Ermittlung des sohlmorphologischen Gleichgewichtsgefälles von Fließgewässern

Studying equilibrium slope in streambed morphologies

von M. HENGL und U. STEPHAN

Kurzfassung/Summary

Aus verschiedenen Ursachen ist bei vielengeschiebeführenden Flüssen kein dynamisches Gleichgewicht zwischen Erosion und Auflandung gegeben. Die Folge ist in den meisten Fällen eine kontinuierliche Eintiefung der Gewässersohle, in seltenen Fällen auch eine systematisch fortschreitende Auflandung. Damit verbundene Probleme sind: Verschärfung der Hochwassergefahr durch höhere Sohllagen bei Auflandung, bei Eintiefung instabile Bauwerke wie Ufersicherungen und Brückenfundamente, Gefahr der Zerstörung von nahe am Ufer stehenden Bauwerken bzw. Infrastruktureinrichtungen wie z. B. Leitungen und Straßen infolge Erosion. In Tallandschaften fallen Auen trocken, der Grundwasserspiegel sinkt. Dieser Beitrag zeigt, wie mit einer relativ einfachen Methode das sohlmorphologische Gleichgewichtsgefälle eines geschiebeführenden Gewässers sowohl für den Istzustand als auch für verschiedene Planungen abgeschätzt werden kann. Es wird auch gezeigt, dass eine Verbreiterung des Gewässers sowohl Auflandung (Vergrößerung des Gefälles) als auch Erosion (Verringerung des Gefälles) bewirken kann.

For various reasons, many streams carrying bedload lack dynamic equilibrium between erosion and sedimentation. The absence of dynamic equilibrium usually results in continuous streambed deepening or, in rare cases, in progressive sedimentation. The problems involved include aggravation of flood risks due to higher streambed levels in

the case of sedimentation, and, in the case of streambed erosion, potential instabilities for structures such as bank protections and bridge foundations, together with the risk of destruction to near-bank structures and infrastructural facilities such as mains and roads. Flood plains in valleys may run dry, and the water table may drop. This report demonstrates a relatively simple method of assessing equilibrium slope for streambed morphologies in waters carrying bedload both for the present situation and for various future planning purposes. It is also shown that streambed widening implies the possibility of both sedimentation (slope increase) and erosion (slope reduction).

1. Einleitung

Viele Fließgewässer im alpinen und voralpinen Raum sind derzeit nicht im sohlmorphologischen Gleichgewicht. Im überwiegenden Fall dominieren Erosionsprozesse infolge von Geschiebedefizit. Die Ursachen dafür sind vielfältig. Meist dominieren die nachstehenden Faktoren:

- Einengung und Begradigung (Laufverkürzung) von Fließgewässern im 19. und 20. Jahrhundert zur Verbesserung des Hochwasserschutzes und Gewinn nutzbarer Flächen für die Landwirtschaft, aber auch als Siedlungsraum,
- Geschiebesperren zum Schutz für Siedlungsgebiete vor Murgängen,
- Flusskraftwerke, die als Geschiebesperren wirken, und
- Geschieberückhalt in Speichern (Stauseen für die Energiegewinnung und Hochwasserrückhaltebecken).

nung und Hochwasserrückhaltebecken).

Es ist aber nicht immer nur die Erosion, die Probleme bereitet. Auch ein Überschuss an Geschiebe (z. B. infolge eines zu breiten Gewässerbettes oder durch die Mobilisierung von Geschiebe im Einzugsgebiet) kann zu Auflandungen und damit zu einer Verschärfung der Hochwassergefahr in besiedelten Gebieten führen.

