**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
**Band:** 98 (2006)
**Heft:** 3

**Artikel:** Beurteilung der Sohlenstablität von Gebirgsbächen
**Autor:** Weichert, Roman / Bezzola, Gian Reto / Minor, Hans-Erwin
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-939352

**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:** 10.07.2025

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

# Beurteilung der Sohlenstabilität von Gebirgsbächen

Roman Weichert, Gian Reto Bezzola, Hans-Erwin Minor

**Zusammenfassung**

*Der vorliegende Artikel stellt einen neuen Ansatz zur Beurteilung der Sohlenstabilität steiler Gerinne vor. Die Sohlen steiler Gerinne sind gekennzeichnet durch strukturierte Längsprofile mit groben Deckschichten, die bei kleinen und mittleren Abflüssen eine grosse Stabilität besitzen. Für die Beurteilung von Naturgefahren durch steile Fliessgewässer ist insbesondere von Interesse, bei welchen Abflüssen die Stabilität der Sohle erreicht wird und welche Prozesse bei einer Überschreitung der Stabilitätsgrenze auftreten. Der im vorliegenden Artikel beschriebene Ansatz gibt dabei den Zusammenhang zwischen der Belastung, der Sohlenmorphologie und der Tiefenerosion der Sohle.*

**Summary**

*The present paper outlines a new approach for assessing bed stability in steep open channels. Steep open channels, as mountain streams and torrents, are characterised by coarse, structured armour layers that possess a high stability at low and intermediate discharges. However, at large, infrequent flood events, bed scour due to a destruction of the structured armour layer is possible. As eroded sediment often causes hazardous situations when it is transported into populated areas, the new approach links the channel bed degradation with the occurring discharges and the existing bed morphology.*

## 1. Einleitung

Die Analysen der Hochwasserereignisse der letzten Jahre zeigten, dass Schadensprozesse in steilen Fliessgewässern häufig mit der Mobilisierung und Ablagerung von Sedimenten in Verbindung stehen (*Bild 1*). So sind beispielsweise für das Hochwasser 2000 im Kanton Wallis und Tessin zwei Drittel der entstandenen Schäden (Kosten) auf Prozesse zurückzuführen, die mit Geschiebe in Verbindung stehen (BWG 2002). Auch bei dem Hochwasser im August 2005 haben Prozesse mit Geschiebe eine wesentliche Rolle für die Gesamtschadenssumme von 2,5 Milliarden Franken gespielt. Im Zusammenhang mit dem Schutz vor Naturgefahren ist daher die Beurteilung der Sohlstabilität steiler Fliessgewässer von zentraler Bedeutung. Sie liefert nicht nur Aussagen über die Mobilisierung von Material aus der Sohle, sondern ist ebenso für die Beurteilung der Stabilität der Seitenhänge wichtig.

Der vorliegende Artikel befasst sich mit der Sohlenmorphologie und Stabilität kleiner und mittelgrosser Bäche im Gefällsbereich von ca. 3–15%. Die Sohlen dieser Fliessgewässer zeigen meist eine ausgeprägte Tendenz zur Selbststabilisierung, indem sich unter hydraulischer Belastung grobe, strukturierte Deckschichten bilden, die häufig als Stufen-Becken-Sequenzen beschrieben werden. Bei grossen Hochwasserabflüssen kann die Belastungsgrenze dieser Deckschichten überschritten werden, in Folge dessen grosse Geschiebemengen in kurzer Zeit mobilisiert werden können. Anhand von Laboruntersuchungen an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich ist das Stabilitätsverhalten solcher Sohlendeckschichten genauer untersucht worden. Im Folgenden werden Resultate dieses Forschungsprojekts vorgestellt. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um einen neuen Ansatz, mit dessen Hilfe sich die während eines grösseren Hochwasserereignisses resultierenden Sohlenerosionen in Abhängigkeit der Belastung quantifizieren lassen.

## 2. Morphologie steiler Gerinne

Die Längsprofile steiler Gerinne zeichnen sich häufig durch Abfolgen steilerer und flacherer Fliessgewässerabschnitte aus, die in verschiedenen geomorphologischen Skalen (*Bild 2*) beobachtet werden können (Leopold et al. 1964, Grant et al. 1990).

In der kleinsten Skala (Mikro-Skala) wird der einzelne, kleine Stein betrachtet. Die Gruppierung der grösseren Sohlenelemente resultiert in den schon angesprochenen Stufen-Becken Morphologien (steps and pools – Meso-Skala). Eine Charakterisierung typischer mesoskaliger Sohlenmorphologien in Ge-

***Bild 1. Geschiebeablagerungen im Schächen nahe der Mündung in die Reuss während des Hochwasserereignisses 2005, Kanton Uri (Foto: Kanton Uri).***

