



# Vergleich einer numerischen und hydraulischen Modellierung am Beispiel der Geschiebedotierstrecke Aare Innertkirchen

*(A comparison of numerical and hydraulic Model Studies of Sediment retaining Structures in the River Aare, Canton of Berne)*

**Martin Bettler, Beatrice Herzog, Manfred Lanz, Jürg Speerli**

## **Kurzfassung**

Im Hochwasserschutzprojekt Aare Innertkirchen wurde für das Geschiebemanagement eine offene 'Dotierstrecke' geplant, welche im Ereignisfall die transportierte Geschiebefracht auf die Transportkapazität des Gerinnes im Siedlungsgebiet limitiert.

Die Funktionalität des Bauwerkes wurde mittels hydraulischen Modellversuchen in einem Modell mit beweglicher Sohle im Massstab 1:30 überprüft und bestätigt. Parallel dazu wurden durch die Projektingenieure zweidimensionale numerische Berechnungen mit der Software 'Basement' mit Geschiebemodul durchgeführt.

Der Vergleich beider Modelle zeigt, dass die Entwicklungen im numerischen Bereich der Geschiebmodellierung viel versprechend sind und die grundlegenden Prozesse und Grössenordnungen realistisch abgebildet werden. Insbesondere ergeben sich interessante Anwendungen in der Vorprojekt- wie auch in der Betriebsphase. Erst eine grossen Anzahl von systematischen Vergleichen und die entsprechende Kalibrierung und damit laufende Verbesserung der Software kann aber das nötige Vertrauen in die numerische Modellierung herstellen, wie es heute z.B. bei Staukurvenprogrammen selbstverständlich ist.

## **Abstract**

The river 'Aare' has a limited hydraulic capacity in the area of the village Innertkirchen, which is caused by the decrease of the cross-sectional area due to sediment deposition. The consulting engineers proposed to retain a proportion of the bed load, adapted to the natural transport capacity of the downstream reach length in the village. Therefore the river channel was adjusted to a smaller slope over a total length of approximately 450 m and two lateral deposition terraces were built.

The confirmation of functionality and optimising of structures was done by a hydraulic model at the HSR Hochschule für Technik Rapperswil. Simultaneously, a numerical model was operated by the Engineers. The article compares the results of both models.

The comparison shows, that the numerical approach is most promising for the future and offers interesting ways to supplement hydraulic studies or the operating phase of structures. However, this requires a great number of further case studies, where the results of numerical and hydraulic modelling are systematically evaluated. A wide experience with numerical studies, compared and evaluated with hydraulic models or natural phenomenon – and the according calibration of the software - are compulsory to provide the confidence in numerical modelling of bed load, e.g. as it is customary nowadays with one-dimensional numerical modelling.

## **1 Problemstellung und Ziele**

Die Aare aus dem Grimselgebiet erreicht die Talebene von Innertkirchen im Gebiet 'Underübach'. Das Sohlgefälle nimmt von rund 5 % auf ca. 1.2 % ab.

Seit der Aktivierung grosser murfähiger Seitengräben im Grimselgebiet kommt es im Siedlungsgebiet von Innertkirchen immer wieder zu Auflandungen. Dadurch wird die Abflusskapazität während Hochwasserereignissen stark verringert und es besteht ein erhebliches Hochwasserschutzdefizit.

Um solche Auflandungen zu verhindern und den Geschiebedurchgang trotzdem zu ermöglichen (Ökologie, Unterhaltskosten, Geschiebemanagement im Aaredelta), wurde ein offenes Rückhaltesystem entworfen, welches mindestens soviel Geschiebe zurückhalten soll, dass die Transportkapazität innerorts nicht überschritten wird.

Dazu wurde auf einer rund 450 m langen Strecke oberhalb des Dorfes das Sohlgefälle reduziert und die so erzeugten Höhendifferenzen mittels dreier Blockrampen gesichert. Die Steuerung des Ansprungpunktes erfolgt über das Sohlgefälle und die Uferhöhe des Mittelgerinnes. Lateral wurden Ablagerungsräume ausgehoben.

