Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 87 (1995)
Heft: 9

Artikel: Der Geschiebehaushalt in lokalen Aufweitungen
Autor: Hunzinger, Lukas / Hunziker, Ronald / Zarn, Benno
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940424

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: 25.12.2025

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

Der Geschiebehaushalt in lokalen Aufweitungen

Lukas Hunzinger, Ronald Hunziker, Benno Zarn

Zusammenfassung

Anhand von numerischen Simulationen werden die Hydraulik und der Geschiebehaushalt in lokalen Gerinneaufweitungen erläutert. Wegen der Veränderung des Querschnittes entlang der Flussachse ist der Abfluss im Bereich von Aufweitungen ungleichförmig, was zu einer Diskontinuität im Geschiebetransport führt. Im Bestreben, das Geschiebe kontinuierlich zu transportieren, passt sich die Sohle des Gerinnes an die veränderten Randbedingungen an, was sich im Fall einer Aufweitung in einer lokalen Auflandung der Sohle manifestiert. Die Sohlenhebung in einer kurzen Aufweitung bleibt ohne Einfluss auf den übergeordneten Geschiebehaushalt, ein grösseres Gleichgewichtsgefälle innerhalb einer langen Aufweitung dagegen führt zu einer Erhöhung der Sohlenlage flussaufwärts.

Die Formen und die Dynamik der Sohle in einem aufgeweiteten Querschnitt erhöhen die Vielfalt an Fliessstrukturen. In einer Aufweitung werden die Ufer stärker beansprucht als in einem Gerinne mit eindimensionalen Abflussverhältnissen.

Résumé: Le bilan du transport solide dans des élargissements locaux d'une rivière

L'hydraulique et le bilan du transport solide par charriage dans des élargissements locaux d'une rivière sont expliqués à l'aide de simulations numériques. La variation de la section d'écoulement le long de l'axe du cours d'eau engendre un écoulement non uniforme et une discontinuité du transport du sédiment. En tendant vers une situation d'équilibre, le lit de la rivière s'adapte aux nouvelles conditions et subit un réhaussement local. Un tel réhaussement n'a pas d'influence sur le bilan général du transport solide de la rivière lorsque l'élargissement est limité à un tronçon de faible longeur. Si l'élargissement est plus étiré, une pente d'équilibre plus prononcée s'installe dans celui-ci et engendre un réhaussement du lit vers l'amont.

Les formes et la dynamique du lit dans les élargissements locaux d'une rivière entraînent une grande diversité de la structure d'écoulement. Dans les élargissements, les berges sont plus soumises à l'érosion que celles d'un canal à écoulement unidimensionnel.

1. Einleitung

Seit der vielbeachteten Realisierung der ersten Etappe der «Birne» Emme bei Utzenstorf erfreuen sich lokale Gerinneaufweitungen als Verbauungsmassnahmen im modernen Flussbau immer grösserer Beliebtheit. An der Thur wurden beispielsweise im Jahre 1991 bei Pfyn/Felben (Bild 1) und im Rahmen der Korrektion von 1993/94 zwischen Ror und Uesslingen (Kanton Thurgau) lokale Aufweitungen realisiert. Im Bau oder in Planung sind zudem weitere Aufweitungen an verschiedenen Flüssen und Bächen, so am Rhein bei Felsberg, am Rom im Münstertal und auch an der Drau in Österreich.

Mit lokalen Aufweitungen kann die Uferlinie eines verbauten Flusses aufgelockert und dem Gewässer ein Teil seiner natürlichen Dynamik zurückgegeben werden. Die Sohlenformen, die sich im Bereich einer Aufweitung bilden können, erhöhen die Variabilität von Fliessgeschwindigkeit, Abflusstiefe und benetzter Breite, was sich positiv auf die Lebensgemeinschaften im Fliessgewässer auswirkt.

Nicht jede Aufweitung wirkt sich auf die Sohlenlage flussaufwärts aus, wie das nach der Realisierung der zweiten Etappe der «Birne» an der Emme geschehen sollte. Dieser Beitrag soll zeigen, dass je nach den Abmessungen einer Aufweitung der Geschiebehaushalt nur lokal beeinflusst wird. Die zum Teil neuen Erkenntnisse sind Ergebnisse von Naturbeobachtungen und von eingehenden Untersuchungen im Rahmen der Auftragsforschung an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich.

2. Allgemeine Grundlagen

2.1 Gerinnebreite und Morphologie

Die natürlichen Flüsse können nach ihrer Erscheinungsform (Morphologie) in gerade, verzweigte und mäandrierende Gerinne und ihre jeweiligen Übergangsformen unterteilt werden (Bild 2). Welche Morphologie ein Fluss aufweist, wird hauptsächlich durch die Grössen Gerinnebreite, Gefälle, Abflusstiefe und Korngrösse des Geschiebes bestimmt (*Leopold* und *Wolman*, 1957).

Einer Vielzahl von Flüssen in der Schweiz wurde durch Korrektionsmassnahmen ein gerades Gerinne aufgezwungen. Sie weisen eine geringe Breite auf, und ihre Sohle ist in der Regel nahezu eben. Natürliche, längere gerade Gerinne sind selten und treten nur dort auf, wo der Lauf des Flusses durch Hindernisse, beispielsweise durch Fels, vorbestimmt ist.

