach dem iterativen Verfahren nach Einstein (siehe z.B. Smart und Jäggi 1983). Für sehr breite Gerinne kann der hydraulische Radius R_S (bei gleichen Rauigkeiten von Wand und Sohle entspricht der hydraulische Radius dem Verhältnis aus Abflussquerschnitt zu benetztem Umfang) direkt durch die Abflusstiefe h ersetzt werden. Mit der Kontinuitätsgleichung folgt schliesslich $Q = v_m \cdot F$.

- *Stabilitätsberechnung*

Das reduzierte reine Reibungsgefälle J' ergibt sich zu

$$J' = J \cdot \left(\frac{c}{c_S}\right)^2$$

Die durch die Strömung auf das Grundmaterial ausgeübte Schleppkraft wird in der Form der dimensionslosen Schubspannung

$$\Theta = \frac{R_S \cdot J'}{(s-1) \cdot d_m}$$

bestimmt. Hierin bedeuten d_m der mittlere Durchmesser des Grundmaterials nach Meyer-Peter und Müller (1948) und $s = \rho_s / \rho_w$ die relative Feststoffdichte (bezogen auf die Dichte von Wasser).

Die Grenzschubspannung für eine Mischkornsohle unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung ist nach Günter (1971)

$$\Theta_{cD} = \Theta_c \cdot \left(\frac{d_{mD}}{d_m}\right)^{2/3}$$

wobei d_{mD} den massgebenden Korndurchmesser der Deckschicht und Θ_c die kritische dimensionslose Schubspannung für den Bewegungsbeginn eines Einkornmaterials mit dem Durchmesser d_m bezeichnen.

Die Kornverteilung der Deckschicht unmittelbar vor deren Aufbrechen kann nach Gessler (1965) oder Günter (1971) bestimmt und daraus d_{mD} ermittelt werden. Vereinfachend kann auch $d_{mD} \approx d_{90}$ gesetzt werden. Für Gefälle etwa bis zu 6% kann von einem konstanten Wert von $\Theta_c \approx 0{,}05$ ausgegangen werden.

Der Grenzzustand für die Stabilität der Deckschicht ist erreicht, wenn die auf das Grundmaterial wirkende Schubspannung die Grenzschubspannung für das Aufbrechen der Deckschicht erreicht, also $\Theta \geq \Theta_{cD}$ ist.

Die Stabilität der Blöcke kann aufgrund eines einfachen Gleichgewichtsmodells für den Grenzzustand des Abkippens abgeschätzt werden. Hierbei wird das Momentengleichgewicht um den Auflagerpunkt des Blocks in seiner Umgebung betrachtet. Dabei verbleibt jedoch eine gewisse Unsicherheit bezüglich der Grösse der auf einen solchen Block wirkenden hydrodynamischen Kräfte. Diese werden in Funktion der massgebenden Anströmgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Expositionsbedingungen (angeströmte Fläche) und entsprechenden Formbeiwerte ermittelt. In Gebirgsflüssen liegt die Abflusstiefe in der gleichen Grössenordnung wie die Durchmesser der Blöcke. Unter diesen Bedingungen kann die massgebende Geschwindigkeit durch die mittlere Geschwindigkeit angenähert werden.

Aus dem Momentengleichgewicht ergibt sich eine Aussage über die Stabilität der Blöcke für gegebene Abflusstiefen h (bzw. Abflussmengen Q) bzw. über die kritische, mittlere Geschwindigkeit für den Bewegungsbeginn der Blöcke.

