

Jahrestagung der SGMG 2003 in Erstfeld

## *Turbulenzen in der Geomorphologie*

Organisiert von der Versuchsanstalt für Wasserbau,  
Hydrologie und Glaziologie  
der ETH Zürich

*Turbulenzen in der  
Geomorphologie*



# Sohlenmorphologie in Flussaufweitungen

Christian Marti, Gian Reto Bezzola

## Zusammenfassung

Heute besteht im Zusammenhang mit den Anforderungen an einen nachhaltigen Hochwasserschutz die Tendenz, den Fliessgewässern wieder einen Teil ihres früheren Raumes zurückzugeben. Vermehrt müssen daher Fragen zum Verhalten von breiten Flüssen, insbesondere auch ihrer Hochwassersicherheit beantwortet werden. Herkömmliche Fliessgesetze und Geschiebetransportformeln liefern zur Beurteilung verbreiteter Gerinne meist ungenügende Resultate, weil diese auf eindimensionalen Modellversuchen basieren, die Verhältnisse in breiten Flüssen aber stark von dreidimensionalen Effekten geprägt sind. Deshalb wird zur Zeit an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH-Zürich eine Studie mit dem Titel "morphological dynamics in braided rivers" bearbeitet. Das Konzept dieses Forschungsprojektes wird in diesem Artikel kurz vorgestellt. Anschliessend wird als Teilresultat aus dieser Arbeit speziell auf die Prozesse bei einer Reihe von kleineren und mittleren Hochwasserereignissen mit wenig Geschiebeeintrag eingegangen. Häufig entsteht dabei aus einer ursprünglich verzweigten Struktur ein Einzelgerinne. Erste Auswertungen zeigen eine Möglichkeit die resultierende Endbreite dieses Gerinnes abzuschätzen. Aus den Versuchen lässt sich auch schliessen, dass in einem aufgeweiteten Abschnitt eine verzweigte Morphologie, wie sie aus ökologischen Überlegungen oft angestrebt wird, nur bei einer genügenden Geschiebezufuhr zu erzielen ist. Häufig ist es deshalb notwendig, dass flussaufwärts die Geschiebezufuhr aus den Seitenbächen verbessert und auch Seitenerosion zugelassen bzw. aktiv gefördert wird.

## Abstract

In context of sustainable flood protection, nowadays efforts are made to give the rivers at least parts of their former space back again. The aim of these mea-

asures is to improve flood protection and at the same time to eliminate some ecological deficits. Thus, the behaviour and particularly the safety against flooding of wider river sections have to be investigated more frequently. Conventional approaches for the discharge and bed load transport capacity often cause inadequate results, because they are mostly derived from one-dimensional experiments. Therefore, a research project with the title "morphological dynamics in braided rivers" is currently carried out at the Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW) of the Swiss Federal Institute of Technology (ETH) in Zurich. In this article the experimental concept of this study is described briefly. The experimentally investigated scenarios allow for a better understanding and apprehension of observations in nature. As first evaluations show, the bed load input into the observed river section exerts at least a similar influence on the morphology, as the discharge regime. To obtain a braided morphology in such a re-widened section, as often desired due to ecological reasons, sufficient bed load supply is required. Therefore, it is frequently necessary to increase bed load input from upstream side brooks and also to allow or even promote actively lateral erosion.

### **Gravel-bed braided rivers, river widening, equilibrium width, flume study**

#### **1. Einführung**

In den vergangenen 200 Jahren wurden im Alpenraum die meisten Flüsse korrigiert und begradigt. Diese Flusskorrekturen brachten viele Vorteile, wie zum Beispiel das Verschwinden des Sumpffiebers und beträchtliche Kulturlandgewinne.

In den letzten Jahrzehnten sind aber auch einige Probleme dieser Korrekturmassnahmen augenfällig geworden. So ist auf den begradigten Flussabschnitten die Geschiebetransportkapazität stark gestiegen. Durch Aufforstung, Verbauung der Seitenbäche und Baggerungen zur Kiesgewinnung ist gleichzeitig der Geschiebeeintrag stetig zurückgegangen. Zur Kompensation des resultierenden Geschiebedefizits erodierte der Fluss Material aus der Sohle, was zu einer starken Eintiefung des Flussbettes führte. Mancherorts wurde in der Folge die Ufersicherung unterspült und gleichzeitig sank auch das Niveau des Grundwasserspiegels stark ab.

Im Weiteren entstanden durch die Flusskorrekturen monotone Flusslandschaften mit geringer Variabilität der Sohlen- und Fliessstrukturen, was zu einer Verarmung der Flussökosysteme führte. Auch haben die jüngsten Hochwasserereignisse gezeigt, dass die konventionellen flussbaulichen Massnahmen an Grenzen stossen. So entstehen häufig immense Schäden, wenn die dimensio-

nierte Abflusskapazität eines kanalisiertes Flusses überschritten wird und die Seitendämme überflutet werden oder gar brechen.

Um die aufgezählten Nachteile zu beheben sind heute im Flussbau differenziertere Konzepte nötig. Gefragt sind naturbezogenerere Lösungen, welche auf der einen Seite den nötigen Hochwasserschutz garantieren auf der anderen Seite aber den negativen Einfluss auf das Ökosystem minimieren. Für die meisten Flussbaumaassnahmen in der Schweiz gilt daher der Grundsatz: "Raum den Fliessgewässern!" (BWG 2000). Den Flüssen soll wo möglich wieder mehr Raum zugestanden werden, damit diese ihre natürliche Morphologie wieder zurückerlangen können. Dies kann z. B. mit einer lokalen Flussaufweitung erreicht werden (Abb.1).