Hat ein Fluss mehr Raum zur Verfügung, können sich Bänke bilden oder der Fluss kann sich gar verzweigen. Der Nieder- und Mittelwasserabfluss ist dann in mehrere Arme aufgeteilt. In der Schweiz gibt es nur noch wenige verzweigte Gerinne; ein bekanntes Beispiel davon ist die Maggia bei Someo.

Mäandergerinne sind mehr oder weniger regelmässig gekrümmte Einzelgerinne. Sie haben eine im Vergleich zur Abflusstiefe geringere Breite als verzweigte Flüsse.

2.2 Gerinnebreite und Geschiebetransportkapazität

Viele der bekannten Geschiebetransportformeln, wie z. B. diejenige von *Meyer-Peter* und *Müller* (1948) oder diejenige von *Smart* und *Jäggi* (1983), quantifizieren den Geschiebetrieb q_B pro Laufmeter Flussbreite als eine Funktion der auf die Sohle wirkenden Schleppspannung. Die massgebende Grösse für die Berechnung der Schleppspannung ist dabei das Produkt von Gefälle und Abflusstiefe, welche wieder-

Bild 1. Lokale Aufweitung der Thur bei Pfyn/Felben.

um von der Gerinnebreite und der durch die Korngrösse bestimmten Sohlrauhigkeit abhängt. Um den gesamten Transport Q_B in einem Querschnitt zu berechnen, muss der spezifische Geschiebetransport mit der Breite der Sohle multipliziert werden. Es gilt also:

$$q_B = f\{h, J, d\} \quad (1a)$$
$$Q_B = q_B \cdot B \quad (1b)$$

mit
- q_B = Geschiebetransport pro Meter Gerinnebreite [kg/s m]
- Q_B = Geschiebetransport [kg/s]
- h = Abflusstiefe[1] [m]
- J = Gefälle [-]
- B = Flussbettbreite [m]
- d = massgebende Korngrösse des Geschiebes [m]

Die Breite B hat einen massgebenden Einfluss auf die Transportkapazität eines Gerinnes. Für einen gegebenen Abfluss und ein gegebenes Gefälle gibt es für jeden Fluss eine Breite, bei welcher die Transportkapazität maximal wird (Bild 3). Diese Breite wird in der Literatur häufig als «optimale» Breite bezeichnet – offenbar ein Ausdruck aus einer Zeit, in welcher bei Flussverbauungen eine maximale Transportleistung der Gerinne angestrebt wurde.

Ist ein Gerinne schmaler als seine «optimale» Breite, wird die Schleppspannung durch den Einfluss der Ufer vermindert und es steht auch nur eine geringe Breite zum Geschiebetransport zur Verfügung. Je breiter das Gerinne ist, desto geringer ist die Abflusstiefe h, und die Transportkapazität nimmt trotz der grösseren Breite ab. Mit den gängigen Fliessgesetzen und Transportformeln kann die Transportkapazität für grosse Breiten aber kaum mehr zutreffend beschrieben werden. Sowohl die Formel von *Meyer-Peter* und *Müller* als auch diejenige von *Smart* und *Jäggi* wurden in Modellversuchen ermittelt, bei denen das Verhältnis von Breite zu Abflusstiefe relativ klein war ($B/h < \approx 30$). Die Transportkapazität von Flüssen grosser Breite dürfte mit diesen Formeln eher unterschätzt werden. An der VAW sind zurzeit Untersuchungen im Gang, mit welchen eine Methode zur Bestimmung der Geschiebetransportkapazität für breite Flüsse mit einem Verhältnis B/h bis 350 abgeleitet werden soll.

[1] Ist das Verhältnis von $B/h > \approx 10$, wird zur Vereinfachung anstelle des auf die Sohle bezogenen hydraulischen Radius R_b die Abflusstiefe h in die Transportformeln eingesetzt.

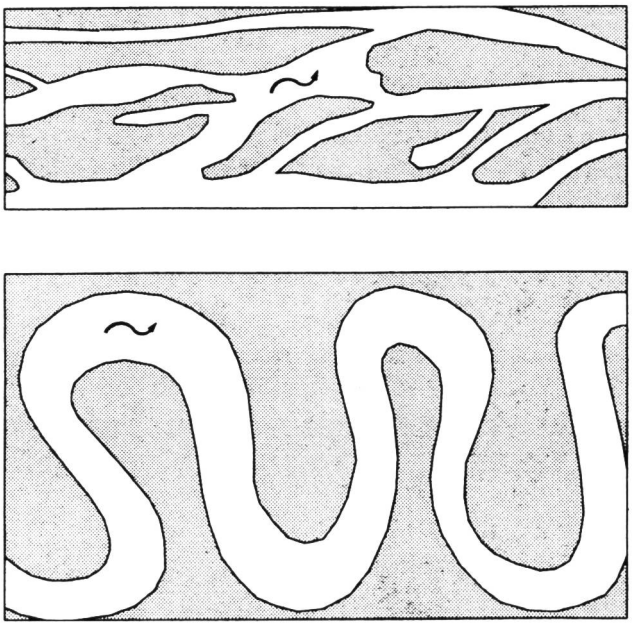

Bild 2. Grundrissformen eines verzweigten und eines mäandrierenden Flusses. Das Verzweigungsmuster ist das Resultat eines Laborversuches an der VAW.