Blockmodell nach Fenzl und Davis

Dieses Modell unterscheidet sich vom Blockmodell nach Whittaker dadurch, dass der durch die Blöcke verursachte Teil des Fliesswiderstands nicht mit einem logarithmischen Ansatz, sondern mittels eines Potenzansatzes nach Fenzl und Davis (1964) berechnet wird. Analog zum Blockmodell nach Whittaker wird dieser Ansatz durch eine Stabilitätsbetrachtung erweitert. Hierbei wird der Widerstand des Grundmaterials wiederum mit Hilfe eines Shields-Ansatzes ermittelt. Der Einfluss der Deckschichtbildung wird nach Günter (1971) berücksichtigt. Der durch die Blöcke verursachte Anteil des Fliesswiderstands ist durch die Beziehung

$$c_b = \frac{v_m}{v_*''} = 1{,}736 \cdot (p \cdot \sqrt{n})^{-1{,}029} \cdot (n \cdot h^2)^{0{,}227}$$

gegeben. Darin bedeuten p die Höhe des exponierten Teils der Rauigkeitselemente (Blöcke) in [m] und n die oberflächliche Konzentration an Blöcken [Anzahl/m²].

Für alle übrigen Punkte der Berechnung sei auf das Blockmodell nach Whittaker verwiesen.

5. Stufenmodell

Dieses Modell basiert auf dem Ansatz von Egashira und Ashida (1991) zur Bestimmung des Fliesswiderstands von Stufen-Becken-Sequenzen (Bild 3), wobei das Fliessgesetz nach Darcy-Weisbach die Grundlage der Abflussberechnung bildet.

Der Fliesswiderstand des Grundmaterials in den Abschnitten zwischen den Blockstufen ergibt sich zu:

$$f_S = \frac{8}{[6{,}0 + 2{,}5 \cdot \ln(R_S / k_S)]^2}$$

Für den Formwiderstand der Blockstufen gilt

$$f_\Delta = 4 \cdot K \cdot E_n \cdot \frac{\Delta}{R_S}$$

In obiger Gleichung stellen dabei K und E_n empirische Konstanten dar, für die Werte von $K = 6{,}0$ und $E_n = 0{,}08$ angegeben werden. Mit Δ wird die Stufenhöhe bezeichnet.

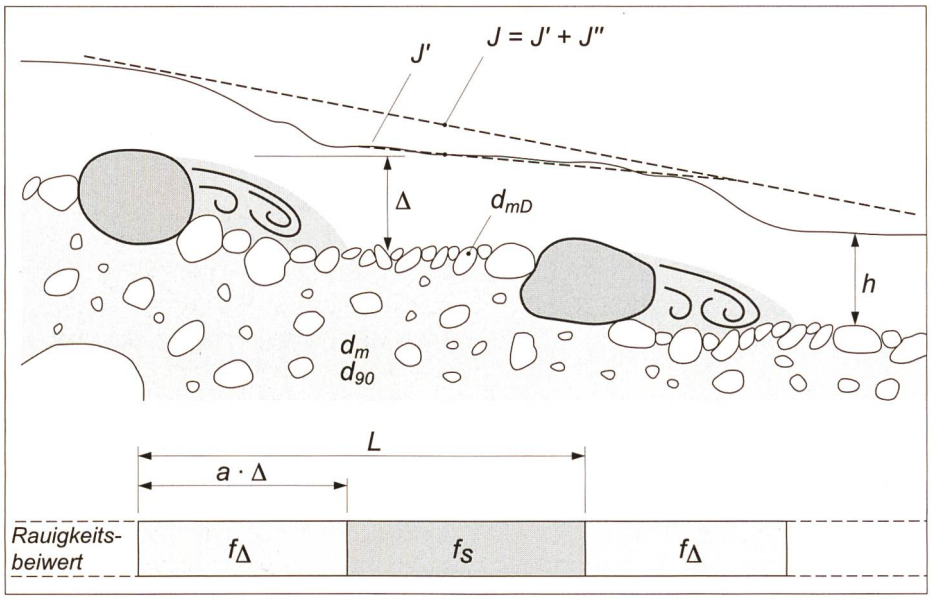

Bild 3. Morphologie mit zu Stufen gruppierten Blöcken.