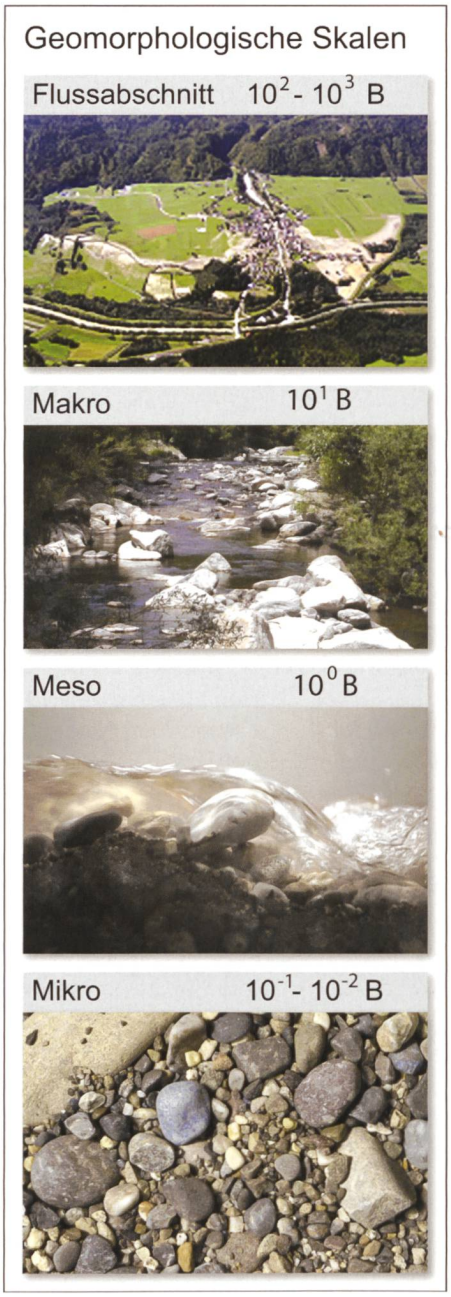


***Bild 2. Geomorphologische Skalen mit typischer Ausdehnung in Längsrichtung, B: Gerinnebreite.***

birgsflüssen und Wildbächen findet sich z.B. in Schälchli (1991). Abfolgen steileren und flacheren Gefälles in der Makro-Skala stehen häufig mit Bankstrukturen in Verbindung und werden in der Literatur als Schnellen-Hinterwasser-Sequenzen (riffles and pools) bezeichnet (z.B. Leopold et al. 1964, Knighton 1984). In der Flussabschnitts-Skala wird das Gefälle durch übergeordnete Fixpunkte im Fliessgerinne bestimmt, wie etwa durch Felsaufschlüsse oder lokale Erhöhungen der Sohlrauigkeiten durch seitlichen Geschiebeeintrag aus Rutschungen oder Zuflüssen.

Das Auftreten dieser geomorphologischen Skalen in der Natur hängt von dem komplexen Zusammenspiel einer Vielzahl von Parametern wie etwa der Gerinnebreite, dem Sohlenmaterial, dem Sohlgefälle und dem spezifischen Abfluss ab. Dabei sind alle Kombinationen der Skalen in der Natur beobachtet und beschrieben worden.

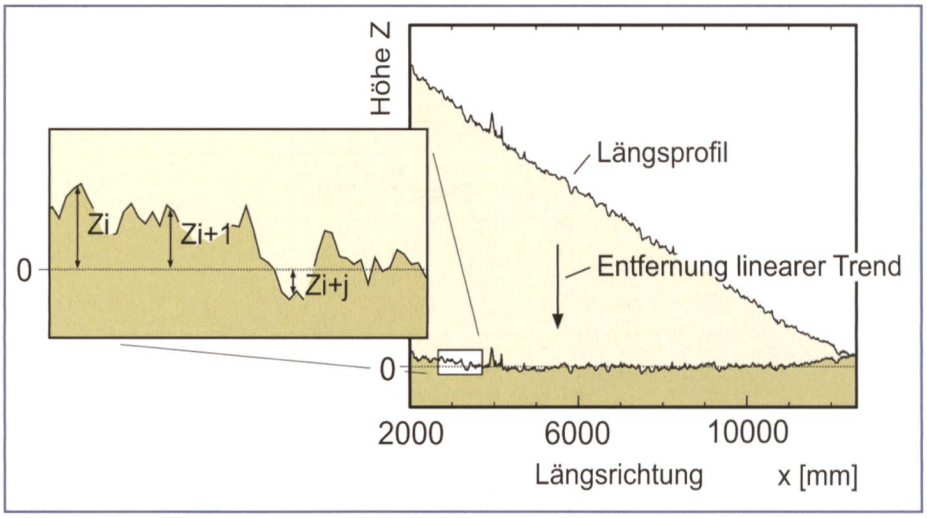


***Bild 3. Bestimmung der Standardabweichung der Rauigkeitserhebungen mit vorgehender Entfernung des linearen Trends.***

Das Erfassen der Rauigkeiten einer Flusssohle ist eine wesentliche Voraussetzung für eine adäquate Beschreibung der relevanten physikalischen Prozesse. In Mittellandflüssen hat sich dabei die Verwendung eines charakteristischen Korndurchmessers des Untergrundmaterials als praktikabel und vernünftig erwiesen. Im Gegensatz zu den Verhältnissen in Mittellandflüssen sind die Fliesstiefen in steilen Gerinnen in derselben Grössenordnung wie die Rauigkeitselemente der Sohle. Dieses bewirkt einen grossen Einfluss der Sohle auf die Strömung. Die Verwendung eines charakteristischen Korndurchmessers ist daher für diese Fliessgewässer nicht mehr zweckmässig, da nicht die Grösse des Korns, sondern die Rauigkeitsstruktur ausschlaggebend ist. Des Weiteren ist die Zusammensetzung der Sohle in steilen Fliessgewässern nicht zwangsläufig ein Abbild des Untergrundmaterials, da in der Regel der seitliche Eintrag von Sediment und Holz eine wichtige Rolle spielt. Aufgrund der grossen Korndurchmesser in Wildbächen sind zudem der Anwendbarkeit der in Mittellandflüssen bewährten Methoden zur Beprobung der Sohle Grenzen gesetzt (Weichert et al. 2004).

Eine Möglichkeit die Rauigkeitsstruktur in Wildbächen zu beschreiben, ist die Standardabweichung der Rauigkeitserhebungen *s* (Aberle 2000). Grundlage zur Berechnung der Standardabweichung ist ein Längsprofil. Ausgehend von diesem Längsprofil wird den Daten der lineare Trend, d.h. das übergeordnete Gefälle des Gerinneabschnitts, entzogen (*Bild 3*).

Daraus resultiert ein Rauigkeitsprofil, dessen Werte um das Nullniveau schwanken. Ausgehend von den Daten dieses Profils lässt sich die Standardabweichung wie folgt berechnen:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} (z_i - z_m)^2} \qquad (1)$$

Hierin ist $n$ die Anzahl an Messpunkten, $z_i$ ist die Rauigkeitshöhe $z$ an der Stelle $i$ und $z_m$ ist der Mittelwert der Rauigkeitshöhen.

Die Resultate der in diesem Artikel beschriebenen Modellversuche haben gezeigt, dass die Messung der Standardabweichung in der Natur im Minimum über einer Länge von etwa $20d_{max}$ entlang des Talwegs erfolgen sollte (Weichert 2006). Da der maximale Blockdurchmesser in der Natur häufig sehr heterogen verteilt ist, wird empfohlen, die grössten stufenbildende Steine als Referenz für $d_{max}$ zu verwenden.