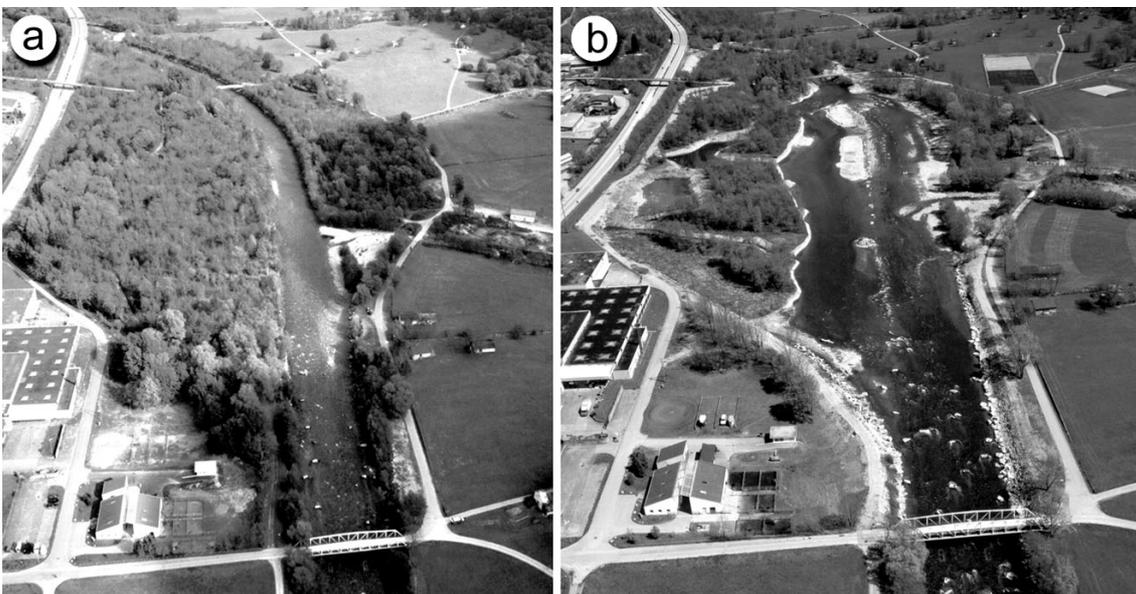


Abb. 1 : Beispiel einer Flussaufweitung an der Moesa bei Grono. a) Kanalisierter Fluss im Jahre 1998 b) Situation nach der Verbreiterung im Jahr 2001. (Fotos: Tiefbauamt Kanton Graubünden)

Mit der Verbreiterung stellen sich aber komplexere Strömungen ein, welche - in Abhängigkeit vom Geschiebeaufkommen - die Flusssohle immer wieder dynamisch umgestalten können. Von besonderem Interesse sind dabei langfristige Sohlenveränderungen, welche bei einer stetigen Tendenz zu Auflandung oder Erosion die angestrebte Verbesserung der Hochwassersicherheit wieder in Frage stellen. Um solche langfristigen Sohlenveränderungen prognostizieren zu können, muss die Geschiebetransportkapazität eines verbreiterten Flussabschnittes ermittelt werden. Herkömmliche Abfluss- und Geschiebetransportformeln sind aber für Kanalsituationen entwickelt worden und liefern für grosse Flussbettbreiten meist ungenügende Resultate.

In diesem Artikel werden neuere Ansätze aus der Literatur, welche unter konstanten Randbedingungen eine Abschätzung der Morphologie und der Sohlenveränderungen in verbreiterten Flussabschnitten erlauben, kurz vorgestellt. Anschliessend wird das Konzept des laufenden VAW-Forschungsprojektes "morphological dynamics of braided rivers" erläutert. Als Teilresultat aus dieser Forschungsarbeit, wird schliesslich speziell auf die Eintiefungsprozesse einzelner Abflussarme als Folge einer Reihe von kleineren und mittleren Hochwasserereignissen mit wenig Geschiebeeintrag eingegangen. Durch den Verbau der Seitenbäche, zum Beispiel durch Sperrentreppen, Geschiebesammler oder Talsperrren, wurde nämlich im letzten Jahrhundert der natürliche Geschiebeeintrag in unsere Haupttalflüsse stark reduziert.

## **2. Bekannte Ansätze zur Abschätzung der Morphologie und Sohlenentwicklung**

Erste Anhaltspunkte für die Frage unter welchen Bedingungen sich in einer Flussaufweitung eine verzweigte Morphologie entwickelt, lassen sich aus sogenannten Übergangskriterien für den Wechsel von mäandrierender - zu verzweigter Morphologie ableiten. Eine Zusammenstellung solcher Übergangskriterien, ist in Bridge (1993) zu finden. Auch Jäggi (1983) präsentiert in seiner Dissertation ein Diagramm, mit welchem eine gute Abschätzung möglich ist. Zur Unterteilung zwischen geraden Gerinnen mit ebener Sohle und Gerinnen mit alternierenden Bänken hergeleitet, erlaubt der Ansatz nach Jäggi auch eine Abgrenzung von verzweigten Gerinnen. Hier näher vorgestellt wird aber das Diagramm von da Silva (1991) (Abb. 2).

Als relevante Parameter gibt sie die relative Flussbettbreite  $Y = B_F/h$  und die mittlere relative Abflusstiefe  $Z = h/d_m$  an, wobei  $B_F$  für die Flussbettbreite (bankfull width),  $h$  für die mittlere Abflusstiefe und  $d_m$  für den charakteristischen Korndurchmesser des Sohlenmaterials stehen. Die mittlere Abflusstiefe sollte dabei für den massgebenden, bettbildenden Abfluss bestimmt werden und ist natürlich auch vom Gefälle und vom Sohlenmaterial des betrachteten Flussabschnittes abhängig. Als massgebender bettbildender Abfluss gelten in der Regel mittlere Hochwasser mit einer Wiederkehrperiode von etwa 2 bis 5 Jahren. Wie in Abbildung 2 veranschaulicht, entwickeln sich bei kleinen Flussbettbreiten (Verhältnis  $B_F/h$  klein) - abhängig vom Sohlenmaterial - entweder gerade oder mäandrierende Gerinne. So liegt beispielsweise der Ticino in der Magadinoebene (grobkiesige Sohle,  $h/d_m$  klein) demnach im Bereich der geraden und die im sandigen Kies verlaufende Reuss ( $h/d_m$  gross) unterhalb von Bremgarten im Bereich der mäandrierenden Gerinne. Bei etwas grösserer Flussbettbreite stellen sich alternierende Bänke ein, wie man sie im Rhein bei Buchs beobachten

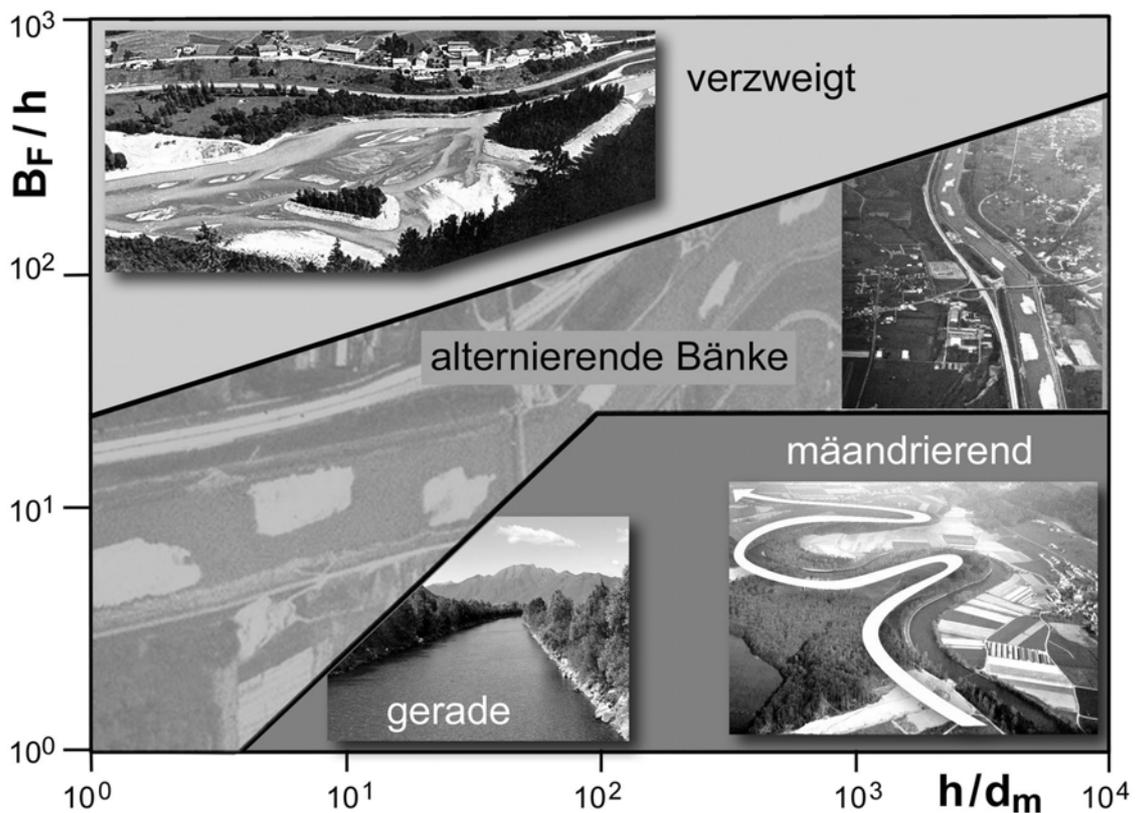


Abb. 2: Abgrenzungskriterien nach da Silva (1991). In Abhängigkeit der relativen Flussbettbreite  $Y = B_F/h$  und der mittleren relativen Abflusstiefe  $Z = h/d_m$ , kann die zu erwartende Sohlenmorphologie bestimmt werden.

kann. Eine verzweigte Gerinnestruktur, die aus ökologischen Überlegungen erwünscht und deshalb bei Aufweitungsprojekten häufig angestrebt wird, stellt sich erst bei noch grösserem Verhältnis  $B_F/h$  ein. Als Beispiel ist der Inn bei Strada gezeigt, wo dank der Schliessung eines Kieswerkes dem Fluss die nötige Breite wieder zur Verfügung gestellt werden konnte. Möchte man dem Ticino in der Magadinoebene seine ursprüngliche verzweigte Struktur wieder zurückgeben, müsste man den heute ca. 50 m breiten Kanal auf mehr als 150 m Breite aufweiten.

Ist die Flussbettbreite nicht durch Geländestrukturen oder Seitendämme vorgegeben, wird sich der Fluss durch seitliche Erosion bis zu einer maximalen Breite - der sogenannten Gleichgewichtsbreite - aufweiten. Diese resultierende Gleichgewichtsbreite kann, wieder auf der Basis des bettbildenden Abflusses, zum Beispiel mit einem Ansatz von Parker (1979) oder von Ikeda et al. (1988) abgeschätzt werden.

In einem verbreiterten Flussabschnitt ist bei gleicher Abflussmenge und gleichem Sohlgefälle die Geschiebetransportkapazität im Vergleich zu einer Kanalsstrecke kleiner. Überschüssiges Geschiebe wird sich daher in einer Flussauf-

weitung ablagern und kann zu einer Sohlauflandung führen. Das Ausmass der möglichen Sohlenauflandung hat Hunzinger (1998) an der VAW untersucht. Sein Ansatz basiert auf den - für variable Flussbettbreiten entwickelten - Geschiebetriebformeln von Zarn (1997). Sowohl die Untersuchungen von Zarn als auch von Hunzinger wurden mit Hilfe von zahlreichen Modellversuchen in einer Laborrinne mit beweglichem Sohlenmaterial durchgeführt. Die Versuche deckten einen Gefällsbereich zwischen 0.35 % und 1.4 % ab. Sie wurden bezüglich Abfluss und Geschiebebeschickung hauptsächlich bei konstanten oder nur leicht variablen Randbedingungen durchgeführt, und die verwendete Sohlenmischung wies eine eher schmale Kornverteilung von 0.2 - 3.14 mm auf. Damit sind die Ansätze von Zarn und Hunzinger in erster Linie auf Mittellandflüsse anwendbar.

### 3. Forschungskonzept und verwendete Versuchsanlage

Mit der hier vorgestellten Forschungsarbeit werden auch die Verhältnisse bei stark variablen Abflüssen und Beschickungsraten, wie sie in der Natur bei alpinen Flüssen weit häufiger vorkommen, untersucht. In den Versuchen werden initiale Sohlengefälle berücksichtigt, welche verzweigten Abschnitten von vier verschiedenen Flüssen entsprechen (Rhone beim Pfynwald 1.5%, Melezza unterhalb Golino 1.85%, Gèrine bei Tentlingen 2.2%, Brenno bei Castro 2.55%). Werden die Kornverteilungskurven der Sohlproben aus diesen vier Flüssen mit dem jeweiligen charakteristischen Korndurchmesser  $d_{84}$  (Korndurchmesser bei 84% Siebdurchgang) normiert dargestellt, liegen die Kurven nahe beisammen, so dass das Sohlenmaterial im Modell gut durch eine einzige Kiesmischung nachgebildet werden kann (Abb.3).

Mit der gewählten Kiesmischung liegt der Modellmassstab  $\lambda$  je nach Fluss zwischen 21 (Gèrine) und 50 (Rhone). Die Modellmischung weist mit  $d_{\min} = 0.2$  und  $d_{\max} = 16.5$  mm eine breite Kornverteilung auf, was auch durch die hohe Standardabweichung  $\sigma = (d_{84}/d_{16})^{0.5}$  von knapp 3.5 charakterisiert wird. Der mittlere Korndurchmesser  $d_m$  liegt bei 3.9 mm und  $d_{90}$  beträgt 9.1 mm.

In der ersten Phase eines Versuches wird jeweils, ausgehend von einer ebenen Sohle bei konstantem Abfluss und konstanter Geschiebezufuhr, die Entwicklung einer verzweigten Sohlenstruktur beobachtet. Diese Versuchsphase dauert zwischen 150 und 300 Stunden. Angestrebt wird dabei ein Gleichgewichtszustand. Dieser ist dadurch charakterisiert, dass die aus der im Modell nachgebildeten Flussstrecke ausgetragene Geschiebemenge der Geschiebezufuhr entspricht, das transportierte Material die gleiche Kornzusammensetzung aufweist, wie das Flussbett und die mittlere Sohlenlage stabil bleibt.