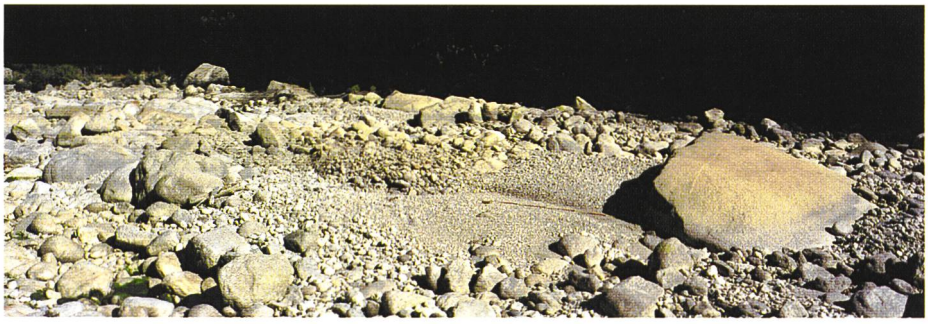

Bild 4. Abschattungseffekt von Makrorauigkeiten.

Der Gesamtwiderstand der Sohle bestimmt sich zu

$$f = (\frac{a \cdot \Delta}{L}) \cdot f_\Delta + (1 - \frac{a \cdot \Delta}{L}) \cdot f_S$$

Hierin ist a das Verhältnis zwischen der Länge der Ablösungszone im Unterwasser der Stufe und der Stufenhöhe. L ist der Stufenabstand.

Die Bestimmung des Werts für den Parameter a ist häufig relativ heikel. Von Egashira und Ashida (1991) wird ein Wert von 2,5 angegeben. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Ergebnisse relativ empfindlich auf die Wahl dieses Parameters reagieren. Es lohnt sich daher je nach den morphologischen Verhältnissen des Fliessgewässers, eine geeignete Variation des Parameters a durchzuführen.

Einen Hinweis auf die Grössenordnung der Ablösungszone im Unterwasser der Stufe kann der in der Abschattung von Makrorauigkeiten auftretende Sortiereffekt des Geschiebes geben (Bild 4). Beim Abklingen eines Hochwasserereignisses bzw. bei mittleren Abflüssen werden auf der stabilen Deckschicht Feinmaterialien transportiert, die sich im Strömungsschatten der Stufen ablagern. Die Ausdehnung der Zone mit Feinmaterialien kann einen Hinweis auf die Länge der Ablösungszone im Zusammenhang mit dem Abflussereignis geben.

Die Gleichung zur Bestimmung des Gesamtwiderstands f gilt für einen einheitlichen Strömungszustand über der Stufen-Becken-Abfolge (strömend oder schiessend). Bei kleineren Abflüssen stellen sich dagegen Strömungszustände ein, die zu zusätzlichen Verlusten durch Wechselsprünge in den Becken führen. Für diesen Fall muss die Gleichung um einen Term erweitert werden und lautet dann

$$f = (\frac{a \cdot \Delta}{L}) \cdot f_\Delta + (1 - \frac{a \cdot \Delta}{L}) \cdot f_S + \frac{8 \cdot \delta H}{Fr^2 \cdot L}$$

Hierin sind Fr die Froude-Zahl und δH der Energieverlust durch den Wechselsprung. Die mittlere Fliessgeschwindigkeit wird wiederum mit $v_m / v_* = \sqrt{8/f} = c$ berechnet. Die Berechnung von δH ist aufgrund der variablen Strömungsverhältnisse in Gebirgsbächen schwierig. Da sich die Froude-Zahlen in Gebirgsbächen und -flüssen im Bereich von 0,5 bis 1,5 bewegen, ist die Energiedissipation in den Wechselsprüngen gering (Ven te Chow 1988) und in erster Annahme kann der letzte Term zur Berücksichtigung wechselnder Strömungszustände vernachlässigt werden.

