

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 102 (2010)
Heft: 2

Artikel: Flussbauliches Monitoring am Flaz : hydraulische 2D-Modellierung und ökologische Bewertung
Autor: Vonwiller, Lukas / Weitbrecht, Volker / Von Pfuhlstein, Marietta
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941650>

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: 04.04.2026

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

Flussbauliches Monitoring am Flaz – Hydraulische 2D-Modellierung und ökologische Bewertung

■ Lukas Vonwiller, Volker Weitbrecht, Marietta von Pfuhlstein, Robert Boes

Zusammenfassung

Um den Hochwasserschutz für das Dorf Samedan zu gewährleisten, wurde das Fließgewässer Flaz auf einer Strecke von 4 km neu verlegt. Das neu gebaute Flazgerinne wird im Rahmen des flussbaulichen Monitorings Flaz der VAW mit einem numerischen 2D-Modell abgebildet. Kurz nach der Fertigstellung des neuen Flaz fand im Juli 2004 ein Hochwasserereignis statt, welches die gewünschten morphologischen Veränderungen hervorgerufen hat. Mit einem numerischen Modell werden zum einen die Hochwassersicherheit nachgewiesen und zum anderen die ökologischen Veränderungen durch das Hochwasser beurteilt. Diese werden anhand von zwei hydraulisch-ökologischen Indikatoren quantifiziert. Es zeigt sich, dass die morphologischen und ökologischen Veränderungen mit Hilfe der Indikatoren erfasst werden können und relativ gut mit den optischen Beobachtungen übereinstimmen.

1. Einleitung

Die Hochwasserereignisse in jüngerer Zeit haben gezeigt, dass für das Dorf Samedan im Kanton Graubünden die Abflusskapazität des Inns für ein hundertjähriges Hochwasser (HQ₁₀₀) nicht mehr ausreicht. Für die grossen Hochwasserspitzen ist der ursprünglich oberhalb des Dorfes von orographisch rechts einmündende Flaz verantwortlich, wogegen der Inn durch die Oberengadiner Seen stark gedämpft wird.

Der Flaz ist durch die Einzugsgebiete des Berninabachs und Rosegbachs geprägt, die zusammen eine Fläche von 174 km² aufweisen und sich auf einer Höhe zwischen 1700 und 4000 m ü.M befinden. Die alpine Lage und eine Vergletscherung von 23% bewirken ein nivo-glaziales Abflussregime des Flazes. Der Abfluss ist im Frühling und in den Sommermonaten stark von der Schnee- und Gletscherschmelze geprägt. Dagegen sind in den Wintermonaten nur

kleine oder gar keine Abflüsse vorhanden. Um den Hochwasserschutz von Samedan sicherzustellen, wurde 2004 der Flaz auf einer Strecke von 4 km neu verlegt. Der neue Flaz mündet jetzt 2 km unterhalb von Samedan in den Inn und stellt somit für das Dorf keine Bedrohung mehr dar.

Verschiedene Institutionen verfolgen in einem interdisziplinären Monitoring Projekt (Grünenfelder 2007, Janisch 2007, Becker et al. 2007) die seit mehr als 80 Jahren erstmals durchgeführte grössere Flussverlegung in der Schweiz. Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich bearbeitet im Rahmen des Monitoring-Programms den flussbaulichen Teil (VAW 2009). Auf die Ziele und Methoden des flussbaulichen Monitorings wird in Janisch (2007) detailliert eingegangen. Das übergeordnete Ziel ist die Beobachtung und Dokumentation von einem künstlich gebauten Gerinne hin zu einem natürlichen Gewässer.

Das neue Flazgerinne ist nach modernen flussbaulichen Konzepten in sieben unterschiedliche Flussabschnitte eingeteilt (Bild 1). An dieser Stelle wird vor allem auf die drei flussbaulich und morphologisch besonders interessanten Abschnitte *Makrorauigkeiten*, *Aufweitung* und *alternierende Bänke* eingegangen (Bild 2).

Das bis heute grösste Hochwasser im neuen Flazgerinne fand kurz nach dessen Fertigstellung im Juli 2004 statt. Dabei kam es zu Geschiebeumlagerungen und

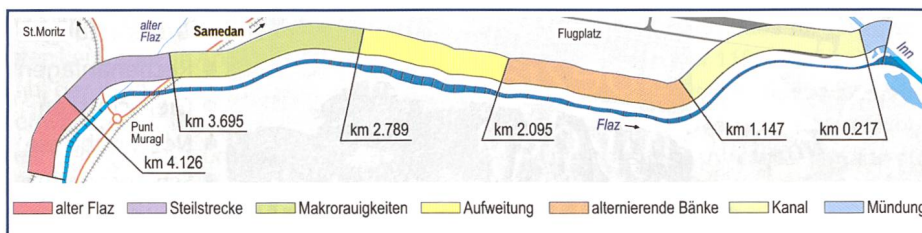


Bild 1. Charakteristische Flussabschnitte des neuen Flazgerinnes.



Bild 2. Drei charakteristische Abschnitte des neuen Flazgerinnes: 1. Makrorauigkeiten, 2. Aufweitung (VAW Web-Cam) und 3. Alternierende Bänke.

den gewünschten morphologischen Veränderungen. Das Hochwasser hatte einen Spitzenabfluss von rund 130 m³/s und kann mit einer Wiederkehrperiode von 10 Jahren eingestuft werden. Das Ereignis ist mit einer detaillierten Hochwasserspür dokumentiert. Um die Hochwassersicherheit des künstlich gebauten Gerinnes zu überprüfen und die ökologischen Veränderungen durch das HQ₂₀₀₄ zu bewerten, wurde im Rahmen einer Masterarbeit an der VAW ein numerisches 2-D-Modell mit der Software BASEMENT (Faeh et al. 2008) erstellt. Aufgrund der grossen Sohlenveränderung durch das HQ₂₀₀₄ wird ein Modell für den Zustand vor und ein Modell nach diesem Ereignis erstellt (im Folgenden mit Modell vor HQ₂₀₀₄ und Modell nach HQ₂₀₀₄ bezeichnet). Der ökologische Zustand wird mit zwei hydraulischen Indikatoren nach Woolsey et al. (2005) aus den numerischen Modellresultaten bestimmt. Ein Vergleich der Indikatoren vor und nach dem Hochwasser soll die ökologischen Veränderungen durch das HQ₂₀₀₄ aufzeigen.

2. Hydraulische 2D-Modellierung mit BASEMENT

Zum einen soll mit dem numerischen 2D-Modell die Hochwassersicherheit des neuen Flazgerinnes überprüft werden. Zum anderen werden durch den Vergleich des Modells vor und nach HQ₂₀₀₄ die ökologischen Veränderungen durch dieses Ereignis untersucht. Als ökologische Indikatoren werden die Variabilität der Fliessgeschwindigkeit und die Variabilität der maximalen Abflusstiefe nach Woolsey et al. (2005) im numerischen Modell bei einem mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) ausgewertet.

Für die numerische Modellierung wird die an der VAW entwickelte Software BASEMENT (Faeh et al. 2008) verwendet. Die tiefengemittelten 2D-Flachwassergleichungen werden auf einem unstrukturierten Berechnungsgitter mit einem Finite-Volumen-Ansatz numerisch gelöst. Als topografische Datengrundlage dienen Querprofile in Abständen von durchschnittlich 50 m. Die Querprofile wurden in verschiedenen Messkampagnen mit GPS aufgenommen. Es stehen Querprofile für den Zustand vor und nach HQ₂₀₀₄ zur Verfügung. Zusätzlich sind für das Modell nach HQ₂₀₀₄ GPS-Aufnahmen von Geschiebebänken vorhanden. Vor dem Hochwasser war die eingebaute Flusssohle eben, d.h., es gab noch keine Geschiebebänke.

Zunächst wurde mit den vorhandenen topografischen Daten (Querprofile und Geschiebebänke) ein topografisches Modell erstellt. Zwischen den Querprofilen

wurde linear interpoliert. Dann wurde das Berechnungsgitter aufgesetzt, welches das zu untersuchende Gebiet mit möglichst regelmässigen Dreiecken diskretisiert. Für das gesamte Gebiet in Bild 1 werden rund 70 000 Dreieckszellen benötigt. Die Knotenpunkte des Berechnungsgitters erhalten die Höheninformationen aus dem Topografiemodell. Die Zellgrössen des Berechnungsgitters sind so zu wählen, dass die wichtigsten Geländestrukturen noch abgebildet werden. Im vorliegenden Fall sind die Dreieckszellen im Bereich der Gerinnesohle zwischen 2 bis 4 m² gross. Als obere Randbedingung wird ein stationärer Zufluss mit entsprechendem Normalabflussgefälle angegeben. Am unteren Rand wird der Wasserspiegel ebenfalls mit einem Normalabflussgefälle kontrolliert. Den einzelnen Abschnitten in Bild 1 wird ein separater Rauigkeitsbeiwert nach Strickler zugeordnet. Zudem wird die Rauigkeit auch über die Breite (Flusssohle, Böschung und Umland) variiert.

3. Ergebnisse

3.1 Kalibrierung

Zur Kalibrierung des Modells wurde die angenommene Hochwasserspür des HQ₂₀₀₄ verwendet. Um eine optimale Übereinstimmung der modellierten Wasserspiegel und der Hochwasserspür zu erhalten, wurden die Rauigkeitsbeiwerte nach Strickler kalibriert. Die erhaltenen Rauigkeitsbeiwerte wurden für das Modell nach HQ₂₀₀₄ übernommen. Um die Hochwasserspür im Modell wiederzugeben, wird eine Genauigkeit von ± 20 cm festgelegt. In Anbetracht verschiedener Unsicherheiten (Topografie, Hochwasserspüraufnahmen, Modellparameter usw.) würde eine zu starke Fixierung auf die Hochwasserspür eine nicht vorhandene Genauigkeit vortäuschen.

Anhand des Abschnitts *alternierende Bänke* soll exemplarisch gezeigt werden, wie beim Vergleich mit der Hochwasserspür vorgegangen wurde (Bild 3). Da die Hochwasserspür jeweils nur auf einer Uferseite aufgenommen wurde, soll diese mit dem modellierten Wasserspiegel in der jeweiligen Ufernähe verglichen werden. Die Wasserspiegel werden nicht zu nahe an der Böschung entnommen, da die Resultate im Übergangsbereich von benetzten zu trockenen Zellen aufgrund von Interpolationsfehlern für die Darstellung nicht aussagekräftig sind. Der Vergleich der Hochwasserspür mit den lokal modellierten Wasserspiegeln (Bild 3) ist hier nicht mit einer 1D-Modellierung zu verwechseln, welche einen über die Breite gemittelten Wasserspiegel darstellt.

Für das Modell vor HQ₂₀₀₄ resultieren vor allem anfangs des Abschnitts *alternierende Bänke* zu hohe Wasserspiegel (Bild 3), ansonsten werden aber gute Übereinstimmungen erzielt. Die zu hohen Wasserspiegel im oberen Teil sind darauf zurückzuführen, dass Feinmaterial auf den Böschungen durch das Hochwasser erodiert wurde und der Abflussquerschnitt damit trotz gleicher Sohlenlage zunahm. Solche morphologischen Veränderungen wurden nicht modelliert. Bei einem Vergleich der Querprofile vor und nach dem Hochwasser hat sich gezeigt, dass die Erosionen an den Böschungen zum Teil bis zu einem Meter betragen. Unter dem erodierten Feinmaterial kam stellenweise ein grober Blocksatz zum Vorschein, wodurch sich die Rauigkeit der Böschungen während des Hochwassers erhöhte. Dies würde eine leichte Erhöhung des Wasserspiegels zur Folge haben und somit der Vergrösserung des Abflussquerschnitts entgegenwirken. Da der Blocksatz nur einen Teil der Böschung belegt und das Verhältnis

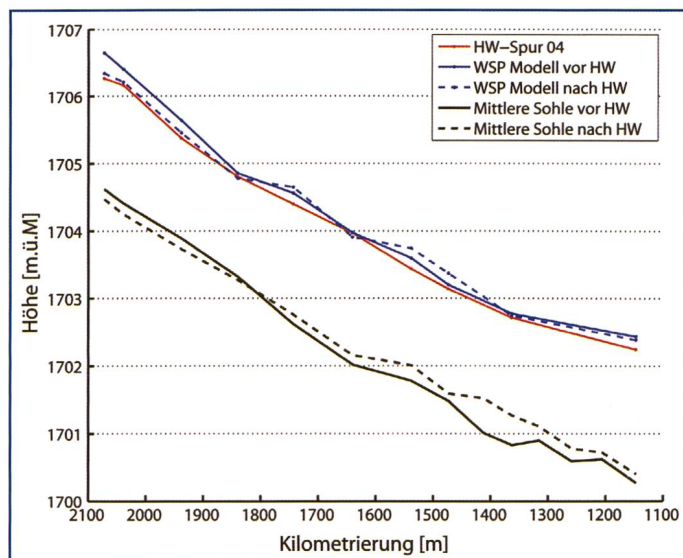


Bild 3. Abschnitt alternierende Bänke: Lokal herausgelesene Wasserspiegel (WSP) im Längsprofil für das Modell vor und nach HQ₂₀₀₄ im Vergleich zur Hochwasserspür des HQ₂₀₀₄

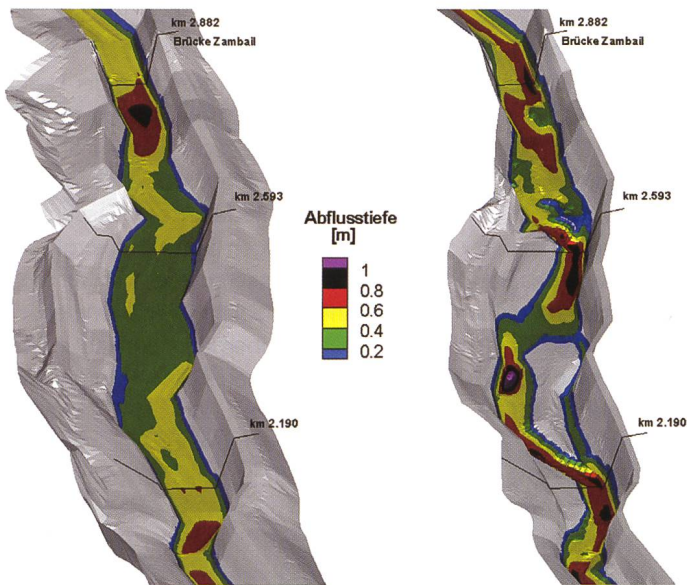


Bild 4. Abschnitt Aufweitung bei MNQ (15 m³/s): Abflusstiefen für das Modell vor (links) und nach HQ₂₀₀₄ (rechts). Ansicht gegen die Fliessrichtung.

Gerinnebreite zu Abflusstiefe relativ gross ist, hat die Vergrösserung des Abflussquerschnitts einen stärkeren Einfluss. Für das Modell nach HQ₂₀₀₄ wird in zwei lokalen Verengungen bei km 1.540 und km 1.740 ein hydraulischer Rückstau beobachtet (Bild 3). Dieser verstärkt sich, weil die Auflandungen in der Topografie nach HQ₂₀₀₄ berücksichtigt werden. Während der Hochwasserspitze würde auf Grund von Erosion die Sohle in diesem Bereich tiefer liegen. Der mittlere absolute Fehler des Wasserspiegels gegenüber der Hochwasserspur liegt im Abschnitt Makrorauigkeiten für das Modell vor HQ₂₀₀₄ bei 15 cm und nach HQ₂₀₀₄ bei 12 cm. Für beide Modelle kann angenommen werden, dass die Sohle während der Hochwasserspitze nicht gut abgebildet ist.

3.2 Hochwassersicherheit

Die Hochwassersicherheit wird für das HQ₁₀₀ (270 m³/s) und das Extremhochwasser EHQ (340 m³/s) überprüft. Für die Berechnung der Hochwasserabflüsse wird das Modell vor HQ₂₀₀₄ verwendet. Der Grund dafür ist, dass mit diesem Modell der ursprünglich dimensionierte Ausgangszustand abgebildet wird. Gemäss Auflageprojekt (Ingenieurgesellschaft En-Flaz 2001) wurde das Gerinne auf die Energielinie des HQ₁₀₀ und auf den Wasserspiegel des EHQ dimensioniert.

Die Dimensionierungskriterien werden für das HQ₁₀₀ und EHQ nur in zwei Querprofilen nicht eingehalten. Bei der geplanten Ausuferung bei km 1.043 wird der rechte Damm schon bei sehr viel kleineren Abflüssen überströmt. Das Wasser fliesst in eine Geländemulde (Feuchtgebiet) und

von dort wieder zurück ins Gerinne. Bei km 2.950 tritt der Flaz ab einem EHQ auf der rechten Seite über die Ufer. Das Wasser fliesst in das weiter unten liegende Moorgebiet und von dort wieder zurück ins Gerinne. Die Ausuferungen sind lokal auf Landwirtschaftsland und natürliche Feuchtgebiete begrenzt und weisen ein reduziertes Schadenspotenzial auf. Über die ganze Flazstrecke betrachtet sind die Dimensionierungskriterien gut eingehalten. Durch die rein hydraulische Modellierung herrscht jedoch eine gewisse Unsicherheit bezüglich Geschiebeumlagerungen, welche bei derart grossen Ereignissen auftreten. Während dem HQ₂₀₀₄ zeigten sich grosse Geschiebeumlagerungen vor allem im oberen Bereich des neuen Flazgerinnes. Ausgehend vom vorliegenden Modell ist eine numerische 2D-Simulation mit beweglicher Sohle und somit mit Berücksichtigung von Geschiebetransport vorgesehen.

3.3 Bewertung der ökologischen Veränderungen

Zur Bewertung der Veränderung der ökologischen Verhältnisse wurden die numerischen Simulationen für eine häufig vorkommende Abflusssituation durchgeführt. Eine dafür repräsentative Grösse ist der mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ). Die Bestimmung des MNQ ist für glaziale Abflussregime mit langen Niederwasserperioden wie am Flaz nicht ganz trivial. Da der Flaz während der Wintermonate nur einen sehr geringen Abfluss aufweist, wird das MNQ des Sommerhalbjahres von 15 m³/s verwendet. Dafür werden die Fließgeschwindigkeiten und Abflusstiefen der Modelle vor und nach HQ₂₀₀₄ verglichen. Eine grosse morphologische und hydraulische Variabilität lässt indirekt auf einen wertvollen aquatischen Lebensraum schliessen. Durch das HQ₂₀₀₄ sind im Abschnitt Aufweitung die deutlichsten morphologischen Veränderungen aufgetreten. Durch die Umströmung der Geschiebebänke bildete sich eine grössere Variabilität in den Abflusstiefen aus (Bild 4).

Die Erfolgskontrolle im Rahmen einer

Fließgewässerrevitalisierung kann mit Hilfe von standardisierten hydraulischen Indikatoren nach Woolsey et al. (2005) quantitativ beurteilt werden. Für den neu gebauten Flussabschnitt fehlt eine Referenzgrösse für den Zustand vor den Baumassnahmen. Darum werden im vorliegenden Fall nicht die Indikatoren vor und nach der Umbaumassnahme analysiert, sondern die eisdynamische Entwicklung des neu gebauten Flussabschnitts. Die gewünschten morphologischen und ökologischen Veränderungen werden durch natürlich vorkommende Hochwasserereignisse hervorgerufen. Zur Bewertung der ökologischen Veränderungen durch das HQ₂₀₀₄ wird der hydraulische Indikator Nr. 16 *Variabilität der Fließgeschwindigkeiten*, der hydraulische Indikator Nr. 17 *Variabilität der maximalen Abflusstiefen* nach Woolsey et al. (2005) sowie ein neuer, abgeleiteter hydraulischer Indikator *Variabilität der Abflusstiefen* verwendet. Im Grunde genommen handelt es sich dabei um Variationskoeffizienten (Gleichung 1), welche auf einen Wert zwischen Null und Eins normiert werden (Gleichungen 2 und 3). Einerseits werden die Indikatoren streng nach Woolsey et al. (2005) in mindestens 25 Querprofilen ausgewertet. Dafür werden im numerischen Modell in allen drei charakteristischen Flussabschnitten in regelmässigen Abständen 25 bis 50 Querprofile definiert und die entsprechenden Modellresultate in den Querprofilen herausgelesen. Andererseits liegen im 2D-Modell die Resultate grundsätzlich in der Fläche vor, weshalb sich zusätzlich zu den Auswertungen in den Querprofilen eine flächige Auswertung in den einzelnen Abschnitten anbietet. Im Folgenden werden für die beiden verwendeten Auswertevarianten die Bezeichnungen *Querprofile* und *Fläche* gebraucht.

Eine direkte Übertragung der Auswertung in den *Querprofilen* auf die *flächige* Auswertung ist für den Indikator *Variabilität der maximalen Abflusstiefen* nicht möglich. Bei der Auswertung in den *Querprofilen* wird in jedem Querprofil die maximale Abflusstiefe bestimmt und aus den Maxima die Variabilität berechnet. In einer Fläche eines Flussabschnitts gibt es nur eine maximale Abflusstiefe, womit keine Variabilität ausgedrückt werden kann. Statt der maximalen Abflusstiefen wird bei der Auswertung in der *Fläche* vorgeschlagen, alle modellierten Abflusstiefen zu verwenden. Dadurch ergibt sich ein abgeleiteter, neuer Indikator, welcher die *Variabilität der Abflusstiefen* bewertet. Dieser wird sowohl in den *Querprofilen* als auch in der *Fläche* ausgewertet. Eine Auswertung in der *Fläche* hat den stati-

stischen Vorteil einer höheren Datendichte der Abflusstiefen sowie der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten gegenüber der reinen Querprofilbetrachtung.

Für die Berechnung der Indikatoren nach Woolsey et al. (2005) werden zuerst die Variationskoeffizienten VC_i für die Fließgeschwindigkeiten und Abflusstiefen bestimmt:

$$VC_i = \frac{\sigma_i}{\mu_i} \quad \text{mit } i = v, h, h_{max} \quad (1)$$

Dabei bezeichnet σ_i die Standardabweichung und μ_i den Mittelwert von i . Ein standardisierter Wert SC_i zwischen 0 (schlecht) und 1 (gut) soll nach Gleichung 2 für die Geschwindigkeit v und nach Gleichung 3 für die Abflusstiefe h oder die maximale Abflusstiefe h_{max} einen quantitativen Vergleich ermöglichen. Der Unterschied zwischen Gleichung 2 und 3 besteht lediglich darin, dass gemäss Woolsey et al. (2005) einmal mit 1.1 und einmal mit 1 normiert wird.

$$SC_v = \begin{cases} VC_v/1.1 & \text{für } VC_v < 1.1 \\ 1 & \text{für } VC_v \geq 1.1 \end{cases} \quad (2)$$

$$SC_{h,h_{max}} = \begin{cases} VC_{h,h_{max}}/1 & \text{für } VC_{h,h_{max}} < 1 \\ 1 & \text{für } VC_{h,h_{max}} \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

Anhand eines Beispiels für den Indikator SC_v im Abschnitt Makrorauigkeiten vor HQ_{2004} soll das Berechnungsvorgehen detailliert erläutert werden. Für die Auswertung in den *Querprofilen* werden im Abschnitt Makrorauigkeiten 36 Querprofile in regelmässigen Abständen definiert. Auf den Schnittpunkten der Querprofile und des Berechnungsnetzes können die Resultate extrahiert werden. Somit ergeben sich 15 bis 25 Geschwindigkeitswerte pro Querprofil. Der Mittelwert aller Geschwindigkeitswerte μ_v in allen 36 Querprofilen beträgt 1.29 m/s und die Standardabweichung σ_v liegt bei 0.40 m/s. Dadurch ergibt sich der Variationskoeffizient VC_v zu 0.31 (Gleichung 1). Mit der Normierung nach Gleichung 2 ergibt sich ein standardisierter Indikatorwert von 0.28. Für die Auswertung in der *Fläche* werden alle Modellresultate bezüglich der lokalen Fließgeschwindigkeiten v in den Berechnungsknoten innerhalb der benetzten Fläche verwendet und am Rand eventuelle Nullwerte ausgespart.

Die ausgewerteten Indikatoren in den *Querprofilen* und in der *Fläche* sind in *Tabelle 1* jeweils separat für die drei unterschiedlichen Flussabschnitte *Makrorauigkeiten*, *Aufweitung* und *alternierende Bänke* aufgelistet. Bei der Beurteilung der

ökologischen Veränderungen ist vor allem die quantitative Veränderung der Indikatoren durch das HQ_{2004} von Interesse. Im Abschnitt *Makrorauigkeiten* sind nur kleine Veränderungen zwischen dem Zustand vor bzw. nach dem Ereignis zu beobachten. Die mit Makrorauigkeiten angereicherte Sohle wird absichtlich stabil gehalten. Am deutlichsten sind die Veränderung der Indikatoren und somit die morphologischen Verbesserungen im Abschnitt *Aufweitung*. Für den Abschnitt *alternierende Bänke* ergibt sich auf Grund der Indikatoren praktisch keine Verbesserung. Jedoch weist der Indikator SC_h auf deutliche morphologische Veränderungen hin. Die Steigerung der standardisierten Indikatorwerte durch das Hochwasser von ungefähr 0.2 im Abschnitt *Aufweitung* wird nach der Vergleichsmatrix im Handbuch von Woolsey et al. (2005) als *leichte Verbesserung*, *kleiner Erfolg* verstanden. Für die Abschnitte *Makrorauigkeiten* und *alternierende Bänke* ergeben sich je nach Indikator *keine Veränderungen* oder *leichte Verbesserung* für die Situation nach dem Hochwasser.

In den beiden Abschnitten *Makrorauigkeit* und *alternierende Bänke* reagiert die *Variabilität der Abflusstiefen* SC_h sowohl in den Querprofilen als auch *flächig* ausgewertet auf die Veränderung durch das HQ_{2004} am sensitivsten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die morphologischen Strukturen des Gewässerbettes am besten durch die lokalen Abflusstiefen wiedergegeben werden, die bereits durch kleine morphologische Veränderungen signifikanter beeinflusst werden als die maximalen Abflusstiefen oder die Fließgeschwindigkeiten. Im Abschnitt *Aufweitung* bewegen sich die Veränderungen aller Indikatoren (SC_v , SC_h , $SC_{h_{max}}$) im gleichen Rahmen. Hier sind die morphologischen Veränderungen so deutlich, dass sie von allen Indikatoren gleichwertig erfasst werden können.

Für die Interpretation der Indikatoren ist es entscheidend, sich deren praktische Bedeutung vor Augen zu führen. So bewertet der Indikator *Variabilität der Fließgeschwindigkeiten* SC_v die hydraulische Variabilität in Quer- und Längsrichtung. Der Indikator *Variabilität der maximalen Abflusstiefen* $SC_{h_{max}}$ bewertet die hydraulische und morphologische Variabilität nur in Längsrichtung. Diese isolierte Bewertung der Variabilität in Längsrichtung ist eine Stärke dieses Indikators. Der Indikator *Variabilität der Abflusstiefen* SC_h bewertet die hydraulische und morphologische Variabilität in Längs- und Querrichtung. Da jeder Indikator eine unterschiedliche Aussage macht, ist eine Kombination von verschiedenen Indikatoren sinnvoll.

Weitere Projektziele bezüglich Umwelt und Ökologie nach Woolsey et al. (2005) sind unter anderen die longitudinale Vernetzung (Wechselwirkung im Längsverlauf), laterale Vernetzung (Wechselwirkung zwischen aquatischen, terrestrischen und Auenhabitaten) und vertikale Vernetzung (Wechselwirkung mit dem Grundwasser). Mit der Variabilität der Wasserspiegellbreite und der Überflutungsdynamik kann z.B. die laterale Vernetzung beurteilt werden. Um die longitudinale Vernetzung eines Fließgewässers zu bewerten, müssen ergänzende biologische Untersuchungen wie z.B. die Durchgängigkeit für Fische oder eine Zählung von Makroinvertebraten durchgeführt werden.

Eine hohe morphologische und hydraulische Variabilität ist notwendig, aber nicht hinreichend für eine hohe Biodiversität in Fließgewässern. Eine grosse Strukturvielfalt alleine reicht nicht aus, um eine hohe Biodiversität zu gewährleisten (Gostner et al. 2009). Andere Faktoren wie Wasserqualität, Abflusssdynamik und Geschiebehalt haben ebenfalls grossen Einfluss auf den ökologischen Zustand eines Fließgewässers. Die Auswertungen

	Querprofile			Fläche	
	SC_v	SC_h	$SC_{h_{max}}$	SC_v	SC_h
Makrorauigkeit					
vor HQ_{2004}	0.28	0.32	0.11	0.20	0.21
nach HQ_{2004}	0.31	0.44	0.14	0.21	0.31
Aufweitung					
vor HQ_{2004}	0.23	0.35	0.17	0.17	0.28
nach HQ_{2004}	0.40	0.63	0.26	0.32	0.50
alternierende Bänke					
vor HQ_{2004}	0.33	0.31	0.13	0.23	0.16
nach HQ_{2004}	0.33	0.44	0.15	0.23	0.33

Tabelle 1. Vergleich der standardisierten Indikatoren Variabilität der Fließgeschwindigkeit SC_v , Variabilität der Abflusstiefen SC_h und Variabilität der maximalen Abflusstiefen $SC_{h_{max}}$ sowohl in den Querprofilen als auch in der Fläche ausgewertet.

mittels abiotischer morphologischer und hydraulischer Parameter müssen, um die Vernetzung der Lebensräume vollständig zu bewerten, noch mit zusätzlichen biologischen Parametern ergänzt werden. Mit den aufgezeigten hydraulischen Indikatoren kann jedoch ermittelt werden, ob sich die gewünschten morphologischen Veränderungen gebildet haben und somit die Voraussetzungen für eine ökologische Verbesserung gegeben sind.

Die morphologischen und hydraulischen Veränderungen durch nur ein einziges Hochwasser können mit Hilfe der hydraulischen Indikatoren im numerischen Modell erfasst werden. Das betrachtete HQ₂₀₀₄ stellt nur einen ersten Schritt des gesamten dynamischen Prozesses der morphologischen Umstrukturierung dar.

4. Schlussfolgerung und Ausblick

Im Rahmen des flussbaulichen Monitoring-Projekts am Flaz ist eine numerische 2D-Modellierung des neu gebauten Gerinnes mit der Software BASEMENT (Faeh et al. 2008) durchgeführt worden. Das kalibrierte Modell vermag die Hochwasserspür innerhalb eines zufriedenstellenden Genauigkeitsbereiches von ± 20 cm nachzubilden. Grössere Abweichungen können hauptsächlich durch Umlagerungen während des Hochwassers und Erosion der locker geschütteten Böschungen erklärt werden. Das Modell nach dem Ereignis vermag die Hochwasserspür besser zu reproduzieren als das Modell vor HQ₂₀₀₄. Dies ist vor allem auf die verwendete Topografie nach HQ₂₀₀₄ zurückzuführen, welche dem Zustand während der Hochwasserspitze in vielen Abschnitten näher kommt. Jedoch werden dabei Ablagerungen berücksichtigt, welche während der Hochwasserspitze nicht vorlagen und sich erst während der abklingenden Hochwasserwelle bildeten.

Die Hochwassersicherheit konnte entsprechend den Dimensionierungskriterien für das HQ₁₀₀ und EHQ nachgewiesen werden. Nur an zwei Stellen kommt es lokal zu begrenzten Ausuferungen mit einem kleinen Schadenspotenzial.

Mit dem numerischen 2D-Modell sind die Abflusszustände vor und nach HQ₂₀₀₄ bei einem mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ verglichen worden, was Aussagen zu den ökologischen Veränderungen ermöglichte. Die Auswirkungen der morphologischen Veränderungen durch ein einziges bettbildendes Hochwasser können mit dem Indikator Nr. 16 *Variabilität der Fliessgeschwindigkeiten*, dem Indikator Nr. 17 *Variabilität der maximalen Abflusstie-*

fen nach Woolsey et al. (2005) sowie dem neuen, abgeleiteten Indikator *Variabilität der Abflusstiefen* quantitativ erfasst und bewertet werden. Im Gegensatz zu Naturmessungen in mehreren Querprofilen sind im numerischen 2D-Modell auch flächige Auswertungen möglich. Die flächig vorliegenden Modellresultate liegen räumlich höher aufgelöst vor als im Feld aufgenommene Querprofilaten.

Um die Aussagekraft zu optimieren, muss die Auswertung ökologischer Indikatoren aus numerischen Simulationen noch vertieft werden. Als Grundlage dafür müssen geeignete Indikatoren gefunden werden, welche den hydraulisch-morphologisch und wenn möglich ökologischen Zustand bestmöglich wiedergeben. Dafür kommt eine Kombination von Parametern wie z.B. Fliessgeschwindigkeit, (maximale) Abflusstiefe, Wasserspiegelbreite, Sohlenschubspannung und Überflutungsdynamik (Dauer, Häufigkeit und Ausmass von Überflutungen) in Frage. Die Zusammenstellung der Indikatoren ist so zu wählen, dass die morphologische und hydraulische Variabilität sowohl in Längs- als auch in Querrichtung beurteilt werden kann. Um den ökologischen Zustand noch vertiefter zu bewerten, soll auch die laterale und longitudinale Vernetzung des aquatischen Lebensraumes berücksichtigt werden. Mit Hilfe von zusätzlichen Indikatoren wie auch im Feld aufgenommenen biologischen Indikatoren soll diese Lücke geschlossen werden. In einem nächsten Schritt soll das kalibrierte hydraulische 2D-Modell als Grundlage dienen, um die Hydraulik gekoppelt mit Geschiebetrieb zu modellieren. Damit können Umlagerungsprozesse während eines Hochwasserereignisses berücksichtigt werden, was zu einer besseren Übereinstimmung der Modellresultate und der aufgenommenen Hochwasserspür führt. Vor allem in den Abschnitten mit grossen Erosionen und Auflandungen wird eine deutliche Verbesserung erwartet. Nach Möglichkeit soll auch die qualitative Entstehung von groben Sohlenstrukturen wie Geschiebebänken modelliert werden. Mit einem numerischen 2D-Modell mit Geschiebetransport könnten Auswirkungen von baulichen Massnahmen schon im Voraus abgeschätzt werden. Dies würde es schon in der Planung von Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojekten ermöglichen, morphologische Veränderungen abzuschätzen. Abzuklären gilt es auch, inwiefern sich die Änderungen der ökologischen Indikatoren im numerischen Modell mit beweglicher Sohle reproduzieren lassen.

Verdankung

Das Monitoring-Projekt wurde durch die finanzielle Unterstützung des Bundesamts für Umwelt (BAFU) realisiert. Auch die Entwicklung der hier verwendeten Software BASEMENT wird durch das BAFU finanziell unterstützt und ist frei erhältlich unter www.basement.ethz.ch.

Literatur

Faeh, R., Mueller, R., Rousselot, P., Vetsch, D., Volz, C., Fahrli, D. (2008). System Manuals of BASEMENT, Version 1.5. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

Gostner, W., Schleiss, A.J. (2009). Der hydraulisch-morