Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 114 (1996)
Heft: 41

Artikel: Reduzierte Hochwassersicherheit durch Geschiebe
Autor: Bezzola, Gian Reto / Schilling, Michael / Oplatka, Matthias
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79058

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: 02.07.2025

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

Gian Reto Bezzola, Michael Schilling, Matthias Oplatka, Zürich

Reduzierte Hochwassersicherheit durch Geschiebe

Die Hochwasser der vergangenen zehn Jahre im Urnerland, im Puschlav, im Oberwallis und in Davos zeigten, dass die Reduktion des Abflussquerschnitts durch Geschiebeablagerungen häufig das auslösende Moment für Überschwemmungen war. Gerade in Strecken mit starker Abnahme des Längsgefälles kann es bei stark geschiebeführenden Hochwassern immer wieder zu unerwünschten Auflandungen, gefolgt von Bachausbrüchen mit Schäden für Siedlungsgebiete und Kulturland, kommen. Der folgende Artikel soll erklären, weshalb es zu diesen Auflandungen kommt und Methoden aufzeigen, wie deren Ausmass abgeschätzt werden kann.

Eine Ursache für verschiedene Überschwemmungen der letzten Jahre lag darin, dass sich in Strecken mit abnehmendem Längsgefälle und damit abnehmender Geschiebetransportkapazität unerwünschte Auflandungen bildeten, welche den Abflussquerschnitt stark verringerten. So verfüllte zum Beispiel in Brig-Glis am 24. September 1993 das von der Saltina antransportierte Geschiebe den Abflussquerschnitt unter der Saltinabrücke vollständig. Die Saltina trat bei der Brücke über ihre Ufer und das Wasser sowie das mitgeführte Geschiebe ergossen sich infolge der topographischen Verhältnisse in das Siedlungsgebiet [1]. Ebenso hatten 1993 und 1994 die Schäden bei Gabi auf der Südseite des Simplons ihre Ursache in Sohlenveränderungen, welche auf eine Abnahme der Geschiebetransportkapazitäten im Chrummbach zurückzuführen sind (Bild 1).

Neben Auflandungen kann es aber selbst bei einem Hochwasser mit intensiver Geschiebeführung auch zu Erosionen kommen, welche zur Unterspülung und Zerstörung von Ufermauern und Querwerken führen (Bild 2).

Besonders deutlich treten diese Probleme auf den alluvialen Schwemmkegeln im Alpenraum auf. Nach dem Rückzug der Gletscher wurden grosse Mengen an Lockermaterial mobilisiert und durch die Bäche und Flüsse talwärts transportiert. Dabei bildeten sich beim Eintritt ins Haupttal infolge der abrupt abnehmenden Transportkapazität die Schwemmkegel. Diese stellen grundsätzlich auch heute noch ausgeprägte Ablagerungsgebiete für das Geschiebe dar. Das Längsgefälle kann dabei sukzessive vom Talausgang bis zur Mündung in den Vorfluter abnehmen oder, für Schwemmkegel recht typisch, in mehr oder minder ausgeprägten Gefällsknicken rasch ändern.

Viele Siedlungen auf Schwemmkegeln haben ihren alten Dorfkern am oberen Rand des Kegels. Früh erkannten die Bewohner, dass hier die Gefährdung durch geschiebeführende Hochwasser wesentlich geringer ist als auf den tieferliegenden, häufiger übersarten Kegelpartien oder gar in der praktisch alljährlich überschwemmten und oftmals versumpften Talebene. Mit zunehmendem Siedlungsdruck wurden auch die tieferliegenden Partien des Kegels für die Landwirtschaft nutzbar gemacht und immer dichter besiedelt. Dadurch wurden einerseits die natürlichen Ablagerungsflächen für das Geschiebe verkleinert, andererseits nahm das Schadenpotential immer mehr zu. Um das anfallende Geschiebe ohne Ablagerungen bis in den Talfluss zu verfrachten, musste das Gerinne auf dem Kegel so umgebaut werden, dass es ein erhöhtes Geschiebetransportvermögen aufwies. Dies versuchte man durch eine Einengung und Kanalisierung des Gerinnes zu erreichen. Häufig wurde auch durch den Bau von Sperren oder Geschieberückhaltebecken oberhalb des Kegels die Geschiebezufuhr in den Unterlauf reduziert. Wie bei der Saltina in Brig-Glis führten solche Massnahmen teilweise zu einer Umkehr des allgemeinen Trends und die vormals typischen Ablagerungsstrecken auf dem Schwemmkegel mussten gegen die einsetzende Erosion geschützt werden.

Im folgenden sollen die massgebenden Prozesse aufgezeigt werden, die bei Gefällsknicken im allgemeinen und auf Schwemmkegeln im besonderen zu Gefahrensituationen führen können. Es werden auch Methoden vorgestellt, die es dem Ingenieur erlauben sollen, eine erste Beurteilung des Geschiebeaufkommens und des Gefährdungspotentials durchzuführen. Es sei allerdings vorweggenommen, dass es «die einfache Lösung» in den seltensten Fällen gibt.

1
Chrummbach bei Gabi (Gemeinde Simplon, VS) am 25.9.94. Die Ablagerungen im Gefällsknick beim Hotel verursachten Sohlenhebungen von mehreren Metern (Photo J. Escher, Simplon-Dorf)

Massgebende Prozesse und Gefahren

Charakteristisch für ein kanalisiertes Gerinne ist dessen beschränkte Geschiebespeicherfähigkeit. Bereits die Ablagerung eines relativ kleinen Geschiebevolumens führt zu markanten Sohlenhebungen, wodurch wiederum auch der Wasserspiegel angehoben wird.

Erfolgen die Ablagerungen kontinuierlich und über einen längeren Zeitraum

verteilt, kann durch periodische Räumung das ursprüngliche Durchflussprofil wieder hergestellt werden. Dieser Fall bedingt zwar einen gewissen Unterhalt, ist jedoch hinsichtlich des Hochwasserschutzes meist relativ problemlos.

Im Gegensatz dazu steht der Fall, bei dem sich die Ablagerungen während eines einzigen Ereignisses bilden und noch während des Hochwassers ein unzulässig grosses Ausmass annehmen können.