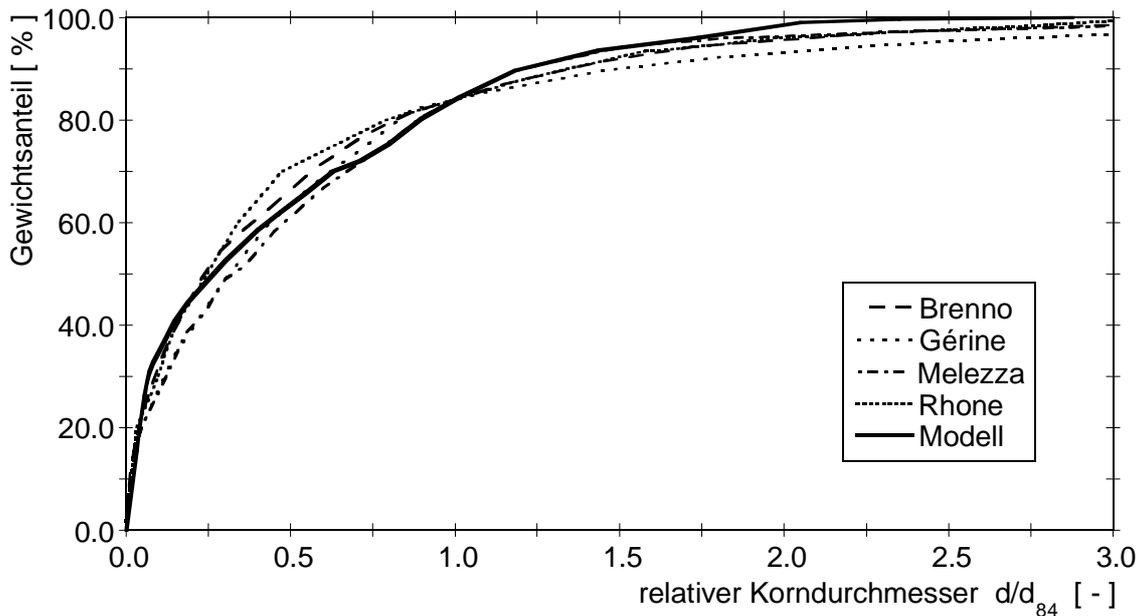


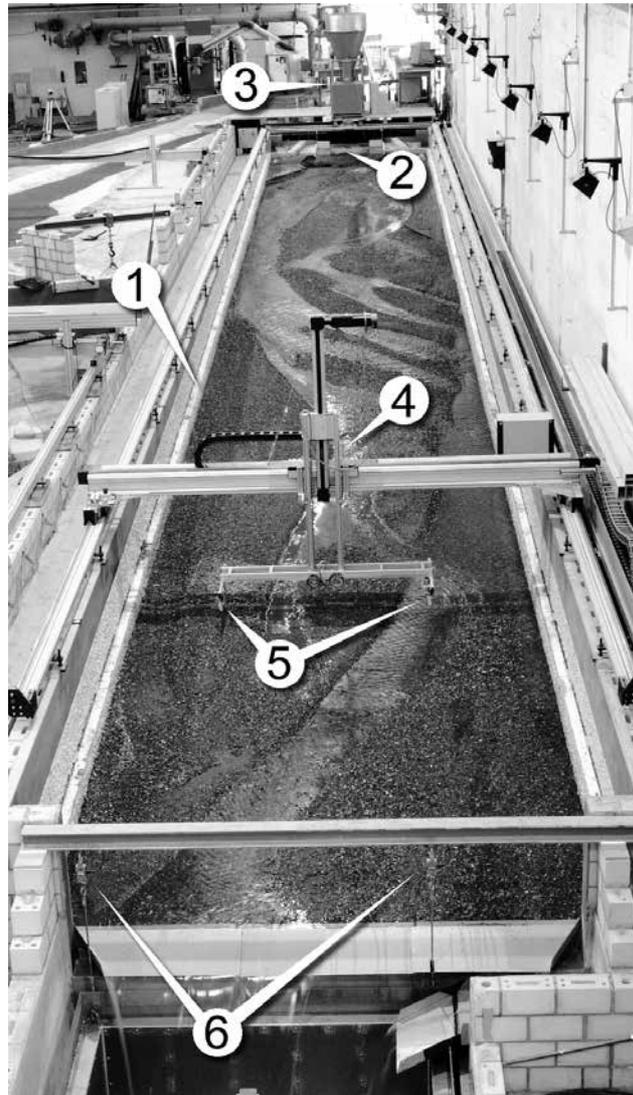
Abb. 3: Kornverteilungskurven des Sohlenmaterials in vier verschiedenen alpinen Flussabschnitten mit verzweigter Morphologie und der verwendeten Kiesmischung im Modell. Die Kornverteilungen sind mit dem charakteristischen Korndurchmesser  $d_{84}$  normiert dargestellt. Durch diese Normierung liegen die Kornverteilungen nahe beisammen, was zeigt, dass das Sohlenmaterial der vier Flüsse gut durch eine Modellmischung repräsentiert werden kann.

Anschließend an die Gleichgewichtsphase werden 2 bis 3 Hochwasserabflüsse simuliert, welche übertragen auf die Natur eine Wiederkehrperiode zwischen 20 und 100 Jahren aufweisen. Zwischen den Abflussspitzen wird wieder die bettbildende Abflussmenge aus der konstanten Phase, nun aber mit einer auf  $1/5$  reduzierten Geschiebezufuhr eingestellt. Damit werden die angesprochenen Perioden mit geringem Geschiebeeintrag simuliert, wie sie heute für viele alpine Flüsse charakteristisch sind.

Die für die Untersuchung verwendete Rinne (Abb. 4) weist eine Länge von 28.5 m und eine Breite von 3.2 m auf. Die Flussbettbreite kann durch seitliche Begrenzungselemente variiert werden und mit Hilfe von beweglichen Ein- und Auslaufschwelen können Längsgefälle zwischen 1.4 % und 2.8 % realisiert werden. Die Simulation der Hochwasserereignisse inklusive variabler Geschiebezufuhr wird durch ein Steuerprogramm ermöglicht. Am unteren Ende der Rinne wird das ausgetragene Sohlenmaterial in einem Korb aufgefangen und mittels Wägezellen laufend gewogen. Von der Decke aus kann ein 11 m langer Ausschnitt der Rinne mittels Digitalkamera während der ganzen Versuchsdauer überwacht werden und für die Vermessung der Sohlentopographie sind Laserdistanzmesser an einem automatischen XYZ-Positioniersystem angebracht.

Abb. 4: Übersicht über die neue Laborrinne.

- 1) verschiebliche Seitenelemente
- 2) Einlauf
- 3) Geschiebebeschickungsmaschine
- 4) XYZ-Positioniersystem
- 5) Laser- und Ultraschallsensoren
- 6) Geschiebesammelkorb an Wägezellen.



Die Laserdistanzmesser erlauben im trockenen Zustand eine detaillierte Aufnahme der Topographie (Abb. 5a). Mit zusätzlich angebrachten Ultraschall-distanzmessern kann während dem laufenden Versuch die Wasserspiegellage erfasst werden, wobei der Laser gleichzeitig die Sohle detektiert. Dies ermöglicht die Bestimmung der lokalen Abflusstiefen (Abb. 5b). Wird zusätzlich noch die Standartabweichung des Lasersignals ausgewertet, scheint sogar eine Unterscheidung von abfluss- bzw. geschiebetransportwirksamen Zonen möglich (Abb. 5c).

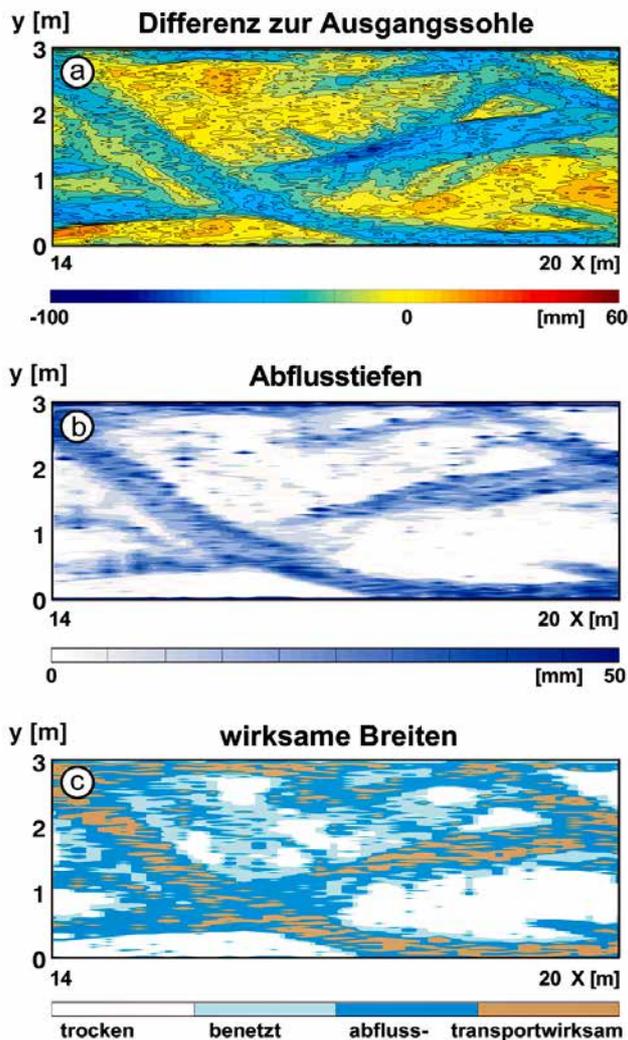


Abb. 5: Beispielhafte Resultate aus einer Laser- und Echolotmessung.

- Höhendifferenzen zur plan eingebauten Ausgangssohle.
- Lokale Wassertiefen ermittelt aus der Differenz zwischen Echolot- und Lasermessung.
- Aus der Standardabweichung des Lasersignals ausgewertete abfluss- und geschiebetransport-wirksame Zonen. Dargestellt ist jeweils nur ein mittlerer Ausschnitt aus der Versuchsrinne.

#### 4. Morphologische Variationen und Einfluss von Störungen

Alle durchgeführten Versuche zeigen, dass auch bei konstantem Abfluss und konstanter Geschiebezufuhr der Geschiebetransport starken Schwankungen unterworfen ist. Erst nach längerer Zeit stellt sich jeweils ein Gleichgewicht zwischen Geschiebezufuhr und Austrag ein. Wie erste Auswertungen dieser Gleichgewichtsphase zeigen (Marti & Bezzola, 2004), muss bei der verwendeten breiten Kornverteilung zur Berechnung der Geschiebetransportkapazität der Ansatz von Zarn (1997) angepasst werden. Auch ein verbesserter Berechnungsansatz kann aber nur einen zeitlich gemittelten Näherungswert für den Geschiebetransport liefern. Es liegt an der immer wieder wechselnden Sohlenmorphologie, dass in verzweigten Flüssen die Geschiebeführung starken Schwankungen unterworfen ist. Dies zeigten auch Studien von Warburton & Davies (1994) und Hoey et al. (2001). Dank der kontinuierlichen Erfassung des Geschiebeaustrages und der Aufzeichnung mit der Kamera ist es nun möglich,

Extremwerte im Austrag mit der jeweils vorherrschenden Sohlenmorphologien zu korrelieren. So wird wenig Geschiebe transportiert, wenn der Fluss stark verzweigt ist, das heisst viele einzelne Gerinnearme aufweist. Extreme Austragspitzen treten dagegen dann auf, wenn ein einzelner Gerinnearm dominant wird und sich dieser durch seitliche Erosion zusätzlich verlagert. Es zeigt sich, dass die Seitenerosion in verzweigten Gerinnen für die Geschiebemobilisierung eine wichtige Rolle spielt.

Im Anschluss an den Versuchsteil mit konstanten Randbedingungen, wurde jeweils auf der Basis der entstandenen Sohlenmorphologie eine Versuchsphase mit variabler Wasser- und Geschiebezufuhr durchgeführt. Die während dieser instationären Versuchsphasen gemachten Beobachtungen werden beispielhaft am Versuch GL S3-1A erläutert (Abb. 6). Im obersten Teilbild sind der Abfluss, die Geschiebezufuhr sowie der gemessene Geschiebeaustrag dargestellt. Mit a) bis d) sind Zeitpunkte markiert, an welchen die Sohlentopographie vermessen wurde. Die entsprechenden Aufnahmen a) bis d) zeigen jeweils die Sohlendifferenz zu der bei Versuchsbeginn plan eingebauten Sohle. Blau eingefärbt sind Stellen, wo Erosion auftrat und rote Bereiche markieren Auflandungen. Während der Hochwasserwelle in den ersten 5 Stunden des Versuchs wurde die Geschiebezufuhr auf die zuvor berechnete Geschiebetransportkapazität des Versuchsgerinnens ausgelegt. Wie der Vergleich zwischen der Eintrags- und der Austragskurve in Abbildung 6 oben zeigt, war die tatsächliche Geschiebeführung aber höher, als die im Voraus berechnete. Es muss folglich eine gewisse Erosion aufgetreten sein. Gegenüber der Topographie vor der Hochwasserwelle (Abb. 6a) ist diese vom Einlauf her in den beiden nachfolgenden Topographieaufnahmen (Abb. 6b und c) ersichtlich. Sowohl nach der Abflussspitze (Abb. 6b) als auch nach der Hochwasserwelle (Abb. 5c) lassen aber die Sohlentopographien in der unteren Hälfte der Rinne noch 3 bis 4 Abflussarme erkennen. In der nachfolgenden Phase mit dem reduzierten Geschiebeeintrag zog sich der Fluss dagegen in ein mäandrierendes Einzelgerinne zurück und tiefte sich stark ein (Abb. 6d). Wie auch die Abbildungen 7a) und b) verdeutlichen hat der Mangel an eingetragenen Geschiebe zu einer monotoneren Erscheinungsform geführt, die begünstigt durch die Sohlabpflasterung auch von einer kleineren Dynamik geprägt ist.

Der hier vorgestellte Versuch GL S3-1A ist kein Einzelfall. Eine Reduktion der Teilgerinneanzahl kann tendenziell bei allen Versuchen mit reduzierter Geschiebezufuhr beobachtet werden. Analog zum Versuch GL S3-1A ergab sich bei drei weiteren Versuchen ein stabiles Einzelgerinne. Damit ein Fluss wieder aus einem solchen selbst erodierten "Kanal" ausbricht, braucht es ein erneutes Ereignis mit grosser Geschiebezufuhr. Da solche Extremereignisse in der Natur

selten sind, kann, auf den lange Zeit nicht überströmten Bänken und Terrassen, Vegetation aufkommen. Diese bietet der Erosion und damit einer erneuten Verzweigung zusätzlichen Widerstand. Über längere Zeit steht damit dem Fluss nur noch die vergleichsweise kleinere Breite des Einzelgerinnes zur Verfügung.

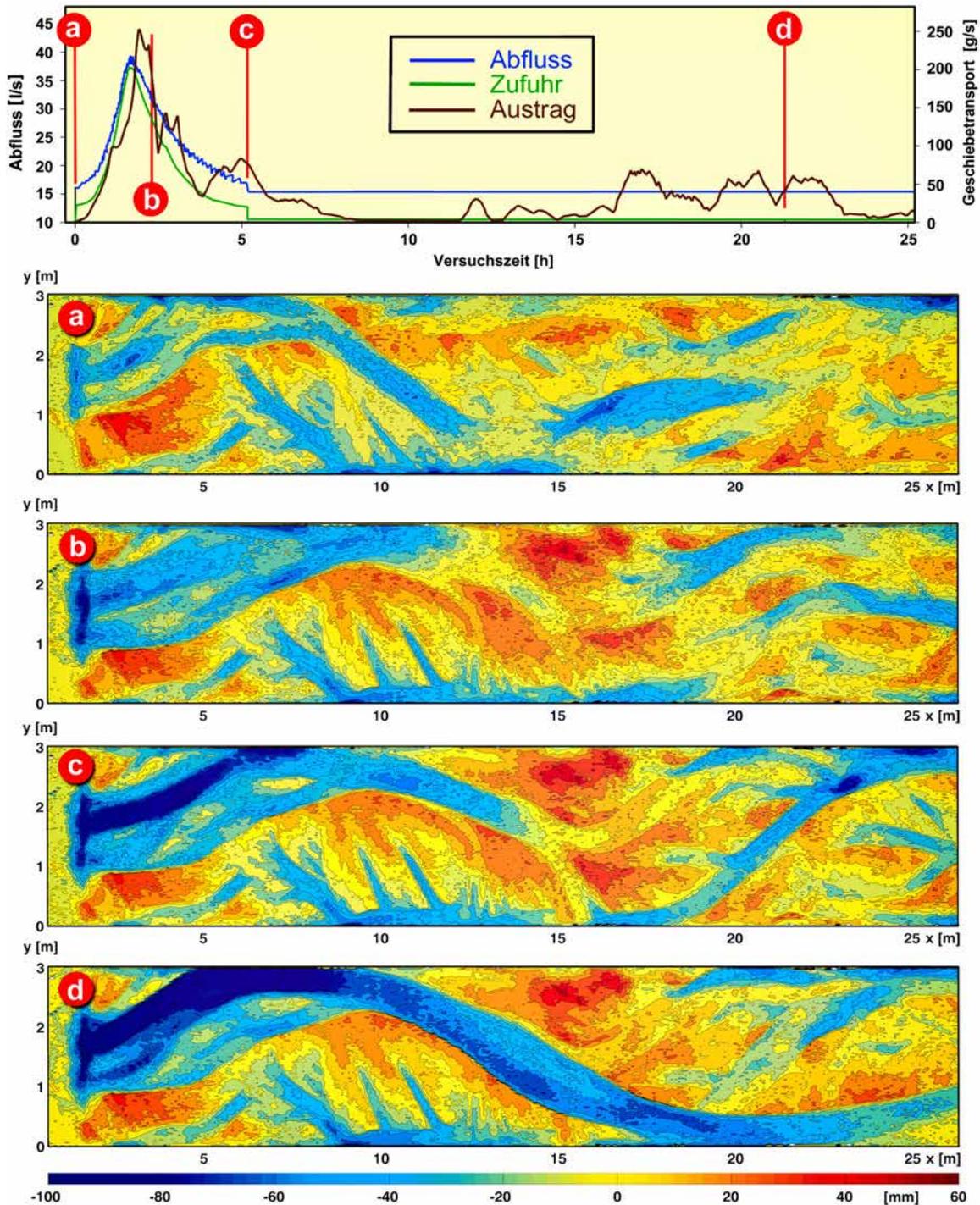


Abb. 6: Abfluss, Geschiebezufuhr und Geschiebeaustrag während Versuch GL S3-1A und die zugehörigen Topographienaufnahmen zu den Zeitpunkten a) bis d); blau: Stellen, an denen Erosion auftrat; rot: Auflandungen.

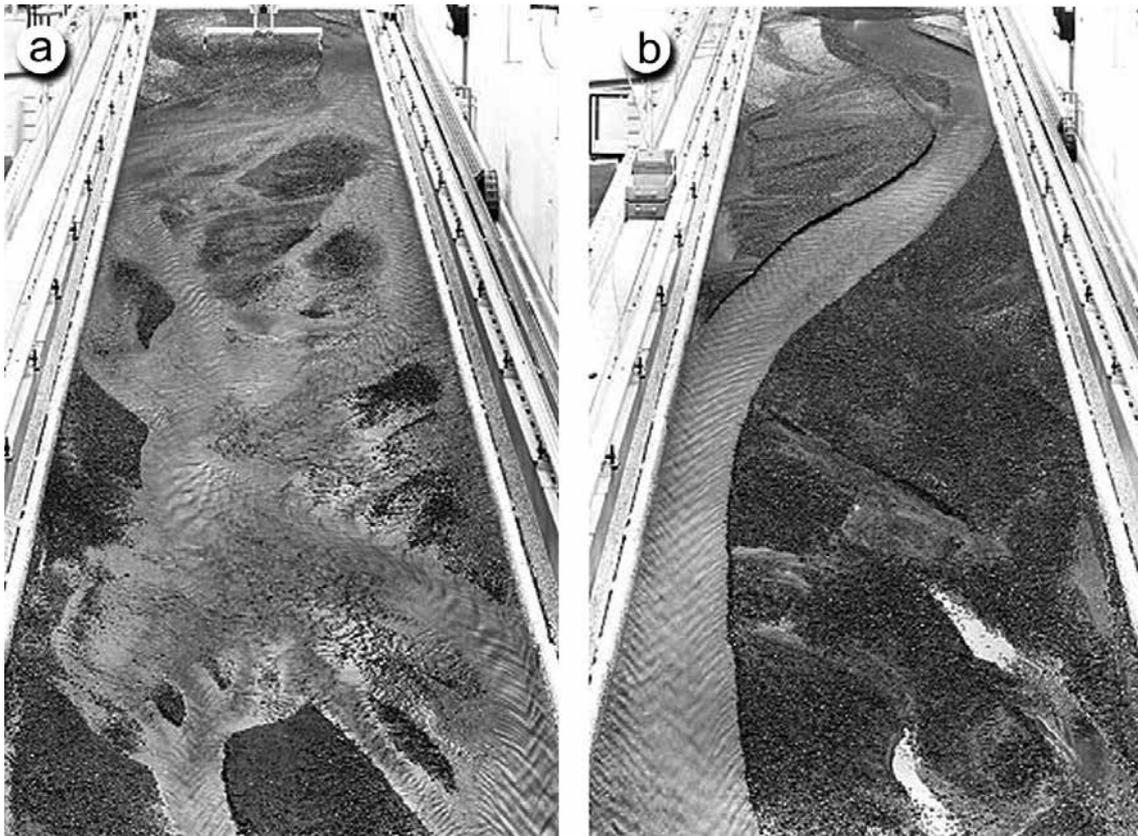


Abb. 7: Abflussbilder zu Versuch GL S3-1A. a) Noch verzweigte Morphologie vor der Hochwasserwelle. b) Dominantes Einzelgerinne am Ende des Versuchs nach der Phase mit reduzierter Geschiebezufuhr.

Mit welcher mittleren Flussbettbreite man in einem solchen Fall rechnen kann, lässt sich aus den vier Versuchen in erster Näherung mit Hilfe von Vergleichsbreiten abschätzen. Als Vergleichsbreiten werden hier die Gleichgewichtsbreite  $B_{GI}$  von Ikeda et al. (1988) und die sogenannte optimale Breite  $B_{Opt}$  verwendet. Die Bezeichnung "optimal" bezieht sich in diesem Zusammenhang auf die Geschiebetransportkapazität. Die optimale Breite wird als die Breite definiert, bei welcher für den bettbildenden Abfluss bei gegebenem Gefälle die grösste Geschiebetransportrate resultiert. Im vorliegenden Fall wurde die jeweilige Transportkapazität mit der klassischen Formel nach Meyer-Peter & Müller (1948) berechnet. Wie der Tabelle 1 entnommen werden kann, betragen die gemessenen Endbreiten der vier Versuche lediglich  $1/4$  bis  $1/3$  der Gleichgewichtsbreite  $B_{GI}$  nach Ikeda et al. (1988). Sie sind aber um einen Faktor von 1.9 - 2.3 grösser als die berechnete optimale Transportbreite  $B_{Opt}$ .

Während der Phase mit reduziertem Geschiebeeintrag verringert sich, neben der Anzahl der Teilgerinne, auch das Talweggefälle um 0.1 bis 0.3 %.

Versuch Nr.	Grundgrößen		Rechnung		Messung	Faktoren	
	$J_{\text{Talw}}$ [-]	Q [l/s]	$B_{\text{Gl}}$ [m]	$B_{\text{Opt}}$ [m]	$B_{\text{EG}}$ [m]	$B_{\text{EG}}/B_{\text{Gl}}$	$B_{\text{EG}}/B_{\text{Opt}}$
HS1-2A	0.01552	21.48	3.10	0.45	0.92	0.30	2.06
HS2-2B	0.01388	29.26	3.63	0.52	1.01	0.28	1.95
HS3-1A	0.01917	15.75	3.04	0.40	0.79	0.26	1.98
HS4-1A	0.02003	12.81	2.63	0.36	0.83	0.32	2.31

Tab. 1: Gemessene Endbreiten nach der Phase mit Reduzierter Geschiebezufuhr und berechnete Vergleichsbreiten. Als Vergleichsbreiten dienen die Gleichgewichtsbreite  $B_{\text{Gl}}$  nach Ikeda et al. (1988) und die sogenannte optimale Transportbreite  $B_{\text{Opt}}$ .

## 5. Folgerungen und Ausblick

Die Versuche zeigen, dass der Geschiebetransport in breiten Flussabschnitten stark von der aktuellen Sohlenmorphologie beeinflusst wird. Herkömmliche Geschiebetransportformeln berücksichtigen diesen Aspekt nicht. Sofern sich über einen längeren Zeitraum die Schwankungen der Sohlenmorphologie gegenseitig ausgleichen, können Formeln, welche für verzweigte Gerinne hergeleitet wurden, aber einen ersten Anhaltspunkt über die transportierten Geschiebefrachten liefern. Eine Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung von Abflusstiefe und benetzter Breite, wie dies schon Pickup & Higgins (1979) vorschlagen, erlaubt es eventuell der wechselnden Sohlenmorphologie besser Rechnung zu tragen. Dies wird gegenwärtig mit Hilfe der gewonnen Versuchsdaten untersucht.

Aus den Versuchen mit reduzierter Geschiebezufuhr, geht aber auch klar hervor, dass die Beeinflussung zwischen Sohlenmorphologie und Geschiebetransport gegenseitig ist. Eine im Vergleich zur Transportkapazität geringere Geschiebezufuhr, reduziert die Strukturvielfalt der Sohle rasch, da sich der dominante Abflussarm eintieft und den anderen Teilgerinnen das Wasser "abgräbt". Gleichzeitig kann aber die Transportkapazität durch diese Abflusskonzentration zunehmen und die Entwicklung hin zu einem Einzelgerinne noch beschleunigen. Beeinflusst durch die Sohlabpflasterung und das Aufkommen von Vegetation auf den nicht mehr überströmten Kiesbänken, wird ein neuer Gleichgewichtszustand mit einer wesentlich kleineren Flussbettbreite erreicht. Wendet man für die beschriebenen vier Versuche das in Kapitel 2 erläuterte Diagramm von da Silva auf die ursprünglich Flussbettbreite und auf die neu entstandene, kleinere "bankfull width" des entsprechenden Einzelgerinnes an, ist ersichtlich, dass die reduzierte Geschiebezufuhr zu einer Reduktion der morphologischen Stufe von "verzweigt" zu "alternierend" führt (Abb. 8). Allerdings bilden sich nicht klassische alternierende Kiesbänke aus, wie sie in Abbildung 2 am Beispiel des

Alpenrheins veranschaulicht sind. Solche Strukturen ergeben sich nur bei fixen und mehr oder weniger geradlinigen Ufern. Bei den Einzelgerinnen in den Versuchen sind die Ufer dagegen frei erodierbar und, wie Abbildung 7b) zeigt, entwickelt sich eine Zwischenform von alternierenden Bänken und Mäandern.