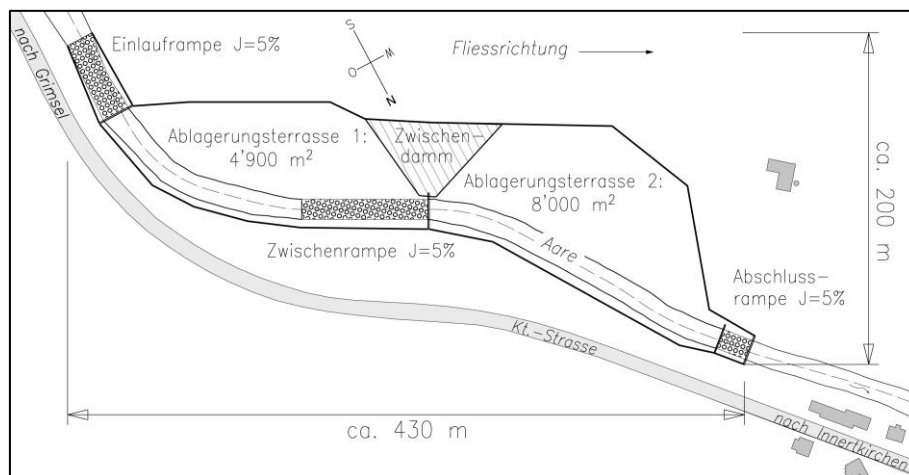


Abb. 1: Geschiebedotierstrecke Innertkirchen, Situation, ohne Masstab, Fließrichtung von links nach rechts.

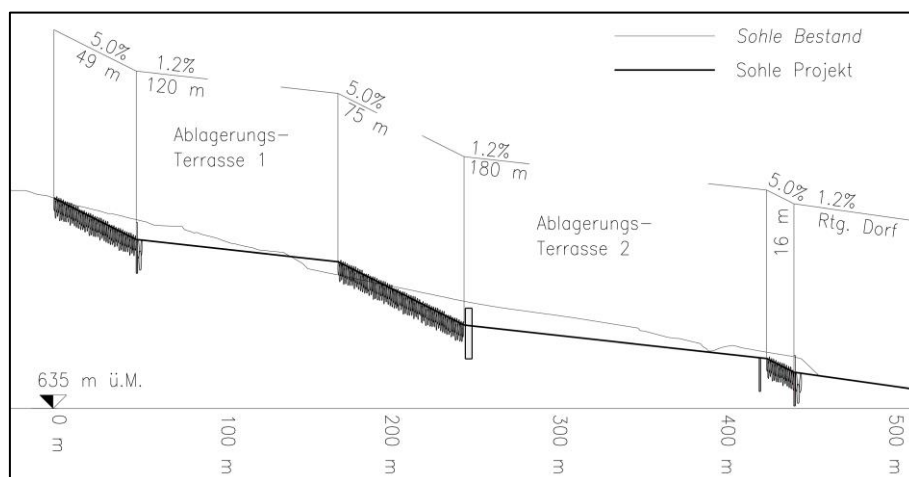


Abb. 2: Geschiebedotierstrecke Innertkirchen, Längenprofil, ohne Masstab. Abflachung der Gerinnesohle auf das Zielgefälle (= Gefälle innerorts) mittels dreier Blockrampen.

Die so geschaffene Geschiebedotierstrecke (nachfolgend 'GDS') wurde parallel zur Projektierung in einem hydraulischen Modellversuch auf ihre Funktionalität überprüft und optimiert.

## 2 Untersuchte Szenarien

Im Rahmen des hydraulischen Modellversuchs [2] wurden zahlreiche Szenarien untersucht, auf die hier aus Platzgründen nicht umfassend eingegangen werden kann. Für den vorliegenden Beitrag werden folgende Ganmlinien näher betrachtet:

- Ereignis mit Spitzenabfluss  $HQ_{100}$ , Geschiebeinput  $30'000 \text{ m}^3$  (V\_111)
- Ereignis mit Spitzenabfluss  $HQ_{100}$ , Geschiebeinput  $60'000 \text{ m}^3$  (V\_112)
- Ereignis mit Spitzenabfluss  $HQ_{300}$ , Geschiebeinput  $100'000 \text{ m}^3$  (V\_113)