## 3. Stabilität steiler Gerinne

Ausgehend von den Erkenntnissen, dass sich die Struktur von Wildbachsohlen gut mit der Standardabweichung der Rauigkeitserhebungen beschreiben lässt, untersuchte Aberle (2000) die Sohlstabilität steiler Fliessgewässer anhand von physikalischen Modellversuchen. Anhand seiner Untersuchungen lässt sich der kritische spezifische Abfluss, bei dem die Stabilität der Sohle erreicht ist, mit der folgenden Gleichung berechnen:

$$q_c = \sqrt{g \cdot s^3} \cdot 0.2 \cdot J^{-1.3} \qquad (2)$$

Darin ist $q_c$ der kritische, spezifische Abfluss [$m^3$/sm], $g$ ist die Erdbeschleuni-

| $d_{16}$ [m] | $d_{50}$ [m] | $d_{84}$ [m] | $d_{90}$ [m] | $d_{max}$ [m] | $d_m$ [m] | σ [-] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.002 | 0.006 | 0.019 | 0.026 | 0.045 | 0.010 | 3.1 |

*Tabelle 1. Charakteristische Korndurchmesser der verwendeten Kornverteilung.*

| Gefälle [%] | $B_f$=15 cm | $B_f$=30 cm | $B_f$=60 cm |
|---|---|---|---|
| 5 | - | $Q_{max}$ = 8-15 l/s | $Q_{max}$ = 10-18 l/s |
| 9 | - | $Q_{max}$ = 5 - 8 l/s | $Q_{max}$ = 2 - 8 l/s |
| 10 | $Q_{max}$ = 1.5-5.5 l/s | - | - |
| 13 | - | $Q_{max}$ = 2 - 6 l/s | $Q_{max}$ = 2 - 7 l/s |

*Tabelle 2. Rinnengefälle, Rinnenbreiten sowie Bereich der untersuchten Abflüsse.*

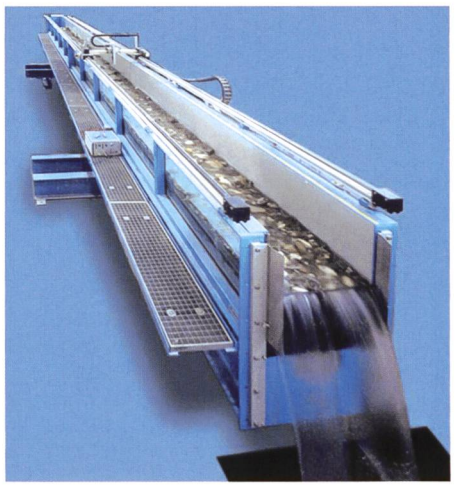

***Bild 4. Modellrinne im Versuch: Im Bild zu sehen ist auch das Positioniersystem, an dem Laser (zur Bestimmung der Sohlentopographie) und Ultraschall (zur Aufnahme des Wasserspiegels) angebracht sind.***

gung [m/s$^2$], $s$ ist die Standardabweichung der Rauigkeitserhebungen [m] und $J$ ist das übergeordnete Sohlgefälle [-].

Anhand dieser Formel lässt sich der kritische spezifische Abfluss bestimmen, bei dem ein Grenzwert für die Stabilität der Sohle erreicht wird. Das bedeutet, dass mit Gleichung (2) zwei Zustände idealisiert erfasst werden, in dem sich die Sohle befinden kann:

- die Sohle ist stabil für $q < q_c$
- die Sohle ist instabil für $q > q_c$

Im Sinne der Beurteilung von Naturgefahren ist der zweite Zustand von zentraler Bedeutung. Der im Folgenden beschriebene, neue Ansatz befasst sich mit der Fragestellung, was passiert, wenn die Stabilität der Sohle überschritten wird. Hierbei steht insbesondere das Selbststabilisierungspotenzial von Wildbachsohlen im Vordergrund.

## 4. Physikalische Modellversuche

An der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich wurden physikalische Modellversuche in einer in ihrer Neigung verstellbaren, 13,40 m langen Rinne durchgeführt (Bild 4). Die in den Modellversuchen verwendete Sedimentmischung entsprach in etwa der Kornverteilung des Steinibachs bei Giswil im Kanton Obwalden in einem Massstab von 1:20 (*Tabelle 1*). Damit konnte gewährleistet werden, dass sich unter hydraulischer Belastung eine wildbachtypische Sohlenmorphologie ausbildete. Neben der Kornverteilung der Sohle spielt die Rinnenbreite $B_f$ eine wesentliche Rolle. Das Verhältnis zwischen Rinnenbreite und maximalem Korndurchmesser bewegte sich in den Versuchen zwischen 3,3 und 13,2.

Das homogen durchmischte Material mit bekannter Kornverteilung wurde zunächst in einer bestimmten Mächtigkeit in die Rinne eingebracht. Ausgangszustand der Versuche war dann eine ebene Sohle mit einer Schwelle am Rinnenende, die als Fixpunkt diente. Im Folgenden wurde der Abfluss schrittweise erhöht, bis sich eine wildbachtypische Sohlenmorphologie einstellte. Nachdem sich eine strukturierte Sohle in der Rinne gebildet hatte, wurde der Abfluss über etwa 12–15 Stunden konstant gehalten. Nach vollständigem Abklingen der Erosionsprozesse wurde der Abfluss reduziert und die Sohle vermessen. Die Stufen-Becken-Abfolgen wurden hinsichtlich ihrer Grundrissform klassifiziert.

Da der Rauigkeitsstruktur eine entscheidende Rolle für den Fliesswiderstand und der Stabilität der Stufen-Becken Systeme zukommt, lag ein Schwerpunkt der Messungen auf einer detaillierten Erfassung der Sohlentopographie. Zu diesem Zweck wurde die Sohle im trockenen Zustand in einem engen Raster von einem automatischen Lasermesssystem abgetastet. Nach Beendigung der Messungen wurde der Abfluss so weit erhöht, bis eine Zerstörung der Deckschicht beobachtet werden konnte. Da der Fokus der Untersuchung auf dem Restabilisierungspotenzial von Wildbächen lag, war das Verhältnis des neuen Abflusses $q_{neu}$ (für den eine Destabilisierung auftrat) zum alten Abfluss $q_{alt}$ (für den die Sohle noch stabil war), relativ klein ($q_{neu}/q_{alt}$ = 1,10–1,25). Der neue Abfluss wurde wierderum solange konstant gehalten, bis sich die Sohle restabilisierte. Im Anschluss wiederholte sich der beschrie-