Zahlreiche Gründe sprechen dafür, dass sich Flüsse und Bäche in einem so genannten sohlmorphologischen Gleichgewicht befinden sollten. Dieser Gleichgewichtsbegriff wird so definiert, dass sich über einen mehrjährigen Betrachtungszeitraum Erosion und Auflandung die Waage halten. Der Schwankungsbereich des Sohlniveaus bleibt begrenzt und ist für den Hochwasserschutz (Gefahr der Unterspülung von Ufersicherungen, Brückenfundierungen oder Freilegung von das Gewässer querenden Leitungen und Hangrutschungen infolge Erosion bzw. Gefahr von steigenden Wasserspiegeln durch Auflandung) vorhersehbar. Das sohlmorphologische Gleichgewicht eines Fließgewässers ist damit nicht als statischer Zustand, sondern als dynamischer Systemzustand innerhalb einer Bandbreite zu verstehen.

Neben dem bereits erwähnten Hochwasserschutz sprechen folgende Gründe ebenfalls für ein sohlmorphologisches Gleichgewicht von Fließgewässern:

- Nachhaltige Sicherung der Grundwasserreserven in den Tallandschaften,
- im Falle von gewässerbegleitenden Auen kann nur über das

dynamische Gleichgewicht die ökologisch bedeutende Quervernetzung erhalten bleiben und

- letztendlich ist bei einem im Gleichgewicht befindlichen Fließgewässer der Instandhaltungsaufwand deutlich geringer.
- Im Falle der Sohlerosion kommt für den Hochwasserschutz noch der Verlust an Retentionsräumen durch Eintiefung der Gewässersohle dazu.

2. Geschiebehaushalt

Um die Frage, ob ein Fließgewässer im morphologischen Gleichgewicht oder Ungleichgewicht ist, beantworten zu können, ist die Kenntnis des Geschiebehaushalts ein entscheidender Faktor.

Wie bereits erwähnt, wird gerade im alpinen Bereich in vielfältiger Weise in den natürlichen Geschiebehaushalt eingegriffen. Hauptursachen sind die Sicherung des Lebensraums und die Stromerzeugung (Nutzung der Wasserkraft). Aktivitäten mit unterschiedlichen Zielsetzungen führen zu laufenden Veränderungen. Beispielsweise werden in manchen Gebieten Geschiebesperren der Wildbachverbauung wieder entfernt, um Fließgewässern mehr Dynamik zu geben. Auf der anderen Seite werden aber nach wie vor Geschiebesperren für den Schutz von Siedlungsgebieten errichtet. Bei Planungen an einem Gewässer sollte daher immer das gesamte Einzugsgebiet mit allen für den Geschiebehaushalt relevanten Aspekten betrachtet werden. Jede Maßnahme im Einzugsgebiet, die die Geschiebemenge maßgeblich beeinflusst, wird sich letztlich, allerdings erst mit entsprechender Zeitverzögerung in den Gewässerabschnitten weiter flussab auswirken.

Wasserbauprojekte wie z. B. Hochwasserschutzmaßnahmen

Abb. 1: Gleichgewichtsgefälle in Abhängigkeit von der Breite des Gewässers – adaptiert nach Zarn (1997)

Abb. 2: Gleichgewichtsgefälle in Abhängigkeit vom Geschiebeeintrag M_g (links) bzw. von der Sohlbreite B (rechts) am Beispiel eines Gewässers im Erosionszustand (Gewässerbreite über dem Transportoptimum) – adaptiert nach Hengl, Stephan (2004)

sind in der Regel auf eine Nutzungsdauer von vielen Jahrzehnten ausgelegt. Es sollte daher bereits in der Planung an flexible Lösungen gedacht werden, die die Dynamik der Gewässersohle bei zu erwartenden Veränderungen im Geschiebehaushalt verkraften bzw. leicht adaptierbar sind.

Die Geschiebemengen eines Gewässers über mehrere Jahre bzw. Jahrzehnte hinweg sind als vom hydrologischen Geschehen abhängige und damit veränderliche Größen anzusehen. Zwischen trockenen und feuchten Jahren ist eine bestimmte, abschätzbare Bandbreite zu erwarten. Einen Sonderfall stellen hydrologische Extremereignisse dar, die in kurzer Zeit sehr viel Geschiebe mobilisieren und verfrachten. Extremhochwässer sollten gesondert betrachtet werden, da sie außerhalb des langjährigen mittleren Schwankungsbereiches im Abfluss- und Feststofftransportgeschehen liegen.