Das Geschehen im Bereich von Gefällswechseln wird vom momentanen Verhältnis zwischen der Geschiebezufuhr aus dem Oberlauf und dem Geschiebetransportvermögen im Abschnitt unterhalb des Gefällsknicks bestimmt. Werden die momentane Zufuhr von oben mit Q_{BO} und das Transportvermögen in der unteren Strecke mit Q_{BU} bezeichnet, so lassen sich grundsätzlich drei Zustände unterscheiden:

$Q_{BO} < Q_{BU}$

Das zugeführte Geschiebe passiert den Gerinneabschnitt ablagerungsfrei. Falls die Gerinnesohle nicht stabil ist, wird zusätzliches Geschiebe durch Erosion (grossräumig oder lokal in der Form von Kolkungen) aufgenommen.

$Q_{BO} = Q_{BU}$

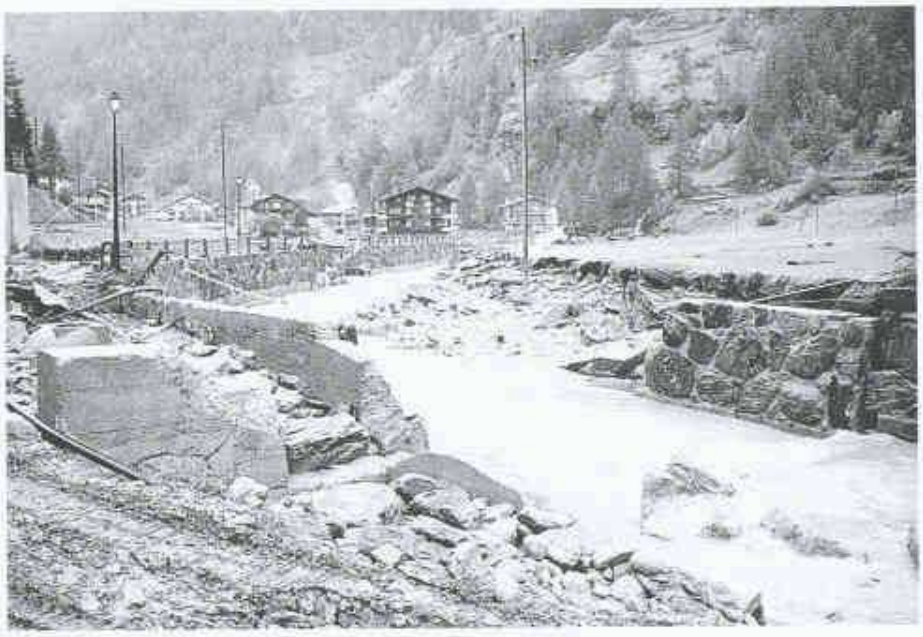
Das zugeführte Geschiebe passiert den Gerinneabschnitt ablagerungsfrei.

$Q_{BO} > Q_{BU}$

Geschiebe wird im Bereich des Gefällswechsels abgelagert.

Durch Erosion wird primär die Gerinnestabilität reduziert. Unterspülte Längsverbauungen und Querwerke sind in ihrer Standsicherheit gefährdet. Mögliche Folgen bei ihrem Versagen sind seitliche Erosionen mit entsprechenden Konsequenzen für Verkehrsträger und Gebäude in Gerinnenähe. Führt zum Beispiel das Gerinne in überhöhter Lage über einen Kegel, kann es durch seitliche Erosion auch zu einem Ausbruch mit anschliessenden grossräumigen Überflutungen und Feststoffablagerungen kommen.

Ablagerungen führen zu einer Anhebung der Sohle und des Wasserspiegels. In diesem Fall besteht die Gefahr von Wasseraustritten, der Abfluss im Gerinne nimmt ab. Dadurch wird das Transportvermögen zusätzlich reduziert und die Ablagerungsintensität nimmt weiter zu. Durch den Aufstau an Hindernissen wie tiefliegenden Brücken oder Durchlässen kann die austretende Wassermenge rasch vergrössert werden, so dass die Intensität des Ablagerungsprozesses unter Umständen schlagartig zunimmt. Im Extremfall kann der Abflussquerschnitt durch Geschiebeablagerungen vollständig verfüllt werden. Die Folge ist ein Ausbruch, bei dem - wie im Fall des Hochwassers von 1993 in Brig-Glis - sämtliches Wasser und alle mitgeführten Feststoffe das Gerinne verlassen können.



2
Unterspülte und zerstörte Ufermauern an der Saaser Vispa bei Saas Balen. Schäden des Hochwassers von 1993

Die bisherigen Ausführungen zeigen deutlich, dass die durch Geschiebeumlagerungen verursachten Sohlenbewegungen bei der Abschätzung der Gerinnestabilität und der Gerinnekapazität berücksichtigt werden müssen. Grundlegend für die Beurteilung der Hochwassersicherheit ist also die Kenntnis der Momentanwerte des Abflusses, der Geschiebezufuhr aus dem Oberlauf und der Geschiebetransportkapazität unterhalb eines Gefällswechsels über die gesamte Dauer eines Ereignisses.

Abfluss

Als massgebend für eine Beurteilung oder Bemessung wird in der Regel ein grosser und daher seltener Abfluss betrachtet, dessen Eintretenswahrscheinlichkeit kleiner als ein bestimmter Schwellwert ist. Häufig wird anstelle der Eintretenswahrscheinlichkeit auch die Wiederkehrperiode oder Jährlichkeit angegeben. Hinsichtlich der Festlegung des Schwellwerts sei auf [2] verwiesen.