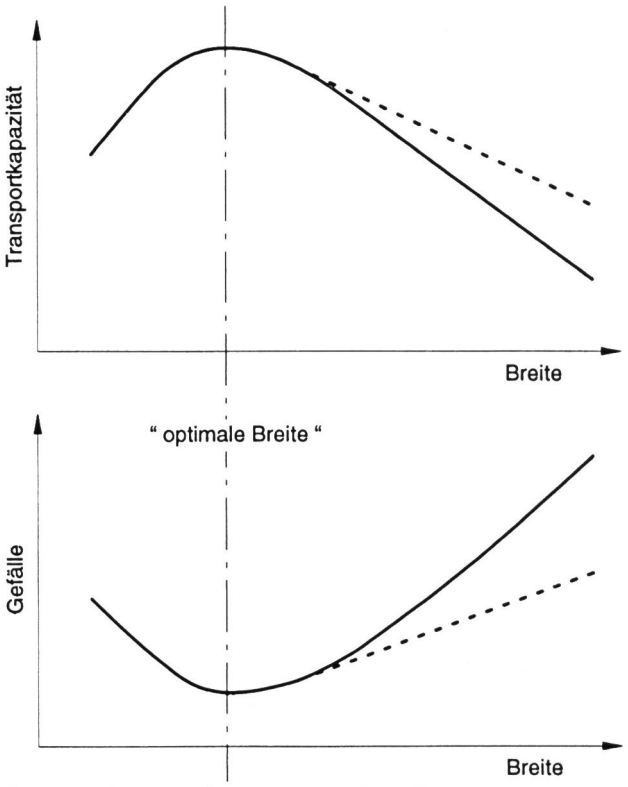

Bild 3. Einfluss der Gerinnebreite auf die Transportkapazität bei gleichbleibendem Gefälle (oben) und Gleichgewichtsgefälle für verschiedene Gerinnebreiten bei gleichbleibendem Geschiebeeintrag (unten). Mit den gängigen Transportformeln wird die Transportkapazität für grosse Breiten unterschätzt bzw. das Gleichgewichtsgefälle überschätzt (ausgezogene Linie). Laufende Untersuchungen an der VAW versuchen auch für diesen Bereich gültige Formeln herzuleiten (gestrichelte Linie).

2.3 Gerinnebreite und Längenprofil

Ein Fluss strebt ein *dynamisches Gleichgewicht* an, das dann erreicht ist, wenn die aus dem Einzugsgebiet anfallende Geschiebemenge auf der ganzen Flussstrecke transportiert werden kann. Ändert sich nun von einem Streckenabschnitt zum anderen die Gerinnebreite und damit die Abflusstiefe und bleibt das Sohlenmaterial dasselbe, muss sich gemäss Gleichungen (1a und 1b) das Gefälle ändern, damit eine konstante Transportleistung erreicht wird. In Bild 3 ist deshalb auch die Beziehung zwischen Gerinnebreite und Gefälle bei gleichbleibender Transportleistung dargestellt. Bei der «optimalen» Breite ist das Gleichgewichtsgefälle am kleinsten, und mit zunehmender Breite wird der Fluss steiler. Diese Überlegung führte zur Idee, die Sohle der Emme bei Utzenstorf mit einer lokalen Gerinneaufweitung zu stabilisieren. Durch das steilere Sohlengefälle in der aufgeweiteten Strecke sollte dort eine grössere Höhendifferenz überwunden werden, was den Bau zusätzlicher Schwellen überflüssig machen würde (Bild 4).

3. Neue Erkenntnisse

3.1 Das numerische Modell

Die Ausführungen in Kapitel 2 beruhen auf Betrachtungen von Gleichgewichtszuständen in unendlich langen Gerin-

nen und sind nur unter Normalabflussbedingungen gültig.[2] Die Verbreiterung vom ursprünglichen Gerinne zum aufgeweiteten und die anschliessende Verengung werden dabei nicht berücksichtigt. Numerische Simulationen zeigen nun aber, dass diesen Übergängen eine besondere Bedeutung zukommt, weil sie einen ungleichförmigen Abfluss bewirken und dadurch die Sohlenlage im Bereich der Aufweitung markant beeinflusst wird.

In den folgenden Abschnitten wird am Beispiel einer langen und einer kurzen schematischen Gerinneaufweitung der Einfluss von Verbreiterung und Verengung auf die Sohlenlage dargestellt. Dazu wurde mit dem numerischen Simulationsmodell MORMO (*Hunziker*, 1995) ein 46 m breiter Rechteckkanal modelliert, wobei der Kanal einmal entlang einer Strecke von 1000 m (lange Aufweitung) und einmal entlang einer Strecke von 300 m (kurze Aufweitung) um das Anderthalbfache seiner Breite aufgeweitet wurde (Bild 5 links und rechts unten). Die übrigen Parameter waren in beiden Fällen gleich. Das Gefälle im Kanal betrug 1,7 ‰, das Geschiebe wurde durch ein Einheitskorn mit einem Durchmesser von 2,27 cm modelliert, und die Rauhigkeit der senkrechten Ufer entsprach einem k_{str}-Wert von 100 $m^{1/3}/s$, um den Wandeinfluss so gering als möglich zu halten.

Bei einem konstantem Abfluss von 330 m^3/s und einem Geschiebeeintrag von 102 kg/s (was der Transportkapazität des Kanals nach der modifizierten Formel von *Meyer-Peter* entspricht) wurden die Sohlenveränderungen solange berechnet, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht wurde. Dieser konnte allerdings nur asymptotisch angenähert werden, und die Simulation wurde nach 20 000 Stunden (2,3 Jahren) abgebrochen.