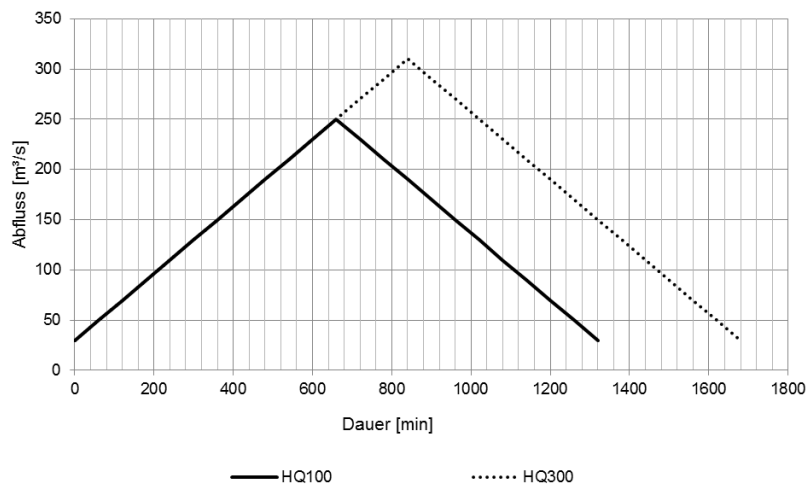


Abb. 3: Gewählte Abflussganglinien für verschiedene Jährlichkeiten, aus [2].

Die Geschieberaten wurden ab Transportbeginn als proportional zum Abfluss angenommen. Die maximale Geschieberate ist demnach durch das totale Geschiebevolumen definiert.

### 3 Hydraulisches Modell (HM)

Das hydraulische Modell (nachfolgend 'HM' genannt) wurde im Massstab 1:30 in Froud'scher Ähnlichkeit mit beweglicher Sohle erstellt. Messparameter waren Abfluss, Fliesstiefen, Ablagerungshöhen sowie der Geschiebeein- und -austrag (kontinuierlich).

Das Modell erlaubte es, die Geometrie so zu optimieren, dass das Ablagerungsverhalten verbessert und die Belastung der Bauwerke verringert wurde. Es zeigte sich, dass keine Geometrie eine konstante Transportrate im Geschiebeaustrag für alle Zuflüsse erlaubte. Entweder wird generell eher 'zuviel' Geschiebe zurück gehalten oder – bei Ausrichtung auf den praktisch freien Geschiebedurchgang bei kleinen Ereignissen – im Bemessungsfall 'zuwenig'. Jede Geometrie ist diesbezüglich ein Kompromiss.

### 4 Numerisches Modell (NM)

Das numerische Modell (nachfolgend 'NM') wurde auf der Software BASEMENT aufgebaut [3]. Das Berechnungsgitter wurde basierend auf dem vorhandenen digitalen Projektterrain der GDS erstellt. Dasselbe Terrain wurde auch für die finale Version des hydraulischen Modellversuchs verwendet, die Vergleichbarkeit ist somit gegeben. Die Wahl der Parameter wurde bewusst unter der Prämisse durchgeführt, dass keine Möglichkeit für Kalibrierungsläufe resp. Vergleiche mit einem hydraulischen Modellversuch vorhanden sei. Wo keine gesicherten Erkenntnisse über die einzelnen Parameter zur Verfügung

standen, wurde mit Standardwerten aus der Literatur, resp. den im Handbuch zu BASEMENT vorgeschlagenen Standardwerten gearbeitet.

Für die vorliegenden Modellierungen wurde das Geschiebemodul (BEDLOAD) verwendet, hingegen wurde kein Transport in Suspension berechnet (SUSPENDED\_LOAD). Die Geschiebemischung entspricht derjenigen des HM. Für die Berechnung des Geschiebetransports wurde der Ansatz von Meyer-Peter und Müller für multiple Kornfraktionen gewählt. Sämtliche Kalibrierungsfaktoren wurden auf ihren Standardwerten belassen.

## 5 Vergleich

Beispielhaft wird im vorliegenden Kapitel auf den Versuch V\_413 (HQ<sub>300</sub>, 100'000 m<sup>3</sup> Geschiebe) eingegangen.