Für kompakte Gerinne (Berücksichtigung des Einflusses der seitlichen Berandungen) erfolgt die Abflussberechnung auch beim Stufenmodell iterativ nach Einstein. Die Verbindung des Stufenmodells mit dem in den Blockmodellen verwendeten Stabilitätsansatz liefert keine plausiblen Resultate. Die Ursache liegt in den anders gearteten Mechanismen für den Erosionsbeginn in Stufen-Becken-Morphologien. Die Erkundung der massgebenden Zerstörungsmechanismen ist zurzeit Gegenstand einer Forschungsarbeit an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.

6. Ansatz nach Palt

Anhand von Naturmessungen in pakistanischen Gebirgsflüssen leitet Palt (2001) einen Ansatz zur überschlägigen Bestimmung des Rauigkeitsbeiwerts nach Strickler für den Abfluss über Stufen-Becken-Morphologien ab.

$$k_{St} = \frac{26}{\sqrt[6]{d_{90}}} \cdot 0{,}1 \cdot J^{-0{,}36}$$

Diese Gleichung gilt für die von Palt erhobenen Daten für eine mittlere Wasserführung. Bei Niedrigwasser und für bordvollen Abfluss wird empfohlen, den Rauigkeitsbeiwert nach Strickler um 30% zu verringern bzw. zu erhöhen. Die Gültigkeit dieses Ansatzes wird für Gefälle $J > 0{,}2\%$ angegeben.

Fliessgewässer mit ausgeprägten Stufen-Becken-Morphologien zeichnen sich durch eine sehr breite Kornverteilung aus, d.h. es sind von sehr kleinen Körnern bis hin zu Blöcken, deren Durchmesser wenige Meter betragen können, alle Korngrössen vorhanden. Die Bestimmung des massgebenden Korndurchmessers d_{90} ist stark abhängig von der Einbeziehung der Blöcke in eine Gesamtkornverteilung. Die Charakterisierung der Rauigkeit über d_{90} ist daher mit Unsicherheiten behaftet.

7. Fallbeispiel

Die vorgestellten Ansätze basieren auf der Annahme von Normalabflusszuständen, wie sie eingangs für Gebirgsbäche definiert wurden. Im Berechnungsbeispiel wurde daher ein Gerinneabschnitt ausgewählt, für den entsprechender Normalabfluss angenommen werden kann.

Die direkte Berechnung eines kritischen Abflusses mit den dargestellten Blockmodellen unter Berücksichtigung der Wandrauigkeiten erfordert eine doppelt iterative Berechnung. In dem folgenden Beispiel soll daher zum besseren Verständnis der Wandeinfluss unberücksichtigt bleiben, sodass für die direkte Bestimmung des Grenzabflusses noch eine einfache Iteration erforderlich ist. Eine Variante, diese Iteration zu umgehen, besteht darin, für verschiedene Abflusstiefen h die Abflussberechnung durchzuführen und die Beanspruchung der Sohle in Form der dimensionslosen Schubspannung Θ zu be-

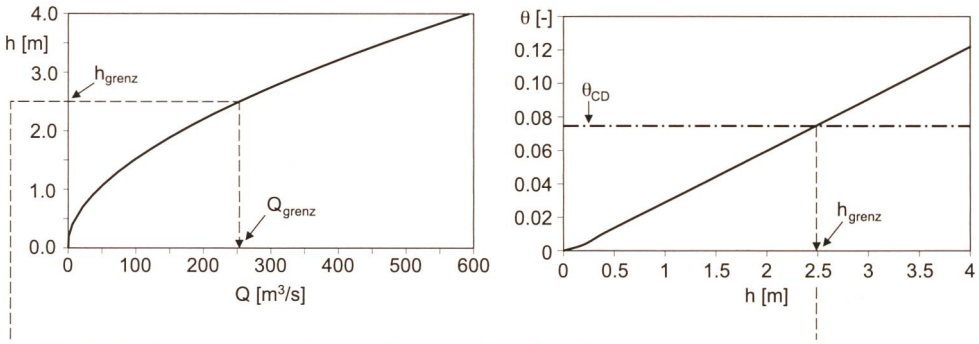

Bild 5. Bestimmung des Grenzabflusses ohne Iteration.