3.2 Eine lange lokale Aufweitung

Als Resultate der Simulation mit der 1000 m langen Aufweitung sind in Bild 5 links die Transportkapazität, die Sohlenlage sowie der Wasserspiegel und die Energielinie dargestellt, und zwar je einmal zu Beginn und zum Schluss der Simulation. Zu Beginn der Berechnung führt der Wechsel von Beschleunigung und Einstau im Bereich der Übergänge zu einer Diskontinuität im Geschiebetransport (Bild 5 oben links). Währenddem die Transportkapazität in der Beschleunigungsstrecke beim Einlauf in die Aufweitung lokal stark erhöht wird und deshalb Geschiebe aus der Sohle aufgenommen wird, ist sie im verbreiterten Abschnitt geringer und fällt wegen des Rückstaus vor der Verengung sogar ganz auf Null zusammen. Das von oben herangeführte Geschiebe wird deshalb in der aufgeweiteten Strecke abgelagert. Im Unterwasser der Aufweitung herrscht vorübergehend ein Defizit in der Geschiebezufuhr, welches durch Erosion ausgeglichen wird.

Die Geschiebeablagerung in der Aufweitung führt dazu, dass die Ungleichförmigkeit des Abflusses abnimmt und die Unstetigkeit im Geschiebetransport ausgeglichen wird. Die anfänglich erodierten Abschnitte beim Einlauf und im Unterwasser der Aufweitung werden wieder aufgefüllt, und im Gleichgewichtszustand verbleibt eine markante Auflandung innerhalb der lokalen Aufweitung. Die Höhe dieser Auflandung beträgt am unteren Ende der Aufweitung 0,71 m und am oberen Ende 0,96 m.

In einem mittleren Bereich der Aufweitung, in welchem sich der Einfluss der Übergänge nicht mehr bemerkbar macht, herrschen dieselben Bedingungen wie in einer unendlich langen Strecke mit der entsprechenden Gerinnebreite (Normalabfluss). Dort stellt sich ein neues Gleichgewichtsgefälle J_A von 2,06 ‰ ein. Diese Strecke kann als wirksame Länge L' bezeichnet werden. Wegen des steileren Gefälles wird die Energielinie und mit ihr die Sohle im Oberwasser um den Betrag

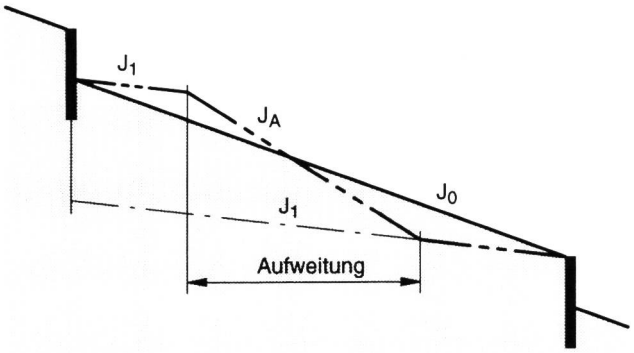

Bild 4. Die lokale Aufweitung als sohlenstabilisierendes Element. Auswirkungen einer Gerinneverbreiterung auf das Längenprofil (aus *Zarn* 1992). J_0 = Gefälle der Ausgangssohle, J_1 = Gefälle der erodierten Sohle, J_A = Gefälle in der Aufweitung.

$$\Delta H_e = \Delta zb = L' \cdot (J_A - J_K) \qquad (2)$$

mit
- ΔH_e = Erhöhung der Energielinie im Oberwasser
- Δzb = Sohlenhebung im Oberwasser
- L' = wirksame Länge der Aufweitung
- J_A = Gleichgewichtsgefälle in der Aufweitung
- J_K = Gleichgewichtsgefälle im Kanal

parallel erhöht. Aus der berechneten Sohlenveränderung von 0,25 m im Oberwasser und der Erhöhung des Gefälles in der Aufweitung um 0,36 ‰ lässt sich im vorliegenden Fall auf eine wirksame Länge L' von rund 700 m schliessen. Die Überlegungen zur «Birne» Emme (Kap. 2, Bild 4) können hier also bestätigt werden.

Es ist aber zu beachten, dass die Sohlenveränderungen in der Aufweitung selbst deutlich grösser sind als diejenigen im Oberwasser.

3.3 Eine kurze lokale Aufweitung

Was geschieht nun in einer kurzen Aufweitung? Hydraulisch gesehen besteht sie quasi nur noch aus Ein- und Auslauf, d. h. aus Beschleunigungsstrecke bei der Verbreiterung und Rückstaustrecke vor der Verengung (Bild 5 rechts). Wie bei der langen Aufweitung wird die Diskontinuität im Geschiebetransport durch eine Sohlenveränderung ausgeglichen, und im Längenprofil nimmt diese Auflandung die charakteristische Form eines Hügels an. Der Betrag s, um welchen die mittlere Sohle in ihrem höchsten Punkt auflandet, ist gleich gross wie am unteren Ende der langen Aufweitung (0,71 m). Hier fehlt aber jener Streckenabschnitt – oder er ist nur sehr kurz –, in welchem sich Normalabfluss und damit ein grösseres Gleichgewichtsgefälle einstellen könnte. Als Folge bleibt die Lage der Sohle, des Wasserspiegels und der Energielinie im Oberwasser nahezu unverändert. Aus der Berechnung geht eine minimale Sohlenhebung von etwa 2 cm hervor, welche ausserdem durch Expansionsverluste bei der Erweiterung mitverursacht worden sein dürften.