### 5.1 Prozesse

- In beiden Modellen läuft der Auflandungsprozess ähnlich ab. Zuerst landet das Gerinne zwischen den Blockrampen gleichmässig auf, bis der Abfluss über das linke Ufer tritt. Auf den Ablagerungsterrassen findet gleichzeitig eine Vorwärtsauflandung (nach dem Austritt) wie auch eine Rückwärtsauflandung (durch den Rückstau am unteren Ende) statt.
- Es bildet sich in beiden Modellen ein Auflandungskörper mit ähnlicher Form.
- In beiden Modellen ist in der Ablagerungsterrasse 2 eine Seebildung feststellbar, dies weil das Wasser beim Rücklauf am unteren Ende der GDS durch einen Kontrollquerschnitt aufgestaut wird.
- Im HM findet während einer längeren Zeit kein nennenswerter Austrag von Geschiebe aus der GDS statt, während im NM der Geschiebeaustrag über die ganze Versuchsdauer annähernd konstant ist.
- In beiden Modellen ist keine nennenswerte Remobilisation von grösseren Geschiebemengen im absteigenden Ast des Hochwasserereignisses feststellbar.

### 5.2 Ereignisablauf

Im Folgenden wird der Ereignisablauf in den beiden Modellen qualitativ verglichen.

- Im HM wird tendenziell zuerst die Ablagerungsterrasse 1 verfüllt, während im NM beide Ablagerungsterrassen praktisch gleichzeitig auflanden.