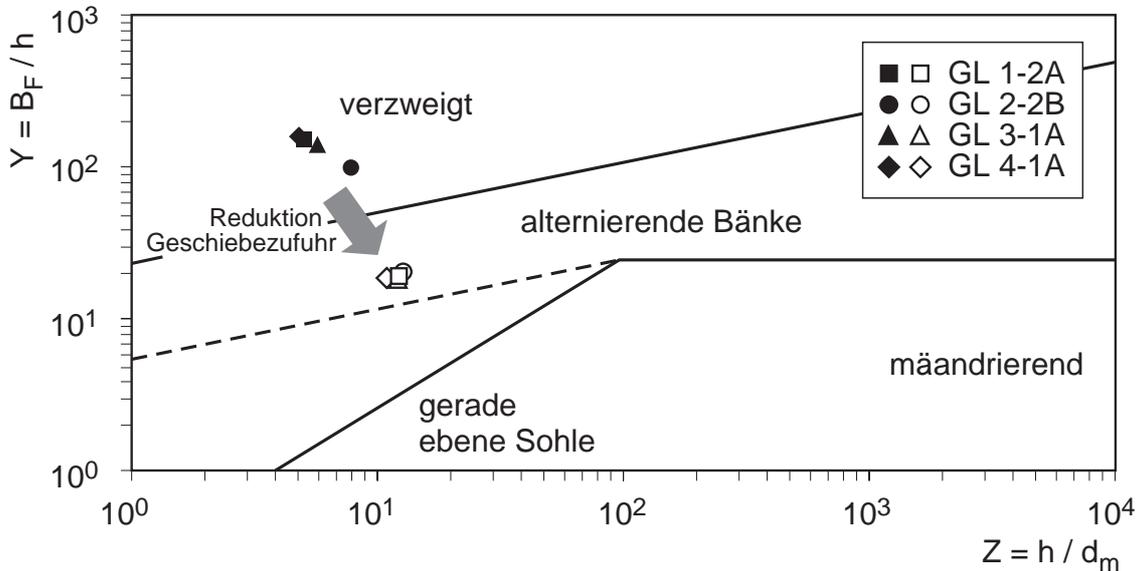


Abb. 8: Morphologisches Diagramm nach da Silva (1991). Eingezeichnet sind die vier Versuche, bei welchen, ausgelöst durch eine Reduktion der Geschiebezufuhr, die Entwicklung eines Einzelgerinnes beobachtet werden konnte. Die schwarzen Symbole stehen für die Breiten- und Abflusstiefenverhältnisse vor dem Reduzieren der Geschiebezufuhr, wo noch eine verzweigte Morphologie herrschte. Die weißen Symbole zeigen die Situation rund 20 h nach der Reduktion der Geschiebezufuhr. Gestrichelt eingezeichnet ist die Abgrenzungslinie zwischen "ebener Sohle" und "alternierenden Bänken", wie sie Zarn (1997) vorschlägt.

Ausgehend von dieser Monotonisierung der Morphologie und unter dem Aspekt, dass die meisten Talflüsse in der Schweiz generell an Geschiebedefizit leiden, müssen Aufweitungen mit dem Ziel eine verzweigte Struktur zu erreichen gut überlegt sein. Bei zu geringer Geschiebezufuhr werden sich die gewünschten verzweigten Strukturen gar nicht ausbilden. Eine genaue Überprüfung des Geschiebehalt unter Einbezug des relevanten Einzugsgebietes ist daher unerlässlich. Gegebenfalls muss flussaufwärts wieder vermehrt eine Geschiebezufuhr aus den Seitenbächen zugelassen oder Seitenerosion ermöglicht bzw. aktiv gefördert werden. Das richtige Gleichgewicht zu finden zwischen dem, häufig im Interesse des lokalen Hochwasserschutzes realisierten, Geschieberückhalts und der Weiterleitung des Geschiebes zur Steigerung der ökologischen Diversität im Talfluss, ist nicht einfach. Eine gezielte Geschiebebe-

wirtschaftung muss deshalb vermehrt ins Auge gefasst werden. Dazu sind auch verbesserte Berechnungsansätze zur Abschätzung der Geschiebetransportkapazität und der Geschiebefrachten in verzweigten Flussstrecken notwendig. Die in den präsentierten Versuchen erhobenen detaillierten Topographiedaten und der kontinuierlich erfasste Geschiebeaustrag, werden helfen, hier einen Schritt voranzukommen. Gleichzeitig bilden diese Daten auch eine gute Basis für die Validierung von numerischen Modellen.

## Literatur

- Bridge, J. S. (1993) The interaction between channel geometry, water flow, sediment transport and deposition in braided rivers. In: Braided Rivers (Ed. by J. L. Best and C. S. Bristow), pp. 13-72. Geological Society, London. Geological Society Special Publication No. 75.
- Da Silva, A. M. A. F. (1991) Alternate bars and related alluvial processes. Thesis of Master of Science, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.
- Hunzinger, L. M. (1998) Flussaufweitungen - Morphologie, Geschiebehaushalt und Grundsätze zur Bemessung. Mitteilung Nr. 159, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich, Zürich, pp. 206.
- Hoey, T., Cudden, J. and Shvidchenko, A. (2001) The consequences of unsteady sediment transport in braided rivers. In: Gravel-Bed Rivers V (Ed. by P. M. Mosley), pp. 121-140. New Zealand Hydrological Society, Wellington, New Zealand.
- Ikeda, S., Parker, G. and Kimura, Y. (1988) Stable width and depth of straight gravel rivers with heterogeneous bed materials. *Water Resources Research*, 24(5), 713-722.
- Jaeggi, M. (1983) Alternierende Kiesbänke. Mitteilung Nr. 62, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich, Zürich, pp. 286.
- Marti, C. and Bezzola G. R. (2004) Bed load transport in braided gravel-bed rivers. In: Braided Rivers 2003, IAS Special Publication, Birmingham, UK, (submitted).
- Meyer-Peter, E. and Müller, R. (1948) Formulas for bed load transport. In: 2nd conference of Int. Association for Hydraulic Research, pp. 39-64, Stockholm, Sweden.
- Parker, G. (1979). Hydraulic geometry of active gravel rivers. *Proc. ASCE, Journal of Hydraulic Division*, 40(9), 1185-1201.
- Pickup, G. and Higgins, R. J. (1979). Estimating sediment transport in a braided gravel channel – the Kawerong river, Bougainville, Papua New Guinea. *Journal of Hydrology*, 40, 283-297.

- Warburton, J. and Davies, T. R. H. (1994) Variability of bed load transport and channel morphology in a braided river hydraulic model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19, 403-421.
- Zarn, B. (1997) Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität. Mitteilung Nr. 154, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich, Zürich, pp. 240.

**Adresse der Autoren**

Christian Marti, Gian Reto Bezzola  
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zentrum  
CH-8092 Zürich  
marti@vaw.baug.ethz.ch, bezzola@vaw.baug.ethz.ch