B_{Sohle}	d_m	d_{90}	d_{mD}	D	p	n	J
20 m	0,35 m	0,90 m	0,70 m	2,50 m	0,6 D	0,006 Bl./m²	3,7 %

Tabelle 1. Parameter für die Berechnung mit den Blockmodellen am Beispiel der Reuss bei Göschenen.

stimmen. Parallel werden in Abhängigkeit der Wassertiefe h die Gleichungen zur Betrachtung der Stabilität angewendet. Anhand der funktionalen Zusammenhänge zwischen h und Q bzw. zwischen h und Θ lässt sich daraus der Grenzabfluss ermitteln (Bild 5).

Reuss

In Tabelle 1 sind die charakteristischen Grössen der Reuss im Bereich von Göschenen angegeben. Für die hier gezeigte Berechnung wurde vereinfachend von einem Rechteckquerschnitt ausgegangen. Der Wandeinfluss bleibt unberücksichtigt. Die Berechnungen mit den Blockmodellen 1 und 2 ergeben Grenzabflüsse für das Einsetzen der Erosion des Grundmaterials von 240 m^3/s bis 250 m^3/s. Der Grenzabfluss für den Bewegungsbeginn der Blöcke liegt bei etwa 470 m^3/s.

Vor dem Hochwasser von 1987 wies die Reuss bei Göschenen eine Breite von rund 20 m auf. Diese Breite ergab sich durch die Umgestaltung im Zusammenhang mit der Deponie des Ausbruchsmaterials des Gotthard-Strassentunnels in den Jahren 1970 bis 1976. Vor 1970 wies die Reuss bei Göschenen eine Breite von rund 25 m bis 30 m auf. Für diese ursprüngliche Breite errechnet sich der Grenzabfluss für die Erosion des Grundmaterials zu rund 350 m^3/s. Während des Hochwassers von 1987 verbreiterte sich das Gerinne auf 30 m bis 40 m. Für diese Breite resultiert ein Wert für den Grenzabfluss von 450 m^3/s bis 550 m^3/s.

Zwischen 1910 (Beginn der Abflussmessung an der Reuss) und 1970 wurden nur in den Jahren 1916 und 1939 Abflüsse zwischen 350 m^3/s und 400 m^3/s erreicht. Diese Abflusswerte entsprechen ziemlich genau dem Grenzabfluss für die Gerinnebreite vor dem Bau der Nationalstrasse und zeigen, dass das Gerinne der Reuss vor dessen Umgestaltung im Zusammenhang mit dem Bau des Gotthardtunnels durch die Spitzenabflüsse während der ersten 70 Jahre des 20. Jahrhunderts geprägt war.

Zwischen 1970 und 1987 betrugen die maximalen Abflussspitzen knapp 200 m^3/s (1977 und 1981) und waren damit deutlich kleiner als der berechnete Grenzabfluss von 240 m^3/s bis 250 m^3/s für die in dieser Zeit vorhandene Gerinnebreite von 20 m.

Das Hochwasser von 1987 wies einen Spitzenabfluss von etwa 470 m^3/s auf. Dieser Abfluss stimmt wiederum relativ gut mit dem rechnerisch abgeschätzten Grenzabfluss für die nach dem Hochwasser vorhandene Gerinnebreite überein.

Der Vergleich der Berechnungen mit der Hochwassergeschichte der Reuss zeigt somit, dass die Betrachtungen mit den Blockmodellen sehr zutreffende Ergebnisse liefern.

8. Schlussfolgerungen

Die Notwendigkeit, quantitative Aussagen über die Stabilität von Fliessgewässern im Steilbereich von 3% bis 30% zu treffen, leitet sich direkt aus den zahlreichen Schadensfällen der Vergangenheit ab. Im Gefällsbereich unter 0,5% existieren Berechnungsverfahren, die auf der Erhöhung der Sohlenstabilität eintiefungsgefährdeter Flussabschnitte durch eine künstliche Anreicherung der Sohle mit grösseren Blöcken basieren. In den Berechnungsansätzen für diese Modelle wird die Erhöhung der Sohlenstabilität dabei einzig vom Belegungsgewicht [t/m^2] der Sohle mit grösseren Blöcken abhängig gemacht (Hartlieb 1999, Lichtenhahn 1977).