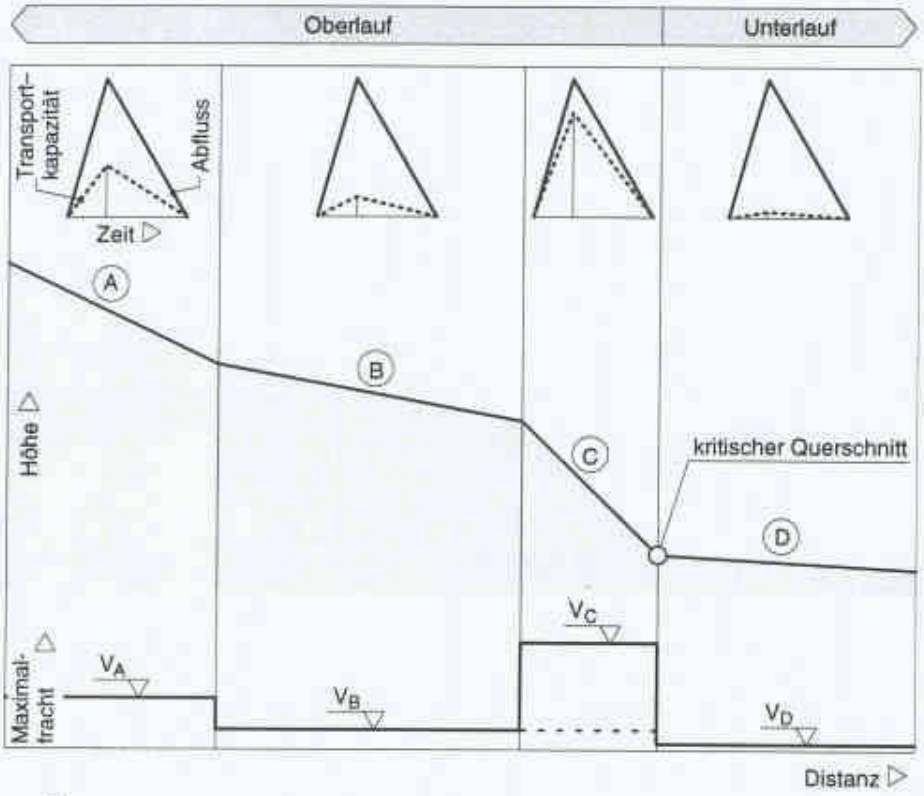
Sind für das betrachtete Gewässer Abflussmessungen über eine ausreichend lange Periode vorhanden, so können anhand einer statistischen Analyse dieser Daten der massgebende Abfluss und allenfalls die dazugehörende Hochwasserganglinie ermittelt werden. Häufig liegen Direktmessungen nur über einen sehr kurzen Zeitraum vor, sind im Bereich extremer Hochwasser ungenau oder sie fehlen ganz. In diesem Fall wird eine eingehendere hydrologische Abklärung notwendig.

Ohne auf die hydrologische Fragestellung weiter eingehen zu wollen, sei an dieser Stelle aber noch vermerkt, dass die Hochwasserganglinie, welche einen Spitzenabfluss der Jährlichkeit x aufweist, nicht a priori auch den massgebenden Lastfall darstellen muss. Die Geschiebeführung kann wesentlich vom Abflussvolumen abhängen. Da ein x-jährlicher Spitzenabfluss und ein x-jährliches Abflussvolumen aber nicht unbedingt gleichzeitig auftreten, müssen also - in Analogie zur Bemessung von Hochwasserrückhaltebecken [3] - grundsätzlich Abflüsse mit unterschiedlichem Verhältnis von Volumen zu Spitzenabfluss betrachtet werden.

Geschiebeaufkommen im Oberlauf

Maximale Transportkapazität

Die Geschiebezufuhr aus einem Einzugsgebiet kann grundsätzlich mittels einer Geschiebetransportrechnung zumindest nach oben hin grob abgegrenzt werden. Abschnittsweise kann die Geschiebetransportkapazität in Funktion des Abflusses - die sogenannte Geschiebefunktion - bestimmt werden. Die Ge-



3
Schematisches Längenprofil mit den stark vereinfacht dargestellten Ganglinien von Abfluss und maximaler Geschiebeführung. Zusätzlich ist für jeden Abschnitt die maximal mögliche Geschiebefracht angegeben

schiebetransportkapazität entspricht dem theoretisch maximal möglichen Geschiebedurchgang pro Zeiteinheit ohne Veränderung der Profilgeometrie und des Gefälles. Für die Bestimmung der Transportkapazität bei grossen Gefällen wird zum Beispiel die Verwendung der Geschiebetransportformel nach [4] empfohlen.

Durch die Kombination der als bekannt vorausgesetzten Ganglinie des Abflusses mit der Geschiebefunktion kann die Ganglinie der maximal möglichen Geschiebeführung ermittelt werden. Deren Integration über die Dauer des Ereignisses ergibt schliesslich die maximal mögliche Geschiebefracht (im folgenden mit Maximalfracht bezeichnet), welche einen Abschnitt passieren kann.

Schlüsselstrecken

Nimmt man für den in (Bild 3) dargestellten Fluss an, dass nur im Abschnitt A Geschiebe mobilisiert werden kann und dass die Geschiebeführung zu jedem Zeitpunkt des Ereignisses dem theoretischen Maximum entspricht, so ergibt sich eine maximale Fracht V_A, welche in den Abschnitt B eingetragen wird. Da die Maximalfracht V_B, welche diesen Abschnitt B noch ablagerungsfrei passieren könnte, deutlich kleiner ist als der Eintrag V_A, wird ein Teil des Geschiebes ($V_A - V_B$) im Abschnitt B abgelagert. Ist der nachfolgende steile Abschnitt C stabil (z.B. eine Felsstrecke), so kann hier kein zusätzliches Geschiebe mehr aufgenommen werden. In diesem Beispiel wird also die Geschiebezufuhr für den zu beurteilenden Querschnitt in erster Linie durch das lokale Transportvermögen im Abschnitt B bestimmt. Abschnitt B kann daher als Schlüsselstrecke bezeichnet werden.

Eine Schlüsselstrecke wirkt aufgrund ihrer Morphologie (Gefälle, Flussbreite, Länge) als Speicher- oder Umlagerungsstrecke und damit dämpfend auf die Geschiebeführung. Ist die Geschiebezufuhr grösser als das Transportvermögen in der Schlüsselstrecke, so lagert sich Geschiebe ab. Grundsätzlich konzentrieren sich diese Ablagerungen zunächst auf das obere Ende der Schlüsselstrecke, mit zunehmender Dauer des Ablagerungsvorgangs wachsen sie in der Höhe und dehnen sich flussabwärts aus. Sind die Breite und vor allem die Länge der Schlüsselstrecke gross, so ergibt sich selbst bei einer bedeutenden Ablagerungskubatur im unteren Teil der Schlüsselstrecke keine oder nur eine relativ geringe Gefällserhöhung. Dadurch wird hier das lokale Transportvermögen kaum verändert, und der Geschiebeaustrag aus der Schlüsselstrecke wird allein durch das lokale Transportvermögen an deren unterem Ende bestimmt.

Im Fall fehlender Geschiebezufuhr in die Schlüsselstrecke können sich hinsichtlich des Geschiebeaustrags durchaus ähnliche Verhältnisse ergeben. Ist in der Schlüsselstrecke eine Sohlenerosion möglich, so wird hier entsprechend dem Transportvermögen Geschiebe aufgenommen. Es können dabei grössere Kubaturen erodiert werden, ohne dass sich die Gefällsverhältnisse im unteren Teil der Schlüsselstrecke wesentlich ändern. Wieder ist der Geschiebeaustrag aus der Schlüsselstrecke in erster Linie durch das lokale Transportvermögen am unteren Ende der Schlüsselstrecke bestimmt.