In der kurzen Aufweitung tritt das Phänomen der «Hügelbildung» deutlicher zutage als in der langen Aufweitung und ermöglicht einen Vergleich mit der Sohlenveränderung bei einer lokalen Verengung. Wird ein Flussbett lokal einge-

[2] Streng genommen tritt in breiten Gerinnen mit Sohlenformen kein Normalabfluss auf, der Begriff wird hier aber trotzdem weiter verwendet.

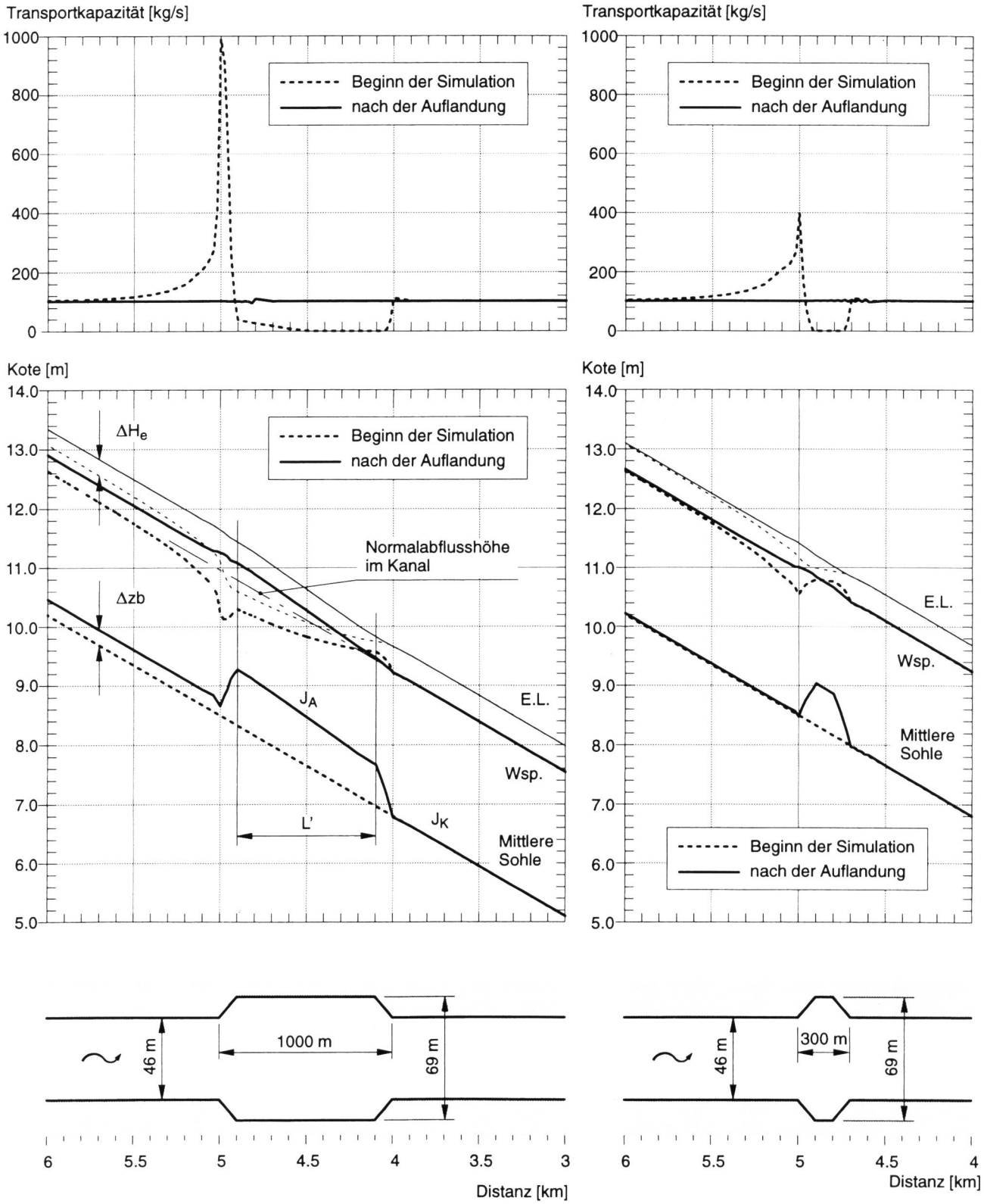

Bild 5. Numerische Simulation des Geschiebetransportes und der Sohlenveränderungen in einer schematischen, langen Aufweitung (links) und in einer kurzen Aufweitung (rechts). Transportdiagramm, Längenprofil mit mittlerer Sohle, Wasserspiegel und Energielinie sowie Situation. Die gestrichelte Linie zeigt jeweils den Zustand bei Beginn der Berechnung und die ausgezogene Linie die Situation nach deren Ende.

engt, zum Beispiel durch die Umspundung einer Flussbaustelle oder durch Brückenwiderlager, entsteht ein Kolk. Dies kann vereinfacht dadurch illustriert werden, dass sich der Fluss dort, wo er an Querschnittsfläche in der Breite verliert, sich welche schafft, in dem er sich in die Tiefe eingräbt. Wird ihm umgekehrt in einer lokalen Aufweitung ein Übermass an Fläche zur Verfügung gestellt, reduziert er diese wieder und füllt das Gerinne mit Sohlenmaterial auf. In beiden Fällen wird die Sohle soweit verändert, bis die Geschiebekontinuität wiederhergestellt ist.