Die Untersuchungen des Reuss-Mittellaufs zeigen, dass die dargestellten Blockmodelle für Sohlen mit verteilten Blöcken sowohl für die Berechnung des Fliesswiderstands als auch für die Stabilität der Sohle brauchbare Ergebnisse liefern. Daraus kann geschlossen werden, dass ein Modell, welches eine Trennung des Sohlenmaterials in zwei Komponenten vornimmt, nämlich in vergleichsweise feineres Grundmaterial, in welches die groben Blöcke eingebettet sind, plausible Resultate liefert. Die Unterteilung des Sohlenmaterials in diese beiden Komponenten hat den Vorteil, dass die für eine rechnerische Betrachtung des Problemkreises Fliesswiderstand und Erosionsbeginn benötigten Parameter einfach und auf eine relativ objektive Art und Weise erhoben werden können.

Die Stabilität der Blöcke kann aufgrund eines einfachen Gleichgewichtsmodells für den Grenzzustand des Abkippens abgeschätzt werden. Dabei verbleibt jedoch eine gewisse Unsicherheit bezüglich der Grösse der auf einen solchen Block wirkenden hydrodynamischen Kräfte.

Das Stufenmodell und der Ansatz nach Palt können je nach den angetroffenen Verhältnissen stark unterschiedliche Resultate ergeben. Dabei besitzt das Stufenmodell insofern Vorteile, als dass innerhalb der Berechnung die Stufen-Becken-Morphologie Berücksichtigung findet und somit das Fliesswiderstandsverhalten dieser Morphologien besser beschrieben wird. Demgegenüber steht, dass der Ansatz Parameter enthält, deren Bestimmung Schwierigkeiten bereitet. Der Ansatz nach Palt zeichnet sich durch eine grosse Anwenderfreundlichkeit aus, die jedoch auf Kosten einer unzureichenden Beschreibung der physikalischen Begebenheiten gewonnen wird. Zudem bestehen bei den in Stufen-Becken-Morphologien vorhandenen breiten Kornverteilungen Unsicherheiten bei der Bestimmung des charakteristischen Korndurchmessers d_{90}.

Mit den dargestellten Modellen lassen sich lediglich Aussagen über den Fliesswiderstand treffen. Die Stabilität von Stufen-Becken-Morphologien ist von Mechanismen zum Erosionsbeginn geprägt, über die noch Unklarheiten bestehen. Aus diesen Unsicherheiten resultiert die Notwendigkeit, Bemessungsgrundlagen für die den natürlichen Morphologien nachempfundenen Bauwerke zu erarbeiten.

Literatur

Bezzola, G.R.; Abegg, J.; Jäggi, M. (1994): «Saltinabrücke Brig-Glis», Schweizer Ingenieur und Architekt, 112 (11), 165–169.

Bezzola, G.R.; Hunziker, R.; Jäggi, M. (1991): «Flussmorphologie und Geschiebehaushalt im Reusstal während des Ereignisses vom 24./25. August 1987», Ursachenanalyse der Hochwasser 1987, Mitteilung des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, Nr. 4, Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 14, Bern, 101–105.

Bezzola, G.R.; Schilling, M.; Oplatka, M. (1996): «Reduzierte Hochwassersicherheit durch Geschiebe», Schweizer Ingenieur und Architekt, 114 (41), 886–895.

BWG (2002): «Hochwasser 2000 – Les crues 2000. Ereignisanalyse und Fallbeispiele», Berichte des BWG, Serie Wasser, Nr. 2, Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Bern.

Chow, Ven te (1988): «Open Channel Hydraulics», McGraw-Hill, Boston.

Egashira, S.; Ashida, K. (1991): «Flow Resistance and Sediment Transportation in Streams with Step-Pool Bed Morphology», Armanini, A. D. S., G., Lecture Notes in Earth Sciences, Springer-Verlag, Berlin, 45–58.

Fenzl, R.N.; Davis, J.R. (1964): «Discussion of ‹Natural Roughness Effects in Rigid Open Channels›», Proc. ASCE Journal of Hydraulic Division, 90, HY3, 351–359.

Gessler, J. (1965): «Der Geschiebetriebbeginn bei Mischungen untersucht an natürlichen Abpflästerungserscheinungen in Kanälen», Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau, Heft 69, ETH Zürich.

Günter, A. (1971): «Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungen», Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Heft 3, ETH Zürich.

Hartlieb, A. (1999): «Offene Deckwerke – eine naturnahe Methode zur Sohlstabilisierung eintiefungsgefährdeter Flussabschnitte», Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Heft 85, TU München.

Jäggi, M.; Abegg, J. (1993): «Cimavilla-Brücke, Poschiavo», Schweizer Ingenieur und Architekt, 111 (16–17), 295–298.

Keulegan, G.H. (1938): «Laws of turbulent flow in open channels», U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Journal of Research of the National Bureau of Standards, 21, 707–741.
Lichtenhahn, C. (1977): «Flussbau», Autographie, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
Meyer-Peter, E.; Müller, R. (1948): «Formulas for bedload transport».
Mirajgaoker, A.G.; Charlu, K.L.N. (1963): «Natural Roughness Effects In Rigid Open Channels», Journal of Hydraulic Division, HY 5, 9, 29–44.
Palt, S.M. (2001): «Sedimenttransportprozesse im Himalaya-Karakorum und ihre Bedeutung für Wasserkraftanlagen», Dissertation, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe.
Schälchli, Ueli (1991): «Morphologie und Strömungsverhältnisse in Gebirgsbächen: ein Verfahren zur Bestimmung der Restwasserabflüsse», Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Heft Nr. 113, ETH Zürich.
Smart, G.M.; Jäggi, M. (1983): «Sedimenttransport in steilen Gerinnen», Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 64, ETH Zürich.
Whittaker, J.G.; Hickman W.E.; Croad R.N. (1988): «Riverbed Stabilisation With Placed Blocks», Central Laboratories Report, 3–88/3, Hydraulics Section, Central Laboratories Works Corporation, Lower Hutt, New Zealand.

Anschriften der Verfasser
Roman Weichert, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zentrum, CH-8092 Zürich, Tel. 01 632 57 17.
Dr. *Gian Reto Bezzola*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zentrum, CH-8092 Zürich, Tel. 01 632 40 99.

Expo.02: Trockene Füsse dank Juragewässer-Korrektion

■ *Jörg Amsler*

Mit der Expo.02 rückte eine schöne, unverwechselbare und interessante Region der Schweiz in den Blickpunkt des Interesses. Die Idee einer Landesausstellung im Grenzgebiet der deutschen und der französischen Sprache in Verbindung mit Wasser, Wasserläufen und Seen ist bestechend. Nebst den kulturellen Aspekten ist die Kulturtechnik in dieser Umgebung nicht minder interessant. Sie ist ein eindrückliches Beispiel für die Thematik der Arbeiten der Fachleute der SIA-Berufsgruppe Boden/Wasser/Luft und soll an dieser Stelle näher betrachtet werden. Wer die Weite der Landesausstellung, des Seelandes und damit der Juragewässer-Korrektion in sein Bewusstsein eindringen lassen möchte, dem sei ein Aufstieg auf den Mont-Vully empfohlen, der höchsten Erhebung im Zentrum von Bieler-, Murten- und Neuenburgersee (Bild 1).

Bild 1. Panorama vom Mont Vully aus: links der Neuenburgersee, rechts der Jolimont, im Hintergrund links der Chaumont und rechts der Chasseral.