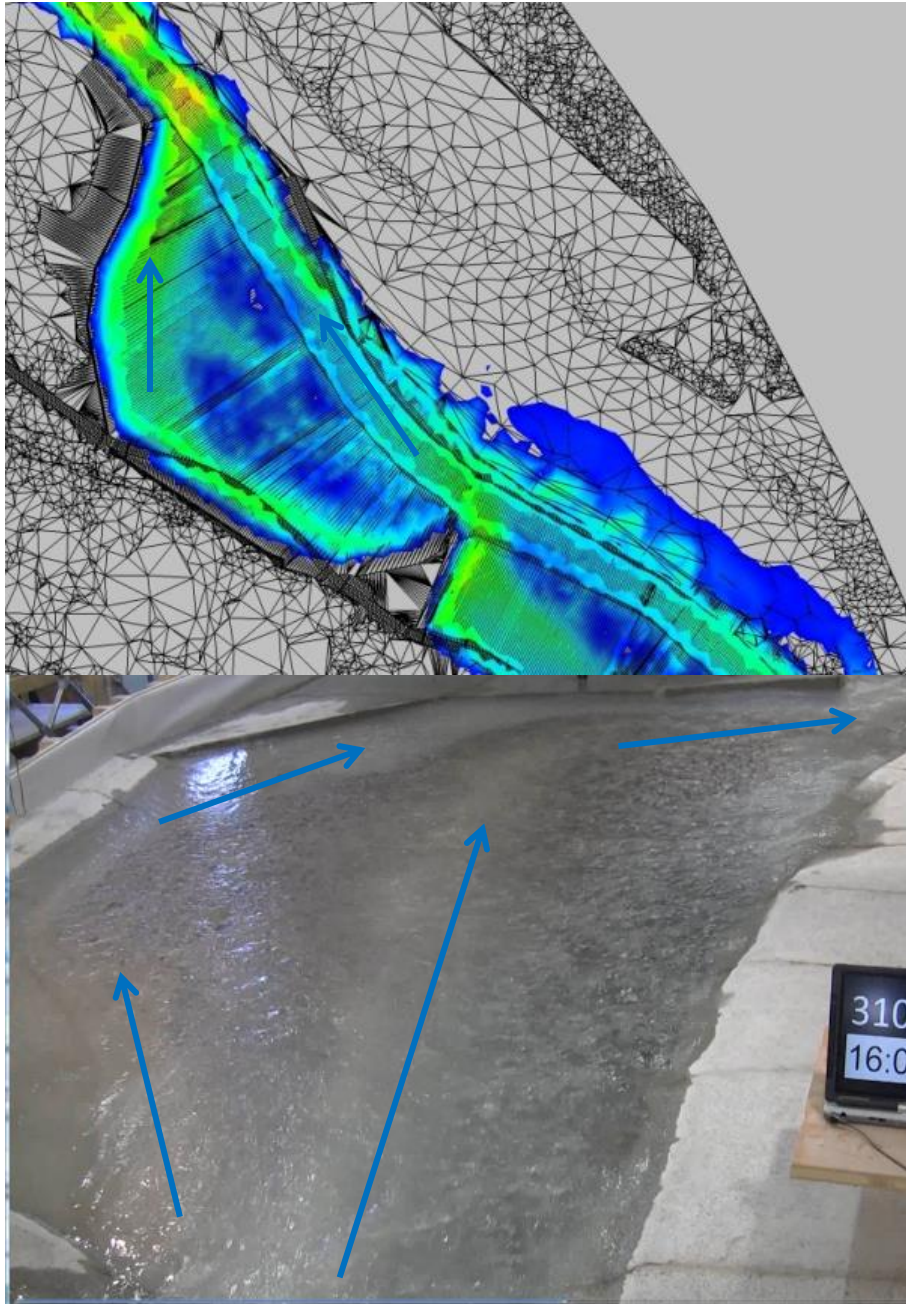


Abb. 4: Hauptströmungen Versuch V\_413 bei Abflussspitze. Die blauen Pfeile symbolisieren die Hauptfließwege auf der Ablagerungsterrasse 2.