Fehlt eine Schlüsselstrecke oder ist mit grossen Geschiebeeinträgen unterhalb derselben zu rechnen, wird die Abschätzung der tatsächlichen Geschiebeführung erschwert. Häufig resultieren aus den Transportrechnungen im steilen Einzugsgebiet sehr hohe Maximalfrachten, welche kaum in Einklang mit der vergleichsweise kleinen Transportkapazität im Unterlauf zu bringen sind.

Allerdings ist in solchen Fällen das Gerinne im Oberlauf zumindest abschnittsweise relativ stabil (mit groben Blöcken angereicherte Sohle, Felsaufschlüsse oder Verbauungen). In dieser Situation wird die Geschiebeführung nicht durch das maximale Transportvermögen, sondern vielmehr durch die Menge des mobilisierbaren Geschiebes - das Geschiebepotential - bestimmt. Die Frage lautet daher nicht nur: «Wieviel kann transportiert werden?», sondern vor allem auch: «Wieviel ist überhaupt da und kann in Bewegung versetzt werden?»

Geschiebepotential

Im Gerinne vorhandene Geschiebeablagerungen, Schäden anlässlich früherer Ereignisse am selben und an vergleichbaren Gewässern, Spuren im Gelände und natürlich die Geologie des Einzugsgebiets stellen wichtige Informationen dar, welche bei der Abschätzung des Geschiebepotentials hilfreich sein können.

Zur Bestimmung des Geschiebepotentials muss nicht nur die Kubatur der mobilisierbaren Feststoffe abgeschätzt werden. Wichtig ist auch, dass zwischen dem darin enthaltenen Grobanteil, der als Geschiebe transportiert und zur Ablagerung gelangen kann, sowie den Feinanteilen, die das Gewässersystem als Schwebstoffe ablagerungsfrei passieren können, unterschieden wird.

Die Abschätzung des Geschiebepotentials ist in der Regel nicht einfach und wird bis zu einem gewissen Grad subjektiv bleiben. Das Resultat kann deshalb nicht ein einzelner Wert sein, sondern ein möglicher Bereich.

Mobilisierungsprozesse

Aus der Geschiebefunktion lässt sich der Abfluss Q_0 bestimmen, ab welchem bei entsprechender Zufuhr Geschiebe im betrachteten Abschnitt weitertransportiert wird. Fehlt eine Zufuhr oder ist sie deutlich kleiner als die Transportkapazität, so kann im Abschnitt selbst Geschiebe aufgenommen werden. Wichtig ist der Umstand, dass während Extremereignissen vor allem die Geschiebemobilisierung in unmittelbarer Gerinnenähe massgebend ist [5]. Geschiebe kann mobilisiert werden durch:

- Ausräumung des Flussbetts: In einem Flussbett finden sich häufig Ablagerungen von relativ mobilem, d.h. im Vergleich zur Flussohle eher feinerem Geschiebe. Sie bilden sich hauptsächlich beim Abklingen eines vorangehenden Hochwassers und werden in der Regel bei Abflüssen, welche nicht bedeutend grösser als Q_0 sind, rasch wieder mobilisiert.
- Tiefenerosion: Bei steileren Gewässern mit entsprechend grobem Sohlenmaterial kann der für das Einsetzen der generellen Erosion des Sohlenmaterials erforderliche Grenzabfluss Q_t bedeutend grösser sein als Q_0. Für eine nicht zu breite Streuung der Korngrössen des Sohlenmaterials kann Q_t mittels einer Stabilitätsrechnung für die vorhandene Deckschicht (z.B. nach [6]) abgeschätzt werden. Durch allenfalls vorhandene Gröbstkomponenten (Residualblöcke), welche auch zu Strukturen (Stufen oder natürliche Blockrampen) gruppiert sein können und Felsaufschlüsse wird die Tiefenerosion zudem häufig gehemmt. In diesem Fall ist die genauere Quantifizierung des Grenzabflusses Q_t schwierig. Eine Grössenordnung für die mobilisierbare Geschiebemenge kann allenfalls über eine Abschätzung der Kubatur zwischen der aktuellen Sohlenlage und der Sohlenlage, welche sich für den Spitzenabfluss während des Ereignisses zwischen den Fixpunkten einstellt, ermittelt werden.
- Seitenerosion: Je nach Beschaffenheit und Stabilität der Böschungen kann durch die Seitenerosion bedeutend mehr Geschiebe mobilisiert werden als durch die Tiefenerosion, besonders wenn der Fuss grösserer Hangpartien destabilisiert wird und diese ins Gerinne abrutschen. Grundsätzlich braucht es auch zur Auslösung der Seitenerosion einen bestimmten Grenzabfluss, welcher in unverbauten Gerinnen in einer ähnlichen Grössenordnung wie der Grenzabfluss Q_t anzusetzen ist.
- Einträge aus Seitenzubringern: Der Geschiebeeintrag aus Seitenbächen kann in der Form von Geschiebetransport oder allenfalls von Murgängen erfolgen. Findet die Zufuhr während eines Hochwasserereignisses im Hauptfluss statt und übertrifft sie dessen momentanes Transportvermögen, so wird ein Teil des Materials im Mündungsbereich abgelagert. Fallen die Einträge aus Seitenzubringern nicht mit einem Hochwasser im Hauptfluss zusammen, so lagert sich das zugeführte Geschiebe praktisch vollständig im Mündungsbereich ab. Während des nächsten Hochwassers im Hauptfluss stellen diese Ablagerungen eine relativ leicht mobilisierbare Geschiebequelle dar.
- Versagen von Bauwerken: Wird im Einzugsgebiet Geschiebe hinter Wildbachsperren oder ähnlichen Bauwerken zurückgehalten, so kann beim Bruch eines solchen Bauwerks schlagartig die angehäufte Geschiebemenge mobilisiert werden.

Diese auf die wichtigsten Mobilisierungsprozesse beschränkten Ausführungen zeigen, dass neben der Transportkapazität auch der Grenzabfluss für das Einsetzen eines Mobilisierungsprozesses eine wichtige Rolle spielt. Er bestimmt, ob während eines Hochwassers in einem Abschnitt Geschiebe mobilisiert werden kann, und ab welchem Zeitpunkt ein bestimmter Mobilisierungsprozess einsetzt.