3. Sohlmorphologisches Gleichgewichtsgefälle

Bei einem im langjährigen Mittel gleichbleibenden Geschiebeeintrag strebt jedes Fließgewässer einem so genannten Gleichgewichtsgefälle zu. Das heißt abgesehen von den Schwankungen aufgrund trockener oder feuchter Jahre bleibt die Gewässersohle im langjährigen Mittel auf gleicher Höhe.

Ein Faktor für das Gleichgewichtsgefälle eines Gewässerabschnitts J_g ist die Sohlbreite (siehe Abbildung 1). Bei Gewässern mit kleiner Breite wird ein großer Teil der Schubspannungen über die Ufer abgetragen. Bei einer Verbreiterung des Gerinnes ergibt sich aus der damit verbundenen Lastumlagerung von der Böschung auf die Sohle eine größere Belastungssteigerung als Belastungsverringerung infolge des durch die Aufweitung sinkenden Wasserspiegels. Erst bei einer Breite, die größerer als die dem Transportoptimum entsprechende Breite B_{opt} ist, ergibt

eine Aufweitung auch eine Vergrößerung des Gefälles. Die beiden Beispiele am Ende des Beitrags demonstrieren diesen Prozess. Wenn das Gefälle J und der Durchfluss Q konstant gehalten werden und nur die Breite verändert wird, kann ein Fließgewässer mit der Breite B_{opt} die größte Geschiebemenge M_g transportieren. Eine Zunahme oder Abnahme der Breite ergibt jeweils auch eine Abnahme der Geschiebetransportkapazität (Zarn, 1997). Im Bereich des Transportoptimums bewirkt eine Sohlbreitenänderung nahezu keine Änderung des Gleichgewichtsgefälles.

Das Gleichgewichtsgefälle J_g (siehe Abbildung 2) hängt neben der Breite noch von folgenden Faktoren ab: dem Abfluss Q (zeitabhängig), dem gesamten Durchflussquerschnitt einschließlich allfälliger Überflutungsflächen (Geometrie und Fließwiderstand), dem Geschiebeeintrag M_g (zeitabhängig) sowie charakteristischer Korngrößen des Geschiebes und des Sohlmaterials d_{ch} . Weitere Einflussfaktoren können Regulierungsmaßnahmen (z. B. Buhnen) und ein geologisch inhomogenes Flussbett sein (z. B. Abschnitte mit Felsschwellen oder Abschnitte mit sandigem Untergrund in einer Kiessohle). Besonders dichter Bewuchs auf Überflutungsflächen oder die Ablagerung von Feinsedimenten auf den Vorländern konzentrieren den Abfluss stärker im Fluss und führen damit zu einer Verringerung des Gleichgewichtsgefälles.

Für die Vorhersage von Sohlveränderungen und damit zur Ermittlung des Gleichgewichtsgefälles sind neben physikalischen Modellen, numerische Geschiebetransportmodelle sicher das am besten geeignete aber auch sehr zeitaufwändige Werkzeug. Da im ersten Stadium einer Planung nur die mittlere Sohlage mit ihrem zu erwartenden Schwankungsbereich von Interesse ist, ist die Anwen-

dung von einfacheren Methoden zur Ermittlung des Gleichgewichtsgefälles und damit der mittleren Sohlage zweckmäßiger. Auf Regimegleichungen (z. B. Julien & Wargadalam, 1998; Yalin & da Silva, 2001), die die Abschätzung stabiler Gewässerprofile ermöglichen, wird hier bewusst nicht eingegangen, da diese Gleichungen nur einen charakteristischen Abfluss enthalten und Veränderungen im Geschiebehaushalt nicht berücksichtigen können.