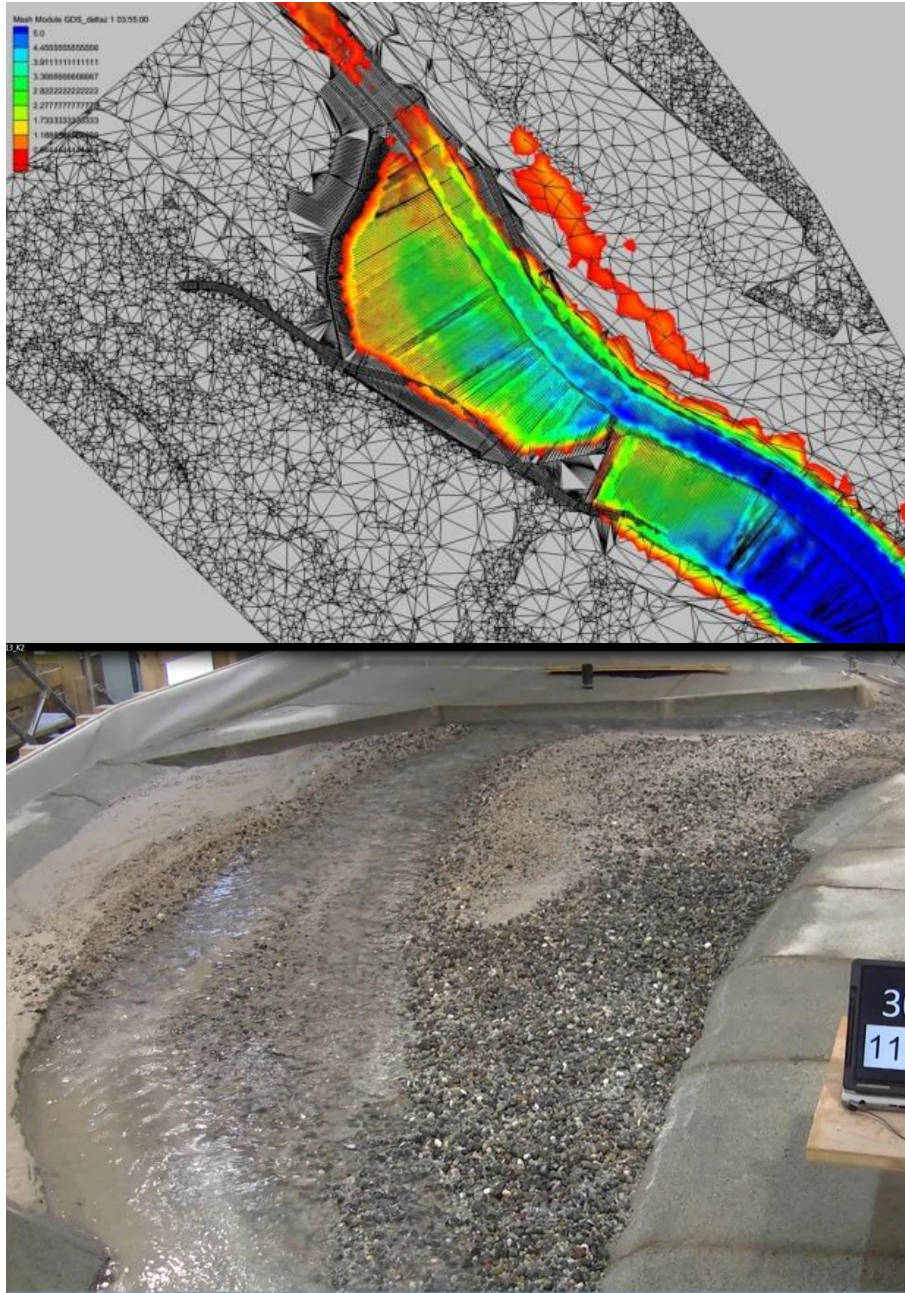


Abb. 5: Auflandungskörper Versuch V\_413 nach Versuchsende. Im NM ist die Veränderung der Sohlenlage im Vergleich zum Ausgangs-DTM dargestellt (tiefblau entspricht einer Auflandung von bis zu 5 m, rot einer Auflandung von 0.1 m).

- Der Abfluss wird in beiden Modellen bedingt durch die Auflandungen aus dem Transportgerinne gezwungen und anschliessend zweigeteilt. Im HM folgt der Hauptabfluss tendenziell der Richtung der Zwischenrampe und trifft damit stärker auf die Abschlussmauer als im NM, wo der Hauptabfluss auch in der verlandeten Terrasse ungefähr im Bereich des Transportgerinnes verbleibt. In beiden Modellen bildet sich ein Nebenabfluss, welcher praktisch der linken Begrenzung der Ablagerungsterrasse 2 folgt und sich anschliessend im Bereich der Abschlussmauer wieder mit dem Hauptabfluss vereint.

### 5.3 Phänomene

- Es bildet sich in beiden Modellen ein Auflandungskörper mit ähnlicher Form.
- Lokale Phänomene im HM und solche mit ausgeprägter 3-dimensionaler Strömung, insbesondere die Bildung von Kolken (z.B. am Rampenfuss) sind im NM nicht sichtbar.
- Das NM zeigt ein deutlich stärkeres Verlanden im Bereich des Einlaufes der GDS sowie in Teilen der Ablagerungsterrasse 1. Die Ablagerungshöhen betragen hier teilweise über 5 m. Im HM verteilen sich die Ablagerungen insgesamt gleichmässiger.
- Die Eintiefung des Abflusses in den Auflandungskörper im HM ist im NM nicht ersichtlich. Deutlich zu erkennen ist im NM ein starkes Auflanden im Bereich des Einlasses der GDS welches sich bis oberstrom in die Aare fortsetzt.

### 5.4 Geschiebebilanzen

Eine der wichtigsten Vergleichsgrössen für den projektierenden Ingenieur war im vorliegenden Fall der erzielte Geschieberückhalt, resp. der Geschiebeaustrag während des Ereignisses aus der GDS.

Tab. 1: Vergleich des Geschiebeaustrags im hydraulischen und numerischen Modell.

Versuch (Jährlichkeit Abflussganglinie)	Input Geschiebe [m <sup>3</sup> ]	Austrag Geschiebe HM [m <sup>3</sup> ] / [% des Inputs]	Austrag Geschiebe NM [m <sup>3</sup> ] / [% des Inputs]
V_411 (HQ <sub>100</sub> )	30'000	6'100 / 20%	20'000 / 67%
V_412 (HQ <sub>100</sub> )	60'000	7'500 / 13%	23'000 / 38%
V_413 (HQ <sub>300</sub> )	100'000	35'000 / 35%	27'000 / 27%



Es zeigte sich, dass bei kleineren Geschiebeinputs der Austrag im numerischen Modell deutlich grösser ist als im hydraulischen Modell. Die Modellierung eines extremen Ereignisses (Geschiebeinput 100'000 m<sup>3</sup>) führte hingegen in beiden Modellen zu einem ähnlich hohen Austrag.