3.4 Zeitliche Entwicklung der Sohlenveränderung

Wie schnell die Sohle eines Flusses auf die veränderte Gerinnebreite reagiert, hängt im wesentlichen von zwei Grös-

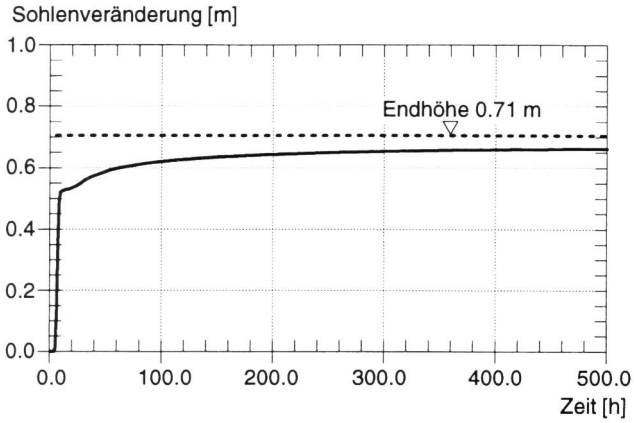

Bild 6. Entwicklung der Sohlendifferenz in der kurzen Aufweitung in Funktion der Zeit. Nach einem sprunghaften Anstieg der Sohle nähert sich der «Hügel» asymptotisch seiner Endhöhe.

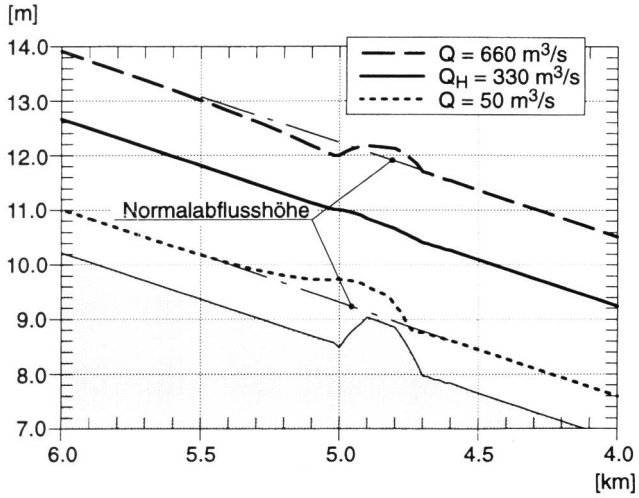

Bild 7. Wasserspiegel verschiedener Abflüsse in der kurzen Aufweitung. Der «Hügel» hat sich bei einem konstanten Abfluss von Q_H = 330 m³/s gebildet.

sen ab: vom Verhältnis der Grösse des Ablagerungskörpers zur Menge des pro Zeiteinheit zugeführten Geschiebes und vom Verhältnis der Transportkapazitäten im Kanal und in der Aufweitung.

Im Fall der kurzen Aufweitung ist das abzulagernde Volumen klein gegenüber dem transportierten Geschiebe, der «Hügel» bildet sich also rasch. Vor allem in einer ersten Phase nach dem Bau einer Aufweitung reagiert die Sohle dort sehr schnell und landet beinahe sprunghaft auf (Bild 6). Im simulierten Beispiel sind nach rund 100 h ungefähr 90 % der endgültigen Höhe des «Hügels» erreicht. Danach wird von dem zugeführten Geschiebe bereits der grösste Teil durch die Aufweitung hindurchtransportiert. Deshalb verlangsamt sich das Wachstum des «Hügels» und er nähert sich asymptotisch seiner theoretischen Endhöhe an. In der Natur kann man davon ausgehen, dass sich der «Hügel» bereits beim ersten grösseren geschiebeführenden Hochwasser bildet. Wie lange es aber dauert, bis er seine Endhöhe erreicht hat, hängt von der Abfolge von Hochwasserereignissen ab.

Im oberen Bereich der langen Aufweitung kann ebenfalls ein sprunghafter Anstieg der Sohlenlage beobachtet werden. Weil in diesem Fall bei gleicher Geschiebezufuhr ein viel grösserer Auflandungskörper abgelagert werden muss, wächst die Auflandung aber deutlich langsamer. Der langanhaltende Rückhalt von Geschiebe in der Aufweitung hat zur Folge, dass sich die zu Beginn stattfindenden Erosionen im Unterwasser der Aufweitung nur langsam wieder auffüllen. Bei der Projektierung von langen Aufweitungen in der Natur muss diesem Umstand unbedingt Rechnung getragen werden.[3]

3.5 *Wasserspiegellage und Höhe der Auflandung*

Aus der Sicht des Hochwasserschutzes interessiert nicht nur die Sohlenlage in einer Aufweitung, sondern vor allem deren Einfluss auf den Wasserspiegel.

Im beschriebenen Beispiel wurde die Sohlenveränderung mit einem konstanten Abfluss von Q_H = 330 m³/s simuliert. Nach erfolgter Auflandung liegt der Wasserspiegel in der Aufweitung bei diesem Abfluss gleich hoch, wie er an derselben Stelle ohne Aufweitung und ohne Sohlenhebung läge.