4. Berechnungsverfahren

Das nachstehend beschriebene Berechnungsverfahren ist vom Anwendungsbereich der gewählten Feststofftransportformel abhängig. Derzeit sind diese Formeln in der Regel nur für den Korngrößenbereich Kies bis Sand geeignet. Für Sedimente mit kohäsiven Eigenschaften wie z. B. Tone oder Löss aber auch Schluffe fehlen entsprechende Transportgleichungen, die in der Ingenieurpraxis für die Ermittlung eines sohlmorphologischen Gleichgewichts zuverlässig anwendbar sind.

4.1 Datenbedarf

Die Berechnung des Gleichgewichtsgefälles beginnt mit der Sammlung aller erforderlichen Daten. Die Qualität des Berechnungsergebnisses ist direkt von der Qualität der erhobenen Daten abhängig. Folgende Unterlagen werden benötigt:

- Abflussganglinien für möglichst viele Jahre an für den zu untersuchenden Gewässerabschnitt repräsentativen Pegelstellen, als gleichwertige Alternative können auch Dauerlinien die das hydrologische Geschehen darstellen verwendet werden (3 Dauerlinien je Pegelstelle für mittlere, nasse und trockene Jahre).
- Sohlbreite im Istzustand und

Bandbreite für die Planung,

- Neigung der Uferböschungen und Querschnitt der Abflussflächen in angrenzenden Überflutungsgebieten,
- Fließwiderstandsbeiwerte (z. B. Stricklerbeiwerte) für die Ermittlung der Wasserspiegellagen im Fluss und in den Vorländern,
- Mittleres Sohlgefälle in charakteristischen Planungsabschnitten für den Istzustand und mögliche Bandbreiten für die Planung,
- Angaben zum Geschiebehaushalt (mittlere zu erwartende Geschiebemenge pro Jahr M_g , einschließlich möglicher Bandbreiten) und
- Korngröße des Geschiebes (Sieblinien bzw. charakteristische Korndurchmesser), ebenfalls mit möglichen Bandbreiten.

Falls Abflussganglinien vorliegen können diese, um die Berechnung zu vereinfachen, durch eine mittlere Dauerlinie ersetzt werden. Zur Beurteilung der Bandbreiten ist es zweckmäßig aus den nassen und trockenen Abflussjahren zusätzliche Dauerlinien für eher trockene bzw. feuchte Abflussperioden zu erstellen. Alternativ kann man auch die Abflusszeitreihen direkt verwenden. Die großen Datenmengen machen die Arbeit aber aufwändiger und erhöhen die Genauigkeit kaum.

4.2 Geschiebetransportformeln

Für die Ermittlung des Gleichgewichtsgefälles ist die Auswahl einer geeigneten Geschiebetransportgleichung erforderlich. Die Auswahl ist vielfältig (z. B. Bakke et al., 1999; Bathurst et al., 1987; Hunziker, 1995; Karim, 1998; Meyer-Peter & Müller, 1948; Zanke, 1999; Zarn, 1997), wobei der jeweilige Anwendungsbereich, für den die Formel entwickelt wurde, zu beachten ist. Von Vorteil sind Erfahrungen aus ähnlichen Gewässerabschnitten oder Messdaten

zur Kalibrierung und Kontrolle der verwendeten Gleichung. Eine einfache Prüfmöglichkeit stellt die Berechnung des Gleichgewichtsgefälles für den Istzustand dar. Wenn die Gewässerstrecke gegenwärtig nicht im Gleichgewicht ist, muss sich zumindest der zu beobachtende Erosions- oder Auflandungstrend im Ergebnis widerspiegeln. Andernfalls sind die Daten und die verwendete Transportgleichung auf Plausibilität zu prüfen.