## **6 Erkenntnisse und Folgerungen**

Der Vergleich der numerischen Geschiebemodellierung mit dem hydraulischen Modell zeigt, dass die Entwicklungen im numerischen Bereich viel versprechend sind und die grundlegenden Prozesse und Grössenordnungen realistisch abgebildet werden.

Er zeigt aber auch, dass die Projektierung eines derart komplexen Bauwerkes heute noch nicht rein numerisch erfolgen kann. So wären insbesondere das Auftreten und die Auswirkungen örtlich konzentrierter Flliesswege und die daraus folgenden Bauwerksbelastungen falsch eingeschätzt worden.

Der zuverlässige Einsatz von numerischen Geschiebemodellierungen bedingt in erster Linie eine grosse Anzahl systematischer Evaluationen von numerischen Berechnungen im Vergleich mit hydraulischen Modellversuchen, sowie die entsprechende Kalibrierung und Weiterentwicklung der Software und der Kenntnisse über die zielführende Parametrisierung. Wenn dies in den nächsten Jahren erfolgt, die Modelle damit genauer und zuverlässiger werden und die Ingenieure so das entsprechende Vertrauen in die Numerik fassen können, sehen wir die Chance für wertvolle Anwendungen in folgenden Bereichen:

### **1. Vorprojektphase**

Für einfachere Fälle dürfte künftig die Funktionalität von Projektgeometrien in der Vorprojektphase mit numerischen Modellen nachweisbar sein, ähnlich wie dies heute für rein hydraulische Fragestellungen ohne Feststofftransport der Fall ist.

### **2. Begleitung und Ergänzung der hydraulischen Modellierung**

Sobald ein numerisches Modell mittels einer genügenden Anzahl hydraulischer Modellversuche kalibriert ist, kann es für die kostengünstige und zeiteffiziente Untersuchung zusätzlicher Geometrien oder Szenarien herangezogen werden, ohne dass für jede Variante ein aufwändiger Modellversuch neu aufgebaut werden muss. Damit lässt sich der Aufwand des Labors in der Optimierungsphase reduzieren.

### **3. Unterstützung in der Betriebsphase**

Bereits heute kann empfohlen werden, ein am hydraulischen Modell kalibriertes numerisches Modell in der Betriebsphase der Bauwerke weiter

zu betreiben. Anhand von Naturbeobachtungen kann das Modell laufend weiter verfeinert werden und wird so immer naturnähere Ergebnisse ermöglichen. Daraus ergeben sich wertvolle Antworten auf betriebliche Fragen, im vorliegenden Fall z.B. ab welcher Sohlenlage und wie oft das Gerinne oder die Ablagerungsflächen geräumt werden müssen.

Diese Anwendung erfordert eine Abflussmessstelle am Gewässer, so dass zu den beobachteten Ablagerungs- und Erosionsmengen jeweils auch die zugehörigen hydrologischen Ereignisse bekannt sind und die Prozesse nachgerechnet werden können.

In keinem Fall können numerische Modelle bis heute die Fragen der Stabilität von Böschungen oder Einbauten verlässlich wiedergeben (Uferverbauungen, Kolkenschutz, Stabilität der Blockrampen, etc.).

### **Adressen der Autoren**

Martin Bettler, Dipl. Natw. ETH (korrespondierender Autor)

Beatrice Herzog, Dipl. Ing. ETH

Herzog Ingenieure AG

CH-7270 Davos Platz, Promenade 75

Email: [buero@herzog-ingenieure.ch](mailto:buero@herzog-ingenieure.ch)

Prof. Jürg Speerli

Manfred Lanz, Dipl. Ing. FH

HSR Hochschule für Technik Rapperswil, Institut für Bau und Umwelt

CH-8640 Rapperswil, Oberseestrasse 10

Email: [juerg.speerli@hsr.ch](mailto:juerg.speerli@hsr.ch)

### **Literatur**

- [1] Herzog Ingenieure AG, HWS Innertkirchen, Bauprojekt, Gümligen 2010 und Ausführungsprojekt, Gümligen, 2012
- [2] HSR Hochschule für Technik Rapperswil, Modelluntersuchung Dotierstrecke Underübach, Schlussbericht, Rapperswil, August 2012
- [3] ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Software 'BASEMENT', Version 2.2.1 und System Manuals, Stand August 2011