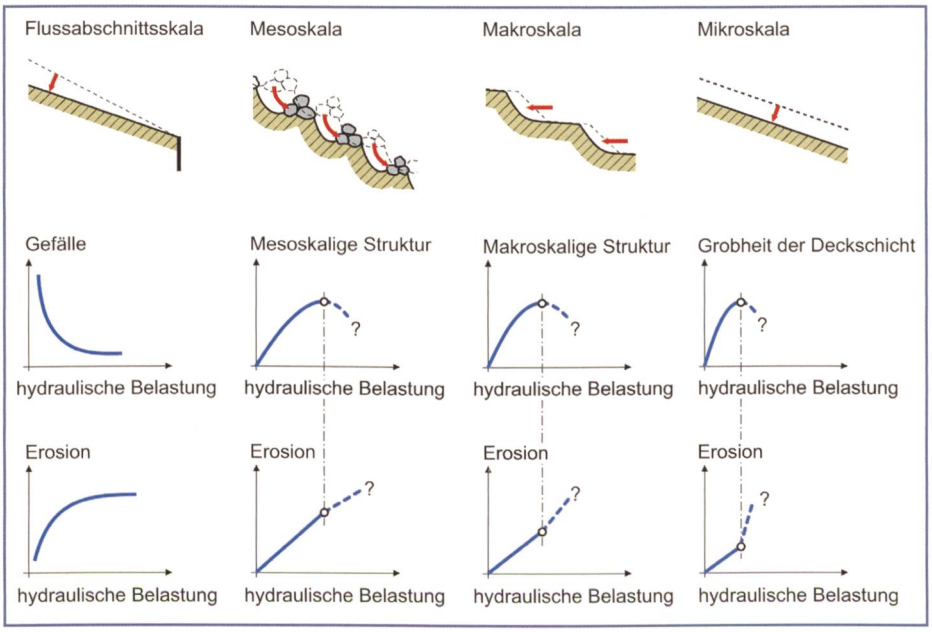


***Bild 5. Idealisierte Darstellung der Selbststabilisierungsmechanismen in den verschiedenen geomorphologischen Skalen.***

bene Versuchszyklus. Dieses Prozedere wurde beendet, wenn die Sohlenerosionen den Rinnenboden erreichten. In *Tabelle 2* sind die Versuchsparameter bezüglich des untersuchten Gefällsbereichs, der Rinnenbreiten $B_f$ und der Abflüsse dargestellt.

## 5. Konzept des skalenabhängigen Selbststabilisierungspotenzials

Der in diesem Artikel später vorgestellte neue Ansatz basiert auf der Überlegung, dass die Sohlen von Wildbächen ein Selbststabilisierungspotenzial in jedem der in *Bild 2* dargestellten, verschiedenen geomorphologischen Skalen besitzen. Diese skalenabhängigen Prozesse sind schematisch in *Bild 5* dargestellt und werden im Folgenden näher erläutert.

In der Mikroskala entspricht das Selbststabilisierungspotenzial dem aus Mittellandflüssen bekannten Abpflästerungsprozess. Unter hydraulischer Belastung werden zunächst die sohlennahen, feineren Komponenten ausgewaschen, was zur Ausbildung einer groben Deckschicht führt. Die maximal gröbste Kornverteilung der Deckschicht ist dabei im Wesentlichen eine Funktion der Kornverteilung des Untergrundmaterials. Für Mittellandflüsse mit grösseren relativen Überdeckungen existieren verschiedene Ansätze (z.B. Gessler 1965, Günter 1971 oder Fehr 1987). Die maximal gröbste Deckschicht wiederum ist direkt mit dem Zustand der maximalen Stabilität verbunden. Die Entwicklung der Sohle ausgehend von einer unbelasteten hin zu einem Zustand der maximalen Stabilität ist mit gewissen Eintiefungen verbunden.

Die Makroskala ist gekennzeichnet durch wechselseitig am Gerinnerand auftretende Bänke sowie Abfolgen von Schnellen-Hinterwasser-Sequenzen. In dieser Skala ist das Selbststabilisierungspotenzial durch eine Anpassung der makroskaligen Struktur gegeben. Während bei grösseren Gerinnebreiten eine mäanderähnliche Linienführung des abflussführenden Gerinnes beobachtet werden konnte, nahm der Einfluss der makroskaligen Strukturen mit steigender Belastung ab. Mit steigendem Abfluss erodierten die Bänke und es lag eine gestreckte Linienführung des Abflusses vor. Zudem flachten sich insbesondere die Schnellenbereiche ab, was zu einer Gefällsangleichung der Schnellen sowie Hinterwasserabschnitte führte. Bei grossen Abflüssen waren die Schnellen-Hinterwasser-Sequenzen verschwunden und die Selbststabilisierung wirkte nur noch auf dem Niveau der Meso- und Flussabschnitts-Skala. In der Meso-Skala findet die Selbststabilisierung durch die Ausbildung von Sohlenformen, d.h. Stufen-Becken-Abfolgen statt. In Analogie zur Deckschichtbildung strebt die Sohle einem Zustand maximaler Stabilität entgegen, der durch eine entsprechende Sohlengeometrie gekennzeichnet ist. Unter hydraulischer Belastung bildeten sich dabei verschiedene Stufentypen und Konfigurationen aus, was anhand der Auswertungen der Modellversuche gezeigt werden konnte (Weichert 2006).

Ist das Selbststabilisierungspotenzial in der Mikro-, Meso- und Makro-Skala ausgeschöpft, so kann sich bei gleichbleibenden Abflussbedingungen die Sohle nur durch Rotationserosion um einen Fixpunkt, d.h. aufgrund einer Reduktion des Gefälles anpassen. Dieser Prozess entspricht dabei dem Selbststabilisierungspotenzial in der Flussabschnittsskala.

Entgegen der obigen, schematischen Darstellung zeichnen sich die in der Natur auftretenden Prozesse durch eine komplexe Interaktion zwischen den einzelnen Skalen aus. So lassen sich zum Beispiel der mikroskalige und der mesoskalige Selbststabilisierungsmechanismus nicht trennen, da die Ausbildung verschiedener Stufentypen sowie die Deckschichtbildung direkt voneinander abhängen.

Wie im Vorigen beschrieben, lässt sich die Sohlenstruktur in der Meso-Skala gut durch die Standardabweichung der Rauigkeitserhebungen erfassen. Darauf basierend wird mit Gleichung (2) sowie *Bild 6* das prinzipielle Konzept des neuen Ansatzes abgeleitet. *Bild 6* zeigt die Gleichung (2) von Aberle (durchgezogene Linie). Der dimensionslose, spezifische Abfluss $q^*$ ist dabei wie folgt definiert:

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{g \cdot s^3}} \qquad (3)$$

wobei $q$ der spezifische Abfluss [$m^3$/sm], $g$ die Erdbeschleunigung [$m/s^2$] und $s$ die Standardabweichung [m] bedeuten.

Punkte auf dem Graphen in *Bild 6 a* entsprechen Randbedingungen (spezifischer Abfluss, Gefälle, Rauigkeitsstruktur) für die die Sohle stabil ist (Punkt 1). Wird nun der Abfluss erhöht (Punkt 2), findet ein Destabilisierungsprozess statt. Hierbei ist anzumerken, dass der Punkt 2 nur kurz erreicht wird, d.h. eine Anpassung des Systems setzt unmittelbar ein. Bei gleichbleibendem Abfluss kann sich, entsprechend Gleichung (2), die Sohle nur restabilisieren, wenn entsprechend der Darstellung in *Bild 6 b* entweder das Gefälle abnimmt (Punkt 3 a) oder die Standardabweichung zunimmt (Punkt 3 b). Tatsächlich wirken die skalenabhängigen Mechanismen jedoch nicht unabhängig voneinander. Der realistische Fall ist daher derjenige bei dem sowohl das Gefälle ab- als auch die Standardabweichung zunimmt (Punkt 3 c). Diese Interaktion zwischen den meso- und flussabschnittsskaligen Prozessen gibt beispielhaft das komplexe Zusammenspiel der skalenabhängigen Selbststabilisierungsmechanismen wieder, der wie folgt beschrieben werden kann. Betrachtet sei ein Gewässerabschnitt für den das mesoskalige Selbststabilisierungspotenzial ausgeschöpft ist. Für grosse Abflüsse, die zu einer Destabilisierung der Sohle führen, kann sich die Sohle demnach nur restabilisieren, indem sich das Gefälle verringert. Bei konstantem Abfluss ist ein verringertes Gefälle gleichbedeutend mit einer Abnahme der hydraulischen Belastung auf die Sohle. Unter diesen Bedingungen können die mesoskaligen Prozesse nun wiederum wirken, d.h. mit dem abgeflachten Gefälle können sich wiederum Stufen-Becken-Abfolgen bilden. Dieses trägt zur Restabilisierung der Sohle bei.

## 6. Neuer Ansatz

Alle im vorigen Abschnitt beschriebenen Prozesse sind verbunden mit Sohleneintiefungen. Die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Selbststabilisierung in den verschiedenen geomorphologischen Skalen und der Sohlenerosion ist die Grundlage der im Folgenden vorgestellten Gleichungen. Verglichen wird hierbei immer der «alte» stabile Zustand der Sohle, der sich bei einem Abfluss $q_{alt}$ gebildet hat, mit dem «neuen» stabilen Zustand der Sohle, gebildet bei $q_{neu}$. Der Zustand der Sohle wird dabei charakterisiert durch die Standardabweichung der Rauigkeitserhebungen $s$ sowie dem Gefälle $J$. Für den Übergang vom «alten» zum «neuen» Zustand ist eine Zerstörung der «alten» Sohle notwendig. Wie im vorigen erläutert, ist dieses mit Sohleneintiefungen verbunden. Diese werden lokal an jedem Messpunkt mit $dZ_{meso}$ bezeichnet. Referenz für diese Grösse sind die Längenprofile, denen der lineare Trend entzogen worden ist. Die örtlichen Abweichungen um den Mittelwert (Nulllinie) werden mit $Z_{meso}$ bezeichnet. Eine Definitionsskizze der zugehörigen Parameter findet sich in *Bild 7*.

In der Flussabschnitts-Skala findet eine Stabilisierung über eine Gefällsverringerung statt. Anhand von Gleichung

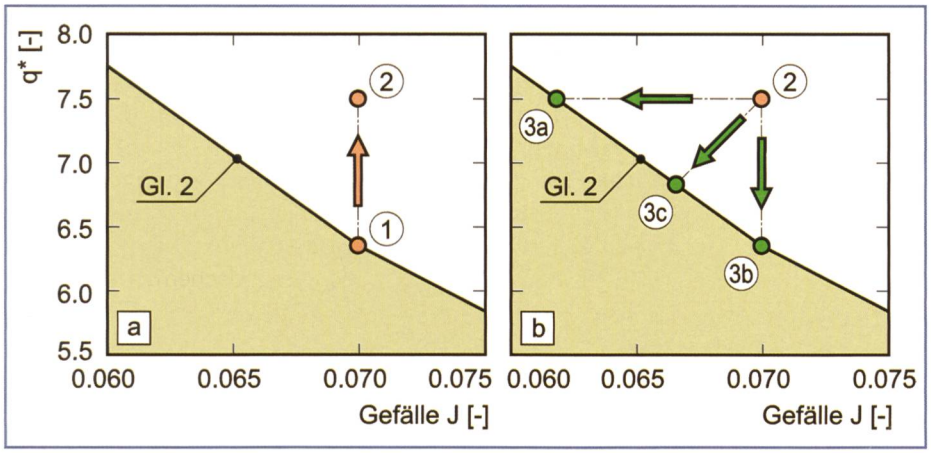


***Bild 6. Konzept der Anpassung der Gerinnesohle, wenn der spezifische Abfluss einen Grenzwert der Stabilität überschreitet. Die durchgezogene Linie entspricht hier Gleichung (2) nach Aberle (2000).***

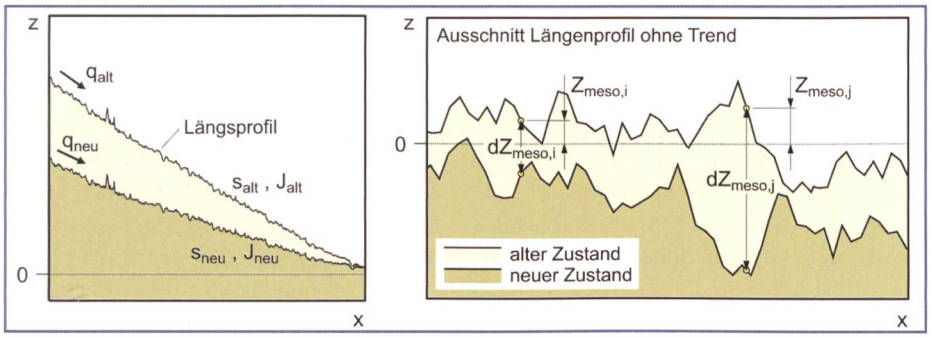


***Bild 7. Definitionsskizze der für die Gleichungen (4)–(7) massgebenden Grössen.***

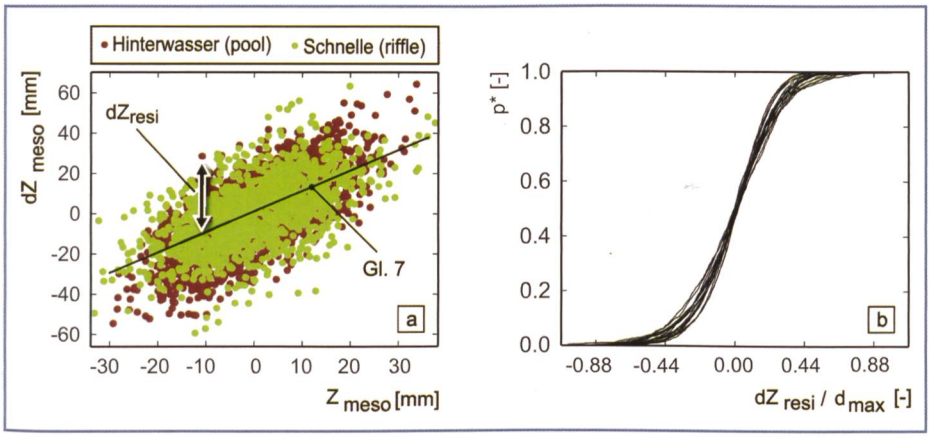


***Bild 8a. Korrelation in der Meso-Skala zwischen der Rauigkeitshöhe $Z_{meso}$ und der Sohleneintiefung $dZ_{meso}$ am Beispiel eines Versuches mit 13% Rinnengefälle, b) Summenhäufigkeit p* der Residuen $dZ_{resi}$ aller Versuche bezogen auf den maximalen Korndurchmesser $d_{max}$. $dZ_{resi}$ ist dabei die Reststreuung der Eintiefung, die nicht auf die beschriebenen Skaleneffekte zurückgeführt werden kann.***

(2) lässt sich für einen Bachabschnitt mit vorhandenem Gefälle $J_{alt}$ und Rauigkeitsstruktur $s_{alt}$ zunächst die Stabilität dieses Abschnitts, ausgedrückt über den kritischen spezifischen Abfluss $q_c$, berechnen. Für einen Abfluss $q_{neu} > q_c$ kann dann mit Gleichung (4) das neue, sich einstellende Gefälle berechnet werden. Dieses wiederum ist massgebend für das Mass der Sohlenerosion in jedem Punkt:

$$J_{neu} = 0.48 \cdot J_{alt}^{0.50} \cdot g^{0.19} \cdot s_{alt}^{0.58} \cdot q_{neu}^{-0.38} \quad (4)$$

Hierin ist $J_{neu}$ das neue, sich einstellende Gefälle nach einer Belastung $q_{neu}$. Des Weiteren sind $J_{alt}$ das vorhandene Gefälle in dem betrachteten Gerinneabschnitt und $s_{alt}$ die dazugehörige Standardabweichung der Rauigkeitserhebungen (*Bild 7*).

Der makroskalige Anpassungsprozess wird angenähert durch eine Rotationserosion, um den Fusspunkt der Schnelle (Riffle) bzw. der Hinterwasserzone (Pool). Daraus resultieren Beziehungen, die analog zu Gleichung (4) aufgebaut sind.

Schnelle (Riffle):

$$J_{neu} = 0.44 \cdot J_{alt}^{0.50} \cdot g^{0.21} \cdot s_{alt}^{0.63} \cdot q_{neu}^{-0.42} \quad (5)$$

Hinterwasserzone (Pool):

$$J_{neu} = 0.52 \cdot J_{alt}^{0.50} \cdot g^{0.17} \cdot s_{alt}^{0.50} \cdot q_{neu}^{-0.33} \quad (6)$$

Die Parameter entsprechen denjenigen der Flussabschnittsskala (Bild 7), mit dem Unterschied, dass sie in der Flussabschnittsskala global über einen gesamten Flussabschnitt definiert sind, während sie in der Makroskala lokal entlang der entsprechenden makroskaligen Struktur definiert sind. Das heisst, $J_{neu}$, $J_{alt}$, $s_{alt}$ beziehen sich nur auf den Schnellen- bzw. Hinterwasserbereich.

Die Anpassung der mesokaligen Struktur erfolgt durch die Ausbildung verschiedener Stufentypen (Riegel, Ringe, Cluster, u.a.) in verschiedenen Konfigurationen. Die von Weichert (2006) klassifizierten Typen bezogen sich dabei auf die Stufen, die vorwiegend aus den gröbsten Körnern der Kornverteilung gebildet waren. Demzufolge bedingen mesoskalige Umstrukturierungen immer auch Bewegungen der groben Sohlkomponenten, was mit einer gewissen Tiefenerosion einhergeht. So war ein häufig beobachteter Mechanismus bei den Umstrukturierungen, dass mobilisierte, stufenbildende Steine bevorzugt in den Beckenbereichen liegen bleiben, wo sie wiederum das Potenzial für eine neuerliche Stufenbildung besitzen. Daraus resultiert, dass im Bereich der Stufen eher Erosionen beobachtet werden, während die Beckenbereiche tendenziell durch Auflandungen gekennzeichnet sind.

Dieser Zusammenhang ist durch Gleichung (7) gegeben, indem die für die Meso-/Mikro-Skala massgebende Korrelation zwischen der Rauigkeitshöhe $Z_{meso}$ und der Sohleneintiefung $dZ_{meso}$ (siehe auch *Bild 7*) dargestellt ist (*Bild 8a*).

$$dZ_{meso} = 0.9 \cdot Z_{meso} \quad (7)$$

Für die in diesem Forschungsprojekt untersuchten Verhältnisse von $q_{neu}/q_{alt}$ wird zwischen der Geometrie vor und nach der Überlastung mit Gleichung (7) ein Zusammenhang gegeben. Für sehr grosse Verhältnisse $q_{neu}/q_{alt}$ ist zu vermuten, dass dieser Zusammenhang nicht mehr gültig ist. Zwar werden sich für diesen Fall bei einer Restabilisierung auch wieder Stufen-Becken-Morphologien ausbilden, jedoch ist deren Lage aufgrund der vollständigen

Mobilisierung des Sohlmaterials eher als zufällig zu erwarten und nicht vorbestimmt durch die vorige Konfiguration.

Neben der Korrelation zwischen der Rauigkeitshöhe und der Sohleneintiefung in der Meso-Skala, ist in Bild 8a die verbleibende Variabilität $dZ_{resi}$ der gemessenen lokalen Sohleneintiefungen zu erkennen. Diese Grösse wurde für alle Versuchsreihen anhand der jeweiligen Häufigkeitsverteilungen untersucht. Wie im Bild 8b dargestellt, sind kaum Unterschiede in den resultierenden Verteilungen feststellbar. Eine Beschreibung der Residuenkurve erlaubt eine semi-probabilistische Betrachtungsweise bezüglich der Sohlerosionen:

$$p* = 0.5 \cdot (tanh\,(4.55 \cdot \frac{dZ_{resi}}{d_{max}}) + 1) \tag{8}$$

Im folgenden Abschnitt soll anhand eines praktischen Beispiels die Vorgehensweise für die Benutzung des neuen Ansatzes (Gleichungen 4–8) erläutert werden.

## 7. Praktische Anwendung – Beispiel

Als Beispiel wird ein 200 m langer Wildbachabschnitt mit einem Gefälle von 7% und einer Breite von 6 m betrachtet. Die Kornverteilung des Sohlenmaterials entspricht den in *Tabelle 1* dargestellten Kenngrössen, wobei $d_{max}$ = 0,91 m angenommen wird. Die anderen Korndurchmesser lassen sich entsprechend *Tabelle 1* berechnen. In einem ersten Schritt ist festzustellen, welche Sohlenmorphologien im Gerinne vorhanden sind und wo sich im Gerinne Fixpunkte befinden. Für das vorliegende Beispiel sei von einem Flussabschnitt ausgegangen, der an seinem unteren Ende durch einen Fixpunkt festgelegt ist. Zudem seien entsprechend der vorhandenen Kornverteilung Stufen-Becken-Morphologien vorhanden. Ein Einfluss von Schnellen-Hinterwasser-Sequenzen sei nicht gegeben. Dieser Umstand lässt sich anhand der Beobachtungen im Feld oder mit Hilfe morphologischer Abgrenzungskriterien z.B. von da Silva (1991), ergänzt mit den Untersuchungen von Zarn (1997), vornehmen (siehe dazu Weichert 2006).

In einem ersten Schritt gilt es, das übergeordnete Gefälle $J_{alt}$, sowie die Standardabweichung $s_{alt}$ zu messen. Den Erkenntnissen aus den Modellversuchen folgend, sollte dies im Minimum über einer Länge von etwa $20d_{max}$ entlang des Talwegs erfolgen. Da der maximale Blockdurchmesser in der Natur häufig sehr heterogen verteilt ist, wird empfohlen, die grössten stufenbildende Steine als Referenz für $d_{max}$ zu verwenden. Für das vorliegende Beispiel sei angenommen, dass die Messung eine Standardabweichung von $s = 0{,}25$ m ergeben hat. Mit Gleichung (2) resultiert daraus ein kritischer spezifischer Abfluss von

$$q_{c,alt} = \sqrt{9.81 \cdot 0.25^3} \cdot 0.2 \cdot 0.07^{-1.3} = 2.48\ \frac{m^3}{s \cdot m} \tag{9}$$

Bei einer Bachbreite von etwa 6 m entspricht das einem kritischen Abfluss von

$$Q_{c,alt} = 14.9\ \frac{m^3}{s} \tag{10}$$

Anhand Gleichung (4) können nun die Gerinneeintiefungen in der Flussabschnittsskala berechnet werden, unter der Annahme, dass ein Abfluss von $Q$ = *18 m³/s* ($q$ = *3 m²/s*) auftritt. Die Sohleneintiefungen sind dabei gegeben durch das neue, sich einstellende Bachgefälle:

$$J_{neu} = 0.48 \cdot 0.07^{0.50} \cdot 9.81^{0.19} \cdot 0.25^{0.58} \cdot 3^{-0.38} = 0.058 \tag{11}$$

Für den betrachteten Wildbachabschnitt resultiert daraus eine maximale Sohleneintiefung von 2,39 m am oberen Ende des Gerinneabschnittes. In analoger Weise können die Sohleintiefungen bezogen auf die mittlere Sohlenlage in jedem Querschnitt berechnet werden.

In der Mesoskala wird die Sohlenerosion massgeblich durch die Rauigkeitshöhe $Z_{meso}$ beeinflusst. Für eine Abschätzung der grössten absolut zu erwartenden Erosionen (im Bereich der Stufen) kann von einer maximalen Rauigkeitshöhe in der Grössenordnung von $d_{max}$ ausgegangen werden. Anhand von Gleichung (7) und unter Berücksichtigung der flussabschnittsskaligen Resultate ergeben sich daher Sohlenveränderungen an einer hohen Stelle (Stufe) im obersten betrachteten Gerinnequerschnitt von

$$dZ = 2.39m + 0.9 \cdot 0.91m = 3.21m \tag{12}$$

Liegt eine genaue Vermessung der Sohltopographie vor, lässt sich die Sohleneintiefung an jedem Punkt in analoger Art und Weise bestimmen. Für eine Abschätzung der maximal zu erwartenden Sohlenerosionen muss zusätzlich der semi-probabilistische Ansatz in Gleichung (8) verwendet werden. Es soll dabei die Sohlenerosion ermittelt werden, die mit einer Wahrscheinlichkeit von $p^* = 0{,}95$ kleiner ist. Gleichung (8) umgestellt nach $dZ_{resi}$ ergibt:

$$dZ_{resi} = \frac{0.91}{4.55} \cdot tanh^{-1}\,(\frac{0.95}{0.5} - 1) = 0.29m \tag{13}$$

Dies bedeutet die maximalen Erosionen im obersten Querschnitt an Punkte einer Stufe sind grösser als 3,21 m und mit 95%-iger Wahrscheinlichkeit kleiner als 3,50 m.

## 8. Gültigkeitsbereich

Bei der Anwendung der Gleichungen (4)–(8) sowie bei der Interpretation der Ergebnisse sind die experimentellen Randbedingungen zu berücksichtigen, unter denen der Ansatz abgeleitet wurde. Dieses sind insbesondere das untersuchte Verhältnis $q_{neu}/q_{alt}$, die betrachtete Kornverteilung und der Gefällsbereich, die idealisierte Betrachtung bezüglich geraden Gerinneverlauf sowie die fehlende Interaktion mit dem Uferbereich.

Für die Beurteilung von Naturgefahren in steilen Fliessgewässern ist die Kenntnis der bei einem Hochwasser mobilisierbaren Geschiebemengen von grosser Bedeutung. Die im vorliegenden Artikel vorgestellten Ansätze erlauben dabei eine Abschätzung der Erosionen aus der Sohle. Die entsprechenden Informationen bezüglich den Sohleintiefungen können zudem verwendet werden, um die Stabilität der Seitenhänge zu beurteilen. Es ist daher zu betonen, dass die Ansätze keine Aussagen über die in den, bezüglich eines Gefährdungspotenzials, kritischen Abflussquerschnitten ankommenden Geschiebefrachten liefern. Diese hängen neben den Interaktionen mit den Seitenhängen zusätzlich von den Prozessen ab, die in der Fliessstrecke zwischen dem Erosionsabschnitt und dem kritischen Abflussquerschnitten auftreten.