4.3 Berechnungsablauf

Der Berechnungsablauf für das Gleichgewichtsgefälle ist in Abbildung 3 grafisch dargestellt. Für die einfachere Erklärung wird dabei eine Abflussdauerlinie verwendet. Wie bereits erwähnt kann die Berechnung auch direkt mit einer mehrjährigen Zeitreihe erfolgen. Für eine Sieblinie oder einen charakteristischen Korndurchmesser d_{ch} des Geschiebes umfasst der Berechnungsablauf folgende Schritte:

- Berechnung des Geschiebetransports M_g als Funktion vom Abfluss Q für verschiedene Kombinationen von Gefälle J und Gewässerbreite B . Für den Berechnungsvorgang wird angenommen, dass das Sohlgefälle gleich dem Energieliniengefälle ist (gleichförmiger Abfluss).
- Daraus erhält man eine dreidimensionale Datenmatrix, die den Geschiebetransport als Funktion des Abflusses, des Gefälles und der Breite enthält (Abbildung 3a).
- Für jede Kombination J und B kann mit Hilfe der Dauerlinie (Abbildung 3b) die Geschiebefracht M_g für 1 Jahr berechnet werden (aus der Datenmatrix erhält man für jedes Q der Dauerlinie ein $M_g(Q)$ und aus der Integration über das Jahr einen Wert M_g). Aus der Rechnung für alle Kombinationen von J und B entsteht eine Funktion, die als

Abb. 3: Berechnungsablauf zur Ermittlung des Gleichgewichtsgefälles

Abb. 4: Abflussdauerlinien zu den Beispielen 1 und 2

3d-Fläche interpretierbar ist. Diese Funktion $M_g(J,B)$ ist in Abbildung 3c dargestellt, wobei wir senkrecht von oben auf die Fläche blicken und die Linien $M_g = \text{const.}$ als Schichtenlinien eingezeichnet sind.

- Aus diesem Diagramm kann, für eine gewählte Sohlbreite und eine zu erwartende Jahresgeschiebefracht, das Gleichgewichtsgefälle abgelesen werden. Alternativ kann auch die für ein bestimmtes Gefälle erforder-

liche Sohlbreite oder für eine Kombination von Gefälle und Sohlbreite der jährlich erforderliche Geschiebeeintrag ermittelt werden.

Um die Sensitivität der Ergebnisse bezüglich Korngröße des Geschiebes zu prüfen, ist es empfehlenswert analoge Diagramme für eine Bandbreite von möglichen Sieblinien bzw. charakteristischen Korndurchmessern zu erstellen. Analog kann auch die Sensitivität bezüglich Abflüsse (z. B. Perioden mit nassen oder trockenen Jahren) und der Einfluss der gewählten Geschiebetransportgleichung untersucht werden.

5. Anwendungsbeispiele

Für zwei unterschiedliche Gewässer (eines eher breit und eines eher schmal) wird nachfolgend der Einfluss von Sohlbreite, Korngröße und Menge des Geschiebes, Abflussdauerlinie sowie Wahl der Geschiebetransportgleichung dargestellt.

Die Berechnungen erfolgen mit der Geschiebetransportgleichung von Meyer-Peter und Müller (1995) und mit der Formel aus Zanke (1999), jeweils mit charakteristischen Korndurchmessern des Geschiebes. Dabei ist für die Transportgleichung aus Hunziker (1995) der mittlere Korndurchmesser d_m und für die Gleichung von Zanke (1999) der d_{50} aus der Sieblinie erforderlich. Um die Sensitivität bezüglich Korngröße des Geschiebes aufzuzeigen wird der Mittelwert des charakteristischen Korndurchmessers um $\pm 10\%$ variiert. Weitere Grundlagen für die Anwendung der Geschiebetransportgleichung sind: Die Sohlschubspannungen werden auf den hydraulischen Radius der Sohle bezogen. Die Geschiebekörner sind rund. Die Sohle wird als natürlich rau angesehen und der Fließwiderstand der Sohle ergibt sich aus dem Korndurch-

Abb. 5: Berechnungsergebnis zu Beispiel 1 – links für Transportgleichung nach Hunziker (1995) und rechts nach Zanke (1999), die Kurvenscharen entsprechen den Geschiebeeinträgen

messer des Geschiebes.

Um den Einfluss der Dauerlinie zu demonstrieren werden die mittleren Dauerlinien für beide Beispiele (siehe Abbildung 4) einmal um 10 % erhöht (feuchtere Jahre) und einmal um 10 % reduziert (trockenere Jahre).