Wird der Abfluss Q_0 überschritten, so kann der Geschiebetransport einsetzen. In diesem Fall stammt das Geschiebe vorwiegend aus den Ablagerungen im Flussbett. Wird auch der Grenzabfluss Q_g überschritten, so kann die Geschiebeführung infolge der Mobilisierung grösserer Geschiebequellen sprunghaft zunehmen. In steilen Gebirgsflüssen wird dieser Grenzabfluss jedoch nicht häufig überschritten. Dies ist einer der Hauptgründe für die relative Seltenheit von Hochwassern mit katastrophalen Folgen.

Bei einem genügend grossen Geschiebepotential kann, wie oben erläutert, höchstens die über die Transportkapazität abgeschätzte Maximalfracht mobilisiert werden. Ist das Geschiebepotential deutlich kleiner als die aus der Transportrechnung für den Oberlauf resultierende Maximalfracht, so besteht die Schwierigkeit darin, eine plausible zeitliche Verteilung der Geschiebeführung zu bestimmen. Auf dieses Problem wird später eingegangen.

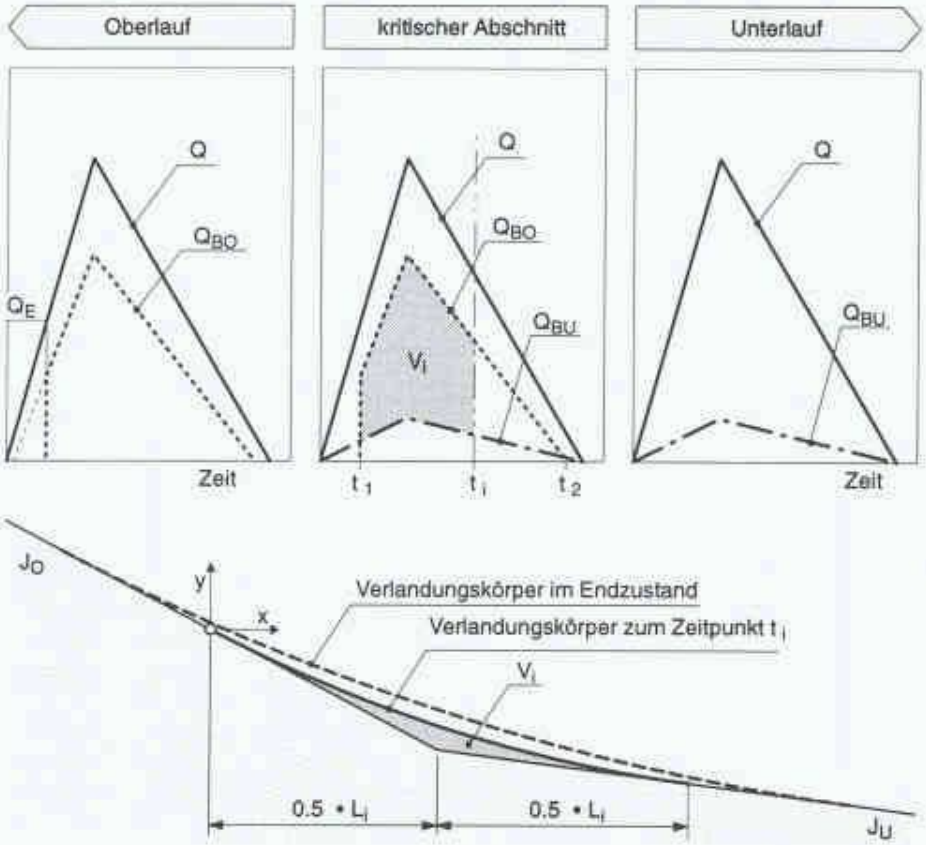
Transportvermögen im Unterlauf

Der Gefällswechsel zwischen Ober- und Unterlauf stellt hinsichtlich der Transportkapazität eine Diskontinuität dar. Kommt es hier zu Ablagerungen, so dehnen sich diese sowohl flussauf- als auch flussabwärts aus. Dadurch vergrössert sich zwar unmittelbar flussabwärts des Gefällsknicks das Längsgefälle, mit zunehmender Distanz nimmt aber die Mächtigkeit der Ablagerungen so weit ab, dass praktisch das ursprüngliche Gefälle erhalten bleibt. Analog den Verhältnissen in einer Schlüsselstrecke bestimmt dieser Ort die abgeführte Geschiebemenge. Folgt auf den Gefällsknick eine längere Strecke mit annähernd gleichbleibendem Gefälle und Gerinnequerschnitt, so kann die Ganglinie für den Geschiebeaustrag wiederum aus der Kombination der Hochwasserganglinie mit der Geschiebefunktion für diese Strecke ermittelt werden.

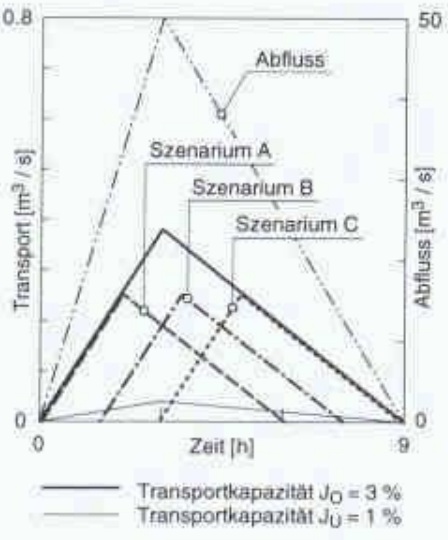
Ist die Sohle im Unterlauf glatt abgepflästert, muss die Geschiebefunktion entsprechend für Verhältnisse mit fester und glatter Sohle bestimmt werden. Dies kann mit Hilfe der Formel von Pedroli [7] oder des Ansatzes von Smart und Jäggi [4] erfolgen. Als grobe Faustregel gilt, dass das Transportvermögen auf einer festen und glatten Sohle etwa doppelt so gross ist wie auf einer alluvialen Sohle. Soll der Vorteil eines im Vergleich zur alluvialen Sohle höheren Transportvermögens erhalten bleiben, so dürfen sich auf der Pflästerung keine Ablagerungen bilden. Eine Gefahr diesbezüglich besteht zum Beispiel dann, wenn sich Ablagerungen aus dem Bereich der Mündung in den Talfluss flussaufwärts auszudehnen beginnen und die feste Sohle bedecken [8]. Ist die Sohle nur abschnittsweise, zum Beispiel im Bereich einer Brücke abgepflästert, so können – je nach Gerinnegeometrie – die Energieverluste infolge des Rauhigkeitswechsels zwischen glatter und alluvialer Sohle ebenfalls zu Ablagerungen führen, die sich rasch flussaufwärts ausdehnen und die Pflästerung mit Geschiebe bedecken.