Ist der Abfluss geringer als Q_H, die Auflandung aber unverändert, wird dieser durch den «Geschiebehügel» zurückgestaut, und der Wasserspiegel im Oberwasser der Aufweitung liegt dann höher als ohne Aufweitung (Bild 7). Ein grösserer Abfluss als Q_H wird von der Verengung leicht eingestaut. In beiden Fällen ist zu erwarten, dass sich die Sohle bei länger andauerndem Abfluss wiederum den veränderten hydraulischen Bedingungen anpassen würde. Bei höherem Abfluss würde die Sohle stärker auflanden und bei geringerem Abfluss weniger. Die Höhe des «Hügels» in der Natur unterliegt also dem Wechsel des Abflusses im Gerinne.

3.6 *Lokale Aufweitungen und übergeordneter Geschiebehaushalt*

In Kapitel 3.3 wurde dargelegt, dass eine kurze Aufweitung keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf die Sohlenlage flussaufwärts ausübt. Das bedeutet also auch, dass eine kurze Aufweitung eine bestehende Erosionstendenz nicht aufhalten kann. Die Sohlenhebung in der Aufweitung ist ein lokales Phänomen und durch übergeordnete Sohlenbewegungen nicht wesentlich beeinflusst. Erodiert zum Beispiel der gesamte Streckenabschnitt um einen Fixpunkt, erodiert auch die Sohle in der Aufweitung, der «Hügel» bleibt in seiner Form aber bestehen (Bild 8). Sinngemäss verhält es sich bei einer übergeordneten Auflandung. Im Prinzip unterliegt auch die Auflandung in und oberhalb einer langen Aufweitung einer übergeordneten Sohlenbewegung. Im Einzelfall ist deshalb die Summe der Sohlenbewegungen massgebend.

Die Hügelbildung in der Aufweitung ist ein Phänomen, das durch die veränderte Gerinnegeometrie hervorgerufen wird. In der Regel wird der Wasserspiegel davon nicht oder nur gering beeinflusst (Kapitel 3.5), weshalb es meistens nicht nötig ist, die Auflandung aus Gründen des Hochwasserschutzes maschinell abzutragen. Wird dies trotzdem getan, wird sich der «Hügel» im Laufe eines nächsten geschiebeführenden Hochwassers erneut bilden.

3.7 *Sohlenformen*

Die vorgestellten Resultate sind Ergebnisse einer eindimensionalen Simulation und liefern Aussagen über die Entwicklung der *mittleren* Sohle. Wie eingangs erwähnt, bilden sich in lokalen Aufweitungen aber Sohlenformen wie Kiesbänke und Teilgerinne, welche durch diese Berechnungen nicht erfasst werden können. Diese Sohlenformen bieten einerseits eine erwünschte, vielfältige Fliessstruktur, wo Zonen unterschiedlicher Wassertiefen und Fliessgeschwindigkeiten verschiedene Lebensräume bieten, andererseits

[3] Mit dem gewählten Modell (Einheitskorn, konstanter Abfluss) wird der Prozess der Deckschichtbildung bewusst nicht nachgebildet. Vermutlich fallen die berechneten Erosionen deshalb zu gross aus.

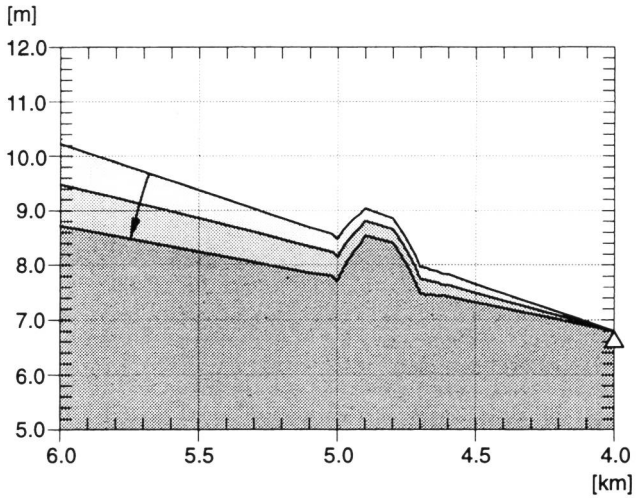

Bild 8. Erosion um einen Fixpunkt. Im Fall einer übergeordneten Erosion folgt die lokale Auflandung der allgemeinen Sohlenbewegung.

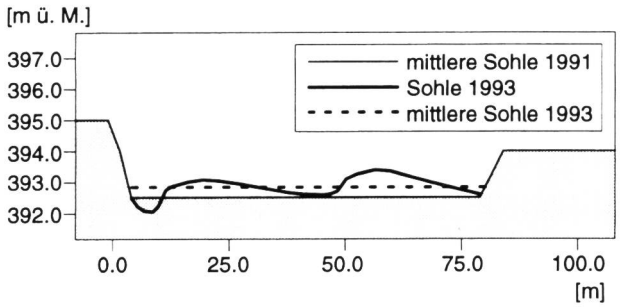

Bild 9. Sohlenformen in einem Querprofil der Aufweitung Pfyn/Felben an der Thur.

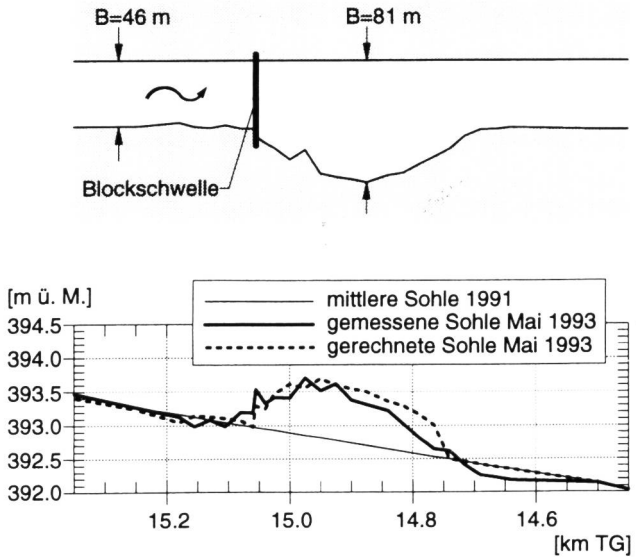

Bild 10. Situation und Längenprofil der Aufweitung Pfyn/Felben an der Thur. Die Blockrampe (in der Situation eingezeichnet) wurde eingekiest.

stellt die Dynamik des Systems aber erhöhte Ansprüche an die Ufersicherung.

Auch wenn die mittlere Sohle in einer Aufweitung auflandet, kann der Talweg tiefer liegen als die ursprüngliche Sohle (Bild 9), so dass die Uferbauwerke in der Regel tiefer fundiert werden müssen als bei einem eindimensionalen Abfluss. Die Sohlenformen können, besonders bei kleinen und mittleren Hochwasserereignissen, zu Querströmungen führen, welche die Ufer zusätzlich und stärker beanspruchen, als dies in einem gestreckten, prismatischen Kanal der Fall wäre. Zudem können wegen der Dynamik der Sohle in einem verzweigten Gerinne die Hauptangriffspunkte der Strömung mit der Zeit variieren, einmal das linke und ein anderes Mal das rechte Ufer belasten, unabhängig davon, ob der Fluss nur einseitig oder beidseitig aufgeweitet worden ist.

4. Überprüfung des numerischen Modells

Die dargestellten Resultate beruhen auf Simulationen, in welchen die Hydraulik und der Geschiebetransport vereinfacht modelliert wurden. Wie gut Sohlenveränderungen infolge einer Aufweitung auch mit diesen vereinfachten Ansätzen bestimmt werden können, zeigt deren Nachrechnung in der lokalen Aufweitung der Thur bei Pfyn/Felben (Baujahr 1991) mit dem numerischen Modell MORMO. In den ersten beiden Jahren nach der Verbreiterung von 46 m auf maximal 81 m landete die Sohle zu einem «Hügel» von rund 1 m Höhe auf. Bild 10 zeigt den Vergleich zwischen dieser beobachteten und der berechneten Sohlenveränderung.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ausführungen zu den in diesem Beitrag aufgeführten einfachen Fallbeispielen sind möglichst allgemeingültig gehalten und beruhen auf Simulationen mit vereinfachten Berechnungsansätzen. In Wirklichkeit handelt es sich jedoch um Prozesse mit komplexen dreidimensionalen Strömungen und zeitlich veränderlicher Morphologie.

Einige für die Praxis relevante Fragen können damit noch nicht ohne weiteres beantwortet werden. So zum Beispiel die Fragen, wie Sicherungsbauwerke optimal gestaltet werden sollten und welche Kolktiefen zu erwarten sind. Weiter interessiert, ob die Höhe *s* des «Hügels» analytisch bestimmt werden kann. Die Forschung an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie wird in diese Richtung fortgesetzt.

Jede Gerinneaufweitung ist, wie jeder Fluss, ein Einzelfall und muss als dieser speziell untersucht werden. Wenn auch allgemeingültige Regeln für die Dimensionierung noch fehlen, stehen mit der numerischen Simulation und mit hydraulischen Modellversuchen schon heute zuverlässige Hilfsmittel zur Verfügung, um Fragen in diesem Zusammenhang beantworten zu können.

Hunziker, R. (1995): Fraktionsweiser Geschiebetransport. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zürich, in Vorbereitung.

Leopold, L. B., and *Wolman, M. G.* (1957): River Channel Patterns: Braided, Meandering and Straight. Geological Survey Professional Paper 282-B, Washington.

Meyer-Peter, E., und *Müller, R.* (1948): Formulas for Bedload Transport. Proc. 2nd Congr. IAHSR, Stockholm.

Smart, G. M., und *Jäggi, M. N. R.* (1983): Sedimenttransport in steilen Gerinnen, Sediment Transport on Steep Slopes. Mitteilung Nr. 64 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zürich.

Zarn, B. (1992): Lokale Gerinneaufweitung. Eine Massnahme zur Sohlenstabilisierung der Emme bei Utzenstorf. Mitteilung Nr. 118 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zürich.

Zarn, B. (1993): Sohlenstabilisierung der Emme bei Utzenstorf mit einer lokalen Gerinneaufweitung. «wasser, energie, luft» *85* (1993) S. 67–71.

Adressen der Verfasser:
Lukas Hunzinger, dipl. Kultur.-Ing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zentrum, CH-8092 Zürich. *Ronald Hunziker,* Dr.-Ing. ETH, Ingenieurbüro für Flussbau und Gewässertechnik, Schachenallee 29, CH-5000 Aarau. *Benno Zarn,* dipl. Ing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zentrum, CH-8092 Zürich.