«Solothurnersee»

Hätte die Expo.02 vor 15000 Jahren geplant werden müssen, wären die Arteplages vielleicht bei Solothurn, bei La Sarraz, bei Payerne und auf dem Mont Vully entstanden! In jener Zeit erstreckte sich nämlich der «Solothurnersee» von Wangen a.A. über die Orbe-Ebene bis zur Wasserscheide von Rhein und Rhone bei La Sarraz sowie hinein in die Broye-Ebene bis nach Payerne. Den Stau bei Wangen a.A. verursachte die Endmörane, welche der Rhonegletscher während der vierten und letzten Eiszeit deponiert hatte. Der Wasserspiegel dieses riesigen Sees lag mit 480 m ü.M. rund 50 m über jenem der heutigen drei Seen. Somit hätte einzig der schwimmende Kubus bei Murten am heutigen Standort verankert werden können, allerdings hätte sich durch die Öffnungen in seiner Mitte ein etwas anderer Ausblick auf die Landschaft geboten.

Armut, Seuchen und Epidemien

Nach Dutzenden von Überschwemmungskatastrophen wurden ab 1704 verschiedene wasserbauliche Projekte ausgearbeitet. Da den Überschwemmungen immer Epidemien folgten und die Sterblichkeit im Seeland besonders gross war, gründete der Arzt Dr. Johann Rudolf Schneider 1831 in Nidau ein Komitee zur Verwirklichung der notwendigen Gewässerkorrektion. Die Aare floss damals von Aarberg nach Büren und überflutete die umliegenden Gebiete häufig. Heute noch ist der frühere Lauf als «alte Aare» mit dem Kanu befahrbar.

Die Erste Juragewässer-Korrektion

Der Bündner Oberingenieur La Nicca legte im März 1842 sein erstes Projekt vor. Als radikalsten Punkt beinhaltete es die direkte Einleitung der Aare von Aarberg in den Bielersee (Bild 2), um dessen Speichervolumen ausnutzen zu können. Trotz Anfeindungen sowie politischen und finanziellen Schwierigkeiten wurden die Arbeiten der Ersten Juragewässer-Korrektion von 1868 bis 1891 durchgeführt. Einen Tag vor der offiziellen Eröffnung des Hagneck-Kanals (vorgesehen am 17. August 1878) floss, bedingt durch ein Unwetter, das erste Mal Wasser durch den neuen Kanal in den Bielersee. Mit dem Bau des Nidau-Büren-Kanals wurden der Bielersee und damit auch der Neuenburger- und der Murtensee um ca. 2,5 m abgesenkt. Dadurch wurde die Petersinsel vollends zur Halbinsel, nachdem sie vorher nur bei tiefem Wasserstand einigermassen trockenen Fusses erreicht werden konnte. Bei Port wurde 1878 ein einfaches Regulierwehr erstellt, um zu verhindern, dass der Wasserspiegel des Bielersees in Trockenperioden zu tief abfiel. Wegen beschränkter Funktionsfähigkeit musste es allerdings 1940 ersetzt werden.

Die «Königsidee» der Ersten Juragewässer-Korrektion beinhaltete eigentlich die gleichzeitige Nutzung der Speicherkapazität des Bieler-, Murten- und Neuenburgersees als «Einheitssee». Die knappen Durchflusskapazitäten des Zihl- und Broyekanals verhinderten vorerst deren vollständige Realisierung.

Wehr Port als Kernstück

Das Wehr Port ist das Kernstück der Regulierung der drei Jurarandseen. Das Ungenügen des alten Bauwerkes führte zur Projektierung eines leistungsfähigen neuen Wehres, welches als erste Massnahme zur Zweiten Juragewässer-Korrektion gilt und mit Kosten von 4,3 Mio. Franken von 1936 bis 1940 erstellt wurde. Die Schleusen werden auch heute noch von Bern aus «handferngesteuert». Der