In den Modellversuchen wurden zudem stationäre Abflussbedingungen untersucht, wie sie in der Natur so nicht anzutreffen sind. Im Rahmen der durchgeführten Experimente konnte jedoch festgestellt werden, dass die wesentlichen Veränderungen in der Sohle sehr schnell nach der Beaufschlagung mit dem neuen Abfluss $q_{neu}$ auftraten. Dieses ermöglicht auch eine Anwendung der vorgestellten Gleichungen für instationäre Bedingungen.

Für eine gegebene Ganglinie lassen sich ab einem spezifischen Abfluss von $q > q_c$ die Reaktionen des Gerinnes anhand der Gleichungen (4)–(8) abschätzen. Anhand der resultierenden Sohleneintiefungen kann so der Zeitpunkt einer Interaktion mit dem Seitenhängen beurteilt werden.

Dank

Das im vorliegenden Artikel vorgestellte Forschungsprojekt wurde vom Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG) wesentlich mitfinanziert.

Literatur

*Aberle, J.* (2000): «Untersuchung der Rauheitsstruktur zur Bestimmung des Fliesswiderstandes in Gebirgsbächen unter Klarwasserabfluss», Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH), Heft 207.

BWG (2002): «Hochwasser 2000 Les crues 2000», Ereignisanalyse und Fallbeispiele, Berichte des Bundesamts für Wasser und Geologie (BWG), Serie Wasser, Nr.1.

*Da Silva, A.M.A.F.* (1991): «Alternate bars and related alluvial processes», PhD thesis, Queen's University, Kingston Ontario, Canada.

*Fehr, R.* (1987): «Geschiebeanalysen in Gebirgsbächen», Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Nr. 92.

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

*Grant, G.E., Swanson, F.J., Wolman, M.G.* (1990): «Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, Western Cascades, Oregon», Geological Society of America Bulletin, 102 (3), 340-352.

*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), ETH Zürich, Nr. 3.

*Knighton, D.* (1984): «Fluvial forms and processes», Edward Arnold Ltd., London.

*Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P.* (1964): «Fluvial processes in geomorphology», W.H.Freeman, San Francisco, California, USA.

*Schälchli, U.* (1991): «Morphologie und Strömungsverhältnisse in Gebirgsbächen: Ein Verfahren zur Bestimmung der Restwasserabflüsse», Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Nr. 113.

*Weichert, R., Wickenhäuser, M. Bezzola, G.R., Minor, H.E.* (2004): «Grain size analysis for coarse river beds using digital imagery processing», In: Greco, M.; Carravetta, A.; Della Morte, R. (editors), River Flow, Volume 1, 753–750, Neapel, Italien, Taylor and Francis Group, London.

*Weichert, R.* (2006): «Bed morphology and stability in steep open channels», Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Nr. 192.

*Zarn, B.* (1997): «Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität», Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Nr. 74.

Adresse der Verfasser:
*Roman Weichert, Hans-Erwin Minor*
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW),
ETH Zürich, 8092 Zürich, Schweiz
weichert@vaw.baug.ethz.ch
minor@vaw.baug.ethz.ch

*Gian Reto Bezzola* (ehemals VAW)
Bundesamt für Umwelt BAFU
CH-3003 Bern
gianreto.bezzola@bafu.admin.ch

**Kanton St.Gallen**

*Das Tiefbauamt des Kantons St.Gallen befasst sich mit vielfältigen Planungs-, Projektierungs-, Bau- und Unterhaltsarbeiten für die National- und Kantonsstrassen sowie für den Hochwasserschutz an Gewässern. Eingegliedert sind die Fachstellen für Naturgefahren und Sicherheit von Stauanlagen. Diese Aufgaben werden derzeit von drei Abteilungen, zusammen mit den zentralen Diensten erledigt. Insgesamt zählt das Amt rund 300 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.*

*Die Abteilung Gewässer ist unter anderem verantwortlich für den Vollzug der Wasserbau-, Rhein- und Linthgesetzgebung. Im Rahmen der Gewässernutzung ist sie zuständig für Kiesentnahmen aus Gewässern sowie für Hafenanlagen. Ausserdem gehören die Hochwasserprävention, die Stauanlagen und die Naturgefahren zu ihrem Aufgabenbereich.*

*Der gegenwärtige Stelleninhaber tritt auf Mitte 2007 in den Ruhestand. Wir suchen deshalb eine/n*

***Leiter/in für die Abteilung Gewässer***

*Als Leiter/in der Abteilung Gewässer mit gegenwärtig 30 Mitarbeitern sorgen Sie kundenorientiert, effizient und kompetent für den Vollzug der massgebenden Erlasse über Wasserbau, Rhein, Linth, Naturgefahren und Sicherheit der Stauanlagen im Kanton. Dazu gehört auch die Führung des Rheinunternehmens als selbständige öffentlichrechtliche Anstalt.*

*Diese verantwortungsvolle und abwechslungsreiche Aufgabe verlangt ein abgeschlossenes Hochschulstudium, vorzugsweise als Bauingenieur/in mit betriebswirtschaftlichen Kenntnissen. Zudem erwarten wir mehrjährige Erfahrung im Wasser- und Flussbau, Führungskompetenz und ein hohes Mass an Belastbarkeit und Flexibilität. Als kommunikative Persönlichkeit verhandeln Sie geschickt und zielorientiert im In- und nahen Ausland. Ausserdem bringen Sie eine gute Portion Verständnis für die rechtlichen, administrativen Arbeiten und Abläufe in der Verwaltung mit, sind einsatzfreudig und denken interdisziplinär.*

*Wir bieten Ihnen ein hohes Mass an Eigenverantwortung und grosse Selbständigkeit, zeitgemässe Anstellungsbedingungen mit ausgezeichneten Fort- und Weiterbildungsmöglichkeiten sowie einen modernen Arbeitsplatz im Zentrum von St.Gallen. Der Stellenantritt erfolgt auf 1. März 2007 oder nach Vereinbarung.*

*Das Baudepartement bekennt sich zur Gleichstellung von Mann und Frau. Wir freuen uns über Bewerbungen von Frauen und Männern.*

*Interessiert? Urs Kost, Kantonsingenieur, erwartet Ihre Bewerbungsunterlagen bis Ende September 2006 (Baudepartement des Kantons St.Gallen, Personaldienst, Lämmlisbrunnenstrasse 54, 9001 St.Gallen) und erteilt gerne Auskunft unter Tel. 071 229 30 39.*