Maximale Sohlen- und Wasserspiegellagen

Sind die Ganglinien des Abflusses Q, der Geschiebezufuhr Q_{BO} und des Austrags Q_{BU} bekannt, so kann für eine genauere Analyse die zeitliche Veränderung der Sohlen- und Wasserspiegellagen in der Regel nur mit Hilfe einer numerischen Simulation ermittelt werden. Für geometrisch einfachere Verhältnisse ist eine Abschätzung auch mit einer vereinfachten Berechnung möglich. Eine solche Betrachtung ist dann zulässig, wenn die Geschiebezufuhr zu jedem Zeitpunkt des Ereignisses der Transportkapazität der Zulaufstrecke entspricht. Dieser Fall wird im folgenden anhand eines Beispiels vor-



4
Bestimmung der Geometrie des Verlandungskörpers für den Fall mit einer Geschiebezufuhr entsprechend der Transportkapazität der Zulaufstrecke



5
Ganglinien des Abflusses und der Geschiebeführung für die numerische Simulation

gestellt. Ist die Geschiebezufuhr kleiner als die Transportkapazität der Zulaufstrecke, kann die Berechnung nur noch mit einem numerischen Modell erfolgen, was anhand eines weiteren Beispiels gezeigt wird.

Fall 1: Geschiebezufuhr zum Gefällsknick erfolgt entsprechend der Transportkapazität der Zulaufstrecke

Die Überlagerung der Ganglinien der Geschiebezufuhr und des Geschiebeaustrags in Bild 4 zeigt, dass während einer ersten Phase des Ereignisses bis zur Zeit $t = t_i$ unterhalb des Gefällswechsels ein Geschiebedefizit entsteht, da bei noch nicht vorhandener Zufuhr im Unterlauf bereits Geschiebe transportiert werden könnte. Somit kann es in dieser Phase im Unterlauf zu Erosionen kommen, falls nicht der Widerstand der Gerinnesohle eine Geschiebeaufnahme verhindert.

In der zweiten Phase ergibt sich ein Geschiebeüberschuss, da ab der Zeit t_i die Zufuhr grösser ist als der Austrag. Das während des Ereignisses insgesamt abgelagerte Geschiebevolumen V entspricht dabei dem Integral

$$V = \int_{t_i}^{t_2} [Q_{BO}(t) - Q_{BU}(t)]dt \qquad (1)$$

Da hinsichtlich der maximalen Wasserspiegellagen nicht unbedingt der Endzustand massgebend sein wird, müssen verschiedene Zustände zu unterschiedlichen Zeitpunkten t_i betrachtet werden. Unter der Annahme, dass das Längsgefälle über die Länge der Ablagerung linear von J_O auf J_U abnimmt, also

$$\frac{\partial J}{\partial x} = \text{konstant} \qquad (2)$$

sei, lässt sich die Form des Verlandungskörpers zum Zeitpunkt t_i leicht beschreiben. Für das Gefälle auf der Ablagerung sowie für die parabelförmige Sohlenlage ergeben sich die Beziehungen

$$J(x) = \frac{J_u - J_o}{L_i} \cdot x + J_o \qquad (3)$$

und

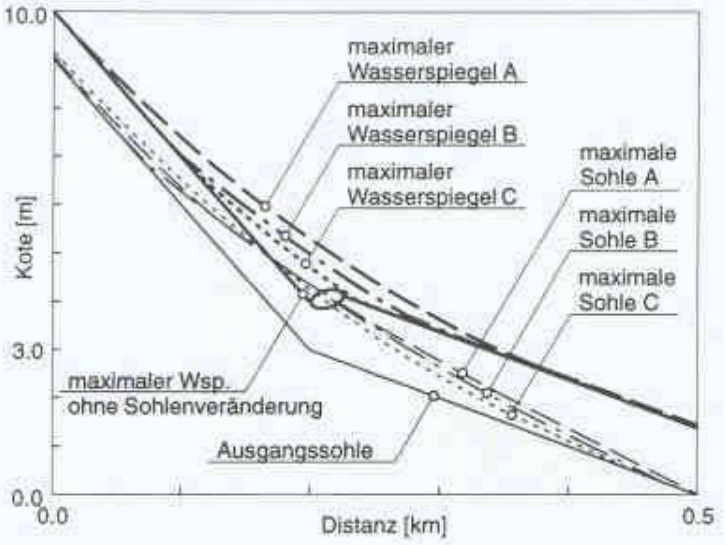
$$y(x) = -\frac{J_u - J_o}{L_i} \cdot \frac{x^2}{2} - J_o \cdot x \qquad (4)$$

Darin bedeutet L_i die (noch unbekannte) Länge der Ablagerungsstrecke zum Zeitpunkt t_i. Zu beachten gilt, dass das Koordinatensystem jeweils seinen Ursprung am oberen Ende des momentanen Verlandungskörpers hat.

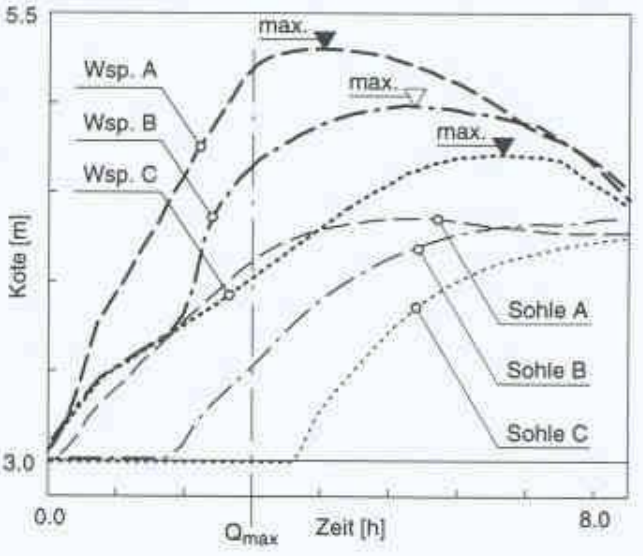
Zunächst wird das bis zur Zeit t_i abgelagerte Geschiebevolumen V_i aus den Ganglinien der Geschiebezufuhr und des Geschiebeaustrags bestimmt. Anschliessend wird die Länge L_i der Ablagerungsstrecke zum Zeitpunkt t_i so lange variiert, bis das Volumen zwischen dem mit Hilfe der Gleichung (4) bestimmten Längenprofil der Ablagerung und dem ursprünglichen Längenprofil dem gesuchten Volumen V_i entspricht. Danach kann mittels einer Normalabflussrechnung die Abflusstiefe und damit die Wasserspiegellage an einem beliebigen Ort auf dem Verlandungskörper abgeschätzt werden.

Fall 2: Geschiebezufuhr kleiner als die Transportkapazität der Zulaufstrecke

Falls ein im Vergleich zur massgebenden Maximalfracht kleineres Geschiebepotential vorhanden ist oder eine Schlüsselstrecke den Geschiebeeintrag oberhalb des Gefällsknicks dämpft, wird das Ausmass der Auflandungen grundsätzlich kleiner. Die Schwierigkeit besteht aber darin, für eine quantitative Abschätzung der massgebenden Sohlen- und Wasserspiegellagen im kritischen Bereich den zeitlichen Verlauf der Geschiebezufuhr zu ermitteln. In diesem Fall müssen bezüglich der Ganglinie der Zufuhr Q_{BO} verschiedene Szenarien definiert und die Empfindlichkeit der Verhältnisse im kritischen Querschnitt auf die entsprechende Variation geprüft werden. Die Berechnung der Sohlen- und Wasserspiegellagen kann nicht mehr mit einfachen Mitteln durchgeführt werden. Es empfiehlt sich deshalb die Verwendung eines numerischen Simulationsprogramms.



6
Maximale Sohlen- und Wasserspiegellagen für die simulierten Szenarien. Zusätzlich eingetragen ist die Wasserspiegellage für einen Abfluss von 50 m³/s ohne Sohlenveränderungen



7
Sohlen- und Wasserspiegellagen in Funktion der Zeit für den Querschnitt direkt beim Gefällsknick

Anhand eines Beispiels sollen die Möglichkeiten einer solchen Simulation aufgezeigt werden. Die Berechnungen erfolgten mit dem Programm Mormo [9]. Als Ausgangslage wurde ein Gerinne mit einer Breite von 10 m und senkrechten Ufermauern gewählt, dessen Längsgefälle in der Zulaufstrecke 3% beträgt. Nach dem Gefällsknick schliesst eine Flachstrecke mit gleicher Querprofilgeometrie und einem Längsgefälle von 1% an. Für den Abfluss wurde eine dreiecksförmige Ganglinie mit einem Spitzenabfluss von 50 m³/s nach 3 Stunden und einer Gesamtdauer von 9 Stunden gewählt (Bild 5).

Als Ergänzung sind in Bild 5 auch die Momentanwerte für die Transportkapazität in der Zulauf- bzw. in der Flachstrecke eingetragen. Bei einer Zufuhr entsprechend der Transportkapazität (einheitliches Kornmaterial mit 7,5 cm Durchmesser) ergäbe sich eine zugeführte Fracht von 6200 m³. Davon könnten 650 m³ über die Flachstrecke abtransportiert werden, so dass die maximale Ablagerungskubatur 5550 m³ betragen würde.

Ergibt nun aber die Abschätzung des Geschiebepotentials zum Beispiel eine Kubatur von maximal 2700 m³, so muss eine Annahme über die zeitliche Verteilung dieses Eintrags getroffen werden. In Bild 5 sind hierfür drei Möglichkeiten (Szenarien A, B und C) gezeigt. Grundsätzlich sind viele Kombinationen möglich, wobei aber die durch die Transportkapazität der Zulaufstrecke gegebenen Maximalwerte für die Geschiebezufuhr nie übertroffen werden können.

Es ist erkennbar, dass im Fall von Szenarium A die Ablagerungen zeitlich früher als in den Fällen der Szenarien B und C erfolgen müssen. Dies bedeutet, dass zum Zeitpunkt des Erreichens des Spitzenabflusses der Verlandungskörper für das Szenarium A bereits grösser ist und dementsprechend für dieses Szenarium auch höhere maximale Wasserspiegellagen resultieren (Bild 6). Die maximalen Wasserspiegel liegen für dieses Beispiel also umso höher, je früher die Zufuhr einsetzt. Eine genauere Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der Wasserspiegel im Gefällsknick (Bild 7) zeigt aber auch, dass die maximalen Wasserstände nicht zeitgleich mit dem maximalen Abfluss auftreten müssen. Die Wasserspiegel können auch nach dem Erreichen des Spitzenabflusses noch weiter ansteigen. Bei Szenarium A ergibt sich die maximale Wasserspiegellage im Gefällsknick 1 Stunde nach dem Durchgang des Spitzenabflusses, bei Szenarium B 2 Stunden und bei Szenarium C etwa 4 Stunden nach der Hochwasserspitze, also bei einem Abfluss von nur mehr rund 20 m³/s. Es zeigt sich daraus, dass Fällen mit frühzeitigem Geschiebeeintrag besondere Beachtung zu schenken ist.

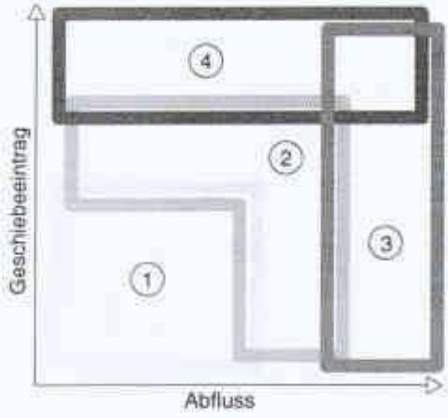
Massnahmen

Das Bundesamt für Wasserwirtschaft [2] unterscheidet zwischen Massnahmen zum Unterhalt der Gewässer, raumplanerischen Massnahmen sowie baulichen Schutzmassnahmen.

Zu den Unterhaltsmassnahmen gehören das regelmässige Leeren von Geschieberückhaltebecken und -räumen, das Entfernen von störendem Bewuchs, Reparaturen von durch Erosion oder Geschiebetransport beschädigten Verbauungen und die Beobachtung und Interpretation von Veränderungen im Einzugsgebiet in Bezug auf das Geschiebepotential.