Beispiel 1:

Die für dieses Beispiel verwendeten Daten entsprechen einem eher breiten Fluss mit Sohlbreiten in der Größenordnung von 100 m. In Abbildung 5 sind die Ergebnisse zur Variation von Sohlbreite, Korndurchmesser, mittlere jährliche Geschiebemenge und gewählter Geschiebetransportgleichung dargestellt.

Bei einem Vergleich zwischen den beiden Spalten in Abbildung 5 fällt sofort auf, dass die Gleichung von Zanke (1999) geringere Gleichgewichtsgefälle ergibt als die Gleichung von Hunziker (1995).

Grund dafür ist, dass im Fall der hier gewählten Beispiele die Zanke-Gleichung mit dem charakteristischen Korndurchmesser d_{50} , der aus der gleichen Sieblinie wie der d_m bei Hunziker stammt, eine größere Geschiebetransportkapazität errechnet und sich damit bei gleichem Geschiebeeintrag ein geringeres Sohlgefälle ergibt. Die Variation der jährlichen Geschiebetransportmengen (eine meistens nur schwer zu erfassende Größe) wirkt sich nur mit etwa 0,1 bis 0,2 %, also vergleichsweise wenig auf das Ergebnis aus. Je gröber das Geschiebe ist, desto stärker ist die Abhängigkeit des Gleichgewichtsgefalles von der Sohlbreite. Im Beispiel 1 ergibt sich für eine Sohlbreite von 140 m eine Bandbreite zwischen 0,86 und 1,43 ‰ (Hunziker) bzw. 0,64 und 1,14 ‰ (Zanke) für das Gleichgewichtsgefälle. Je genauer

Abb. 6: Einfluss der Abflussdauerlinie auf das Berechnungsergebnis von Beispiel 1 für die Transportgleichung nach Hunziker (1995) mit $d_m = 27$ mm, die Kurvenscharen entsprechen den Geschiebeeinträgen

Abb. 7: Berechnungsergebnis zu Beispiel 2 – links für Transportgleichung nach Hunziker (1995) und rechts nach Zanke (1999), die Kurvenscharen entsprechen den Geschiebeeinträgen

die vorhandenen Daten sind umso mehr kann die Bandbreite verringert werden. Umgekehrt bedeutet eine größere Unsicherheit in der Datengrundlage eine noch größere Bandbreite im Ergebnis. Damit zeigt das Beispiel wie wichtig es ist, Planungsdaten mit entsprechender Qualität und möglichst geringen Unsicherheiten zur Verfügung zu haben, um die Planungsunsicherheiten auch gering zu halten. Eine Veränderung des Gleichgewichtsgefälles von $\pm 0,1$ ‰ klingt zwar wenig, bedeutet aber bei einer Gewässerstrecke von 10 km einen Höhenunterschied von ± 1 m und kann sich damit auf Hochwassersicherheit, Bauwerksstabilität und Grundwasserstand entscheidend auswirken.

Der Einfluss von systematischen Änderungen in den Abflussmengen ist in Abbildung 6 dargestellt.

Für eine Variation der Abflussdauerlinie von ± 10 % ergibt sich eine Änderung des Gleichgewichtsgefälles von ca. 0,1 bis 0,2 ‰. Damit ist die Sensitivität bezüglich Hydrologie in ähnlicher Größenordnung wie jene für den jährlichen Geschiebeeintrag. Dazu ist auch anzumerken, dass das mittlere Gefälle des Flusses sich erst dann systematisch ändern wird, wenn sich auch die Hydrologie systematisch verändert. Ein Umstand der im Zusammenhang mit den derzeitigen Diskussionen um die Klimaänderung sicher nicht außer acht zu lassen ist.

Beispiel 2:

Das zweite Beispiel steht für Fließgewässer mit eher schmalen Sohlbreiten in der Größenordnung von 10 m. In Abbildung 7 sind in gleicher Weise wie beim ersten Bei-

spiel die Ergebnisse zur Variation von Sohlbreite, Korndurchmesser, mittlere jährliche Geschiebemenge und gewählter Geschiebetransportgleichung dargestellt.

Analog zum ersten Beispiel ergibt die Gleichung von Zanke (1999) ein geringeres Gleichgewichtsgefälle als die Gleichung von Hunziker (1995). Bei einem Vergleich von Abbildung 5 und 7 fällt allerdings sofort auf, dass alle Kurven eine andere Steigung aufweisen. Während beim ersten Beispiel mit einer Verbreiterung des Gewässers eine Vergrößerung des Gleichgewichtsgefälles einhergeht kommt es beim zweiten Beispiel zu einer Verringerung des Gleichgewichtsgefälles, wenn man das Gewässer aufweitet. Dieser Prozess wurde bereits im Kapitel 3 beschrieben. Weiters zeigt das Beispiel, dass bei kleinen Gewässern die Sensitivi-

täten gegenüber Veränderungen in den Korngrößen oder des Geschiebeetrags deutlich stärker ausgeprägt sind als bei großen Flüssen. Im Beispiel 2 ergibt sich für 10 m Sohlbreite eine Bandbreite zwischen 3,9 und 5,8 ‰ (Hunziker) bzw. 2,3 und 4 ‰ (Zanke) für das Gleichgewichtsgefälle. Damit ist die sohlmorphologische Planung an kleinen Gewässern mit oft deutlich schlechterer Datengrundlage wesentlich schwieriger.

Bei einer Variation der Abflussdauerlinie von $\pm 10\%$ ergibt sich die

gleiche Sensitivität von ca. 0,1 bis 0,2 ‰ wie beim ersten Beispiel.

6. Zusammenfassung

Mit Hilfe der Diagramme nach dem Muster von Abbildung 5 bis 7 kann in der Planung die Bandbreite der zu erwartenden Sohlgefälle in Abhängigkeit von den gegebenen Randbedingungen abgeschätzt werden. Daraus folgt eine Bandbreite möglicher Sohl- und Wasserspiegellagen zur Beurteilung der wasserwirtschaftlichen und

ökologischen Folgen bei einer Veränderung von Randbedingungen (z. B. im Geschiebehaushalt). Diese Daten sind eine wertvolle Hilfe für die Planung von Maßnahmen zur dynamischen Sohlstabilisierung mit Berücksichtigung von Variabilitäten in den Eingangsdaten. ■

Korrespondenz:

Dipl.-Ing. Dr. Michael Hengl
Dipl.-Ing. Dr. Ursula Stephan
Institut für Wasserbau und hydrometrische Prüfung
Bundesamt für Wasserwirtschaft, 1090 Wien

LITERATUR

Bakke P D, Basdekas P O, Dawdy D R & Klingeman P C (1999): Calibrated Parker-Klingeman Model for Gravel Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 6, 657-660.

Bathurst J C, GRAF W H & CAO H H (1987): Bed load discharge equations for steep mountain rivers. *Ecole polytechnique federale de Lausanne*, No. 54, Lausanne, Switzerland.

Hengl M, Stephan U (2004): Sohlstabilisierung von Fließgewässern mit Berücksichtigung der Dynamik im Geschiebehaushalt. *Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft in Wien*, Band 20, S 110-118.

Hunziker R (1995): Fraktionsweiser Geschiebetransport. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 138.

Julien P Y, Wargadalam J (1998): Alluvial Channel Geometry: Theory and Applications. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 4, 312-325.

Karim F (1998): Bed Material Discharge Prediction for Nonuniform Bed Sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 6, 597-604.

Meyer-Peter E, Müller R (1948): Formulae for Bedload Transport. *Proceedings of the 2nd Congress IAHSR*, Stockholm, Sweden.

Yalin M S, Da Silva F A M (2001): *Fluvial Processes*. Monograph, IAHR.

Zanke U C E (1999): Zur Physik von strömungsgetriebenem Sediment (Geschiebebetrieb). *Darmstädter Mitteilungen*, No. 106, Darmstadt.

Zarn B (1997): Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 154.