Zu den raumplanerischen Massnahmen gehören das Ausscheiden von Gefahrenzonen sowie Nutzungsbeschrän-

8
Hauptanwendungsbereich verschiedener baulicher Massnahmen



(1) innerhalb aktueller Belastungsgrenzen
(2) Vergrösserung Profil, Entschärfen oder Entfernen von Hindernissen
(3) Hochwasserrückhalt, Ableitung
(4) Geschieberückhalt, Ableitung

kungen und -auflagen. Durch das Meiden von Gefahrengebieten und durch Auflagen soll eine weitere Zunahme des Schadenpotentials begrenzt oder verhindert werden.

Bezüglich der baulichen Schutzmassnahmen sollen an dieser Stelle nur einige der wichtigsten Möglichkeiten aufgezeigt werden.

Zu den Massnahmen im Einzugsgebiet gehören der Geschieberückhalt, respektive die Dämpfung der Geschiebeführung auf ein Mass, welches der Geschiebetransportkapazität im Unterlauf entspricht. Dazu können Geschieberückhalteräume und -becken, Dosiersperren oder künstliche Schlüsselstrecken errichtet werden. Im Extremfall kann das Hochwasser mitsamt dem mitgeführten Geschiebe durch einen Entlastungsstollen um den kritischen Abschnitt herum geleitet werden.

Im Unterlauf kann der Gerinnequerschnitt vergrössert werden, indem die Ufer erhöht und eventuell das Gerinne verbreitert werden. Dadurch wird die Speicherfähigkeit des Gerinnes soweit erhöht, dass auch die Ablagerung einer grösseren Geschiebekubatur noch nicht zu Wasseraustritten führt.

Hindernisse wie tiefliegende Brücken können so ausgebildet werden, dass sie im Hochwasserfall entweder entfernt, angehoben oder überströmt werden können. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Brücke mit einer Verschalung zu versehen [10].

Besonders zu erwähnen ist, dass der lokale Schutz gefährdeter Einzelobjekte oftmals mit einem gegenüber einer durchgehenden Verbauung bedeutend geringerem Aufwand realisiert werden kann.

In Bild 8 ist schematisch der Haupteinsatzbereich verschiedener baulicher Massnahmen in bezug auf die Kombination von Geschiebeeintrag und Abfluss gezeigt.

Im weiteren sind Warnsysteme und eine gute Aufklärung der Bevölkerung zu nennen, denn das Bewusstsein, in einem natürlichen Überflutungsgebiet zu leben und das Wissen, dass trotz aller Massnahmen immer ein gewisses Restrisiko verbleibt, wird oft verdrängt.

Zusammenfassung

Die Ausführungen in diesem Artikel verdeutlichen, dass kritische Flussabschnitte so gestaltet sein müssen, dass sie nicht nur rein hydraulisch genügen. Die Erfahrung zeigt, dass bei grossen Hochwasserereignissen immer mit Geschiebeführung gerechnet werden muss. Da das Geschiebetransportvermögen stark vom Längsgefälle abhängig ist, führen auf kurze Distanzen konzentrierte Gefällswechsel zu Diskontinuitäten in der Geschiebeführung. Die resultierenden Veränderungen der Sohlenlage durch Erosionen und Auflandungen können zu einer wesentlichen Beeinträchtigung der Hochwassersicherheit führen und müssen berücksichtigt werden. Im vorliegenden Artikel wird ein mögliches Vorgehen aufgezeigt. Da die Verhältnisse von Fall zu Fall sehr unterschiedlich sein können, gibt es allerdings kein «Patentrezept».

Die Beurteilung des Einzugsgebiets und des Flusslaufs hinsichtlich des möglichen Geschiebeaufkommens während eines Hochwassers ist von zentraler Bedeutung. Dabei muss zwischen dem vorhandenen Geschiebepotential und der während eines Ereignisses maximal in den Unterlauf transportierbaren Fracht unterschieden werden.

In eindeutigen Fällen bezüglich der zeitlichen Verteilung von Abfluss und Geschiebeführung können die maximalen Sohlen- und Wasserspiegellagen im kritischen Abschnitt relativ einfach abgeschätzt werden. Die hierfür vorgestellte Methode soll aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass die komplexen Verhältnisse mit raschem zeitlichem und räumlichem Wechsel zwischen Erosion und Auflandung nur schwer überschaubar sind. Dieses Wechselspiel kann mit numerischen Modellen anschaulich nachvollzogen werden.

Adresse der Autoren:
Gian Reto Bezzola, dipl. Bauing. ETH, *Michael Schilling*, dipl. Kulturing. ETH, *Matthias Oplatka*, dipl. Kulturing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich

Literatur

[1] *Bezzola, G.R., Abegg, J., Jäggi, M.:* Saltinabrücke Brig-Glis, Rekonstruktion des Hochwassers vom 24. September 1993 in Brig-Glis. Schweizer Ingenieur und Architekt, 1994, Nr. 11, 165-169

[2] BWW: Anforderungen an den Hochwasserschutz '95. Bundesamt für Wasserwirtschaft, Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bern 1995

[3] *Naef, F.:* Hydrologische Bemessungsgrundlagen. In Vischer, D. und Hager, W.H. (1992): Hochwasserrückhaltebecken. vdf Verlag der Fachvereine, Zürich, 1992, 57-70

[4] *Smart, G.M., Jäggi, M.N.R.:* Sedimenttransport in steilen Gerinnen. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, 1983, Nr. 64

[5] *Bezzola, G.R., Hunziker, R., Jäggi, M.:* Flussmorphologie und Geschiebehaushalt im Reusstal während des Ereignisses vom 24./25. August 1987. Ursachenanalyse der Hochwasser 1987. Mitteilung des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 4, Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 14, EDMZ, Bern, 1991, 101-105

[6] *Günter, A.:* Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, 1971, Nr. 3

[7] *Pedroli, R.:* Geschiebetransport in Kanälen auf fester und glatter Sohle. Mitteilung des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft, No 43, 1963

[8] *Hunzinger, L., Zarn, B.:* Geschiebetransport und Ablagerungsprozesse in Wildbachschalen. Interpraevent Garmisch-Partenkirchen (1996), in Vorbereitung

[9] *Hunziker, R.:* Fraktionsweiser Geschiebetransport. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, 1995, Nr. 138

[10] *Jäggi, M., Abegg, J.:* Cimavilla-Brücke Poschiavo - eine unkonventionelle Lösung aufgrund der Erfahrungen aus dem Unwetter vom Juli 1987. Schweizer Ingenieur und Architekt, 1993, Nr. 16-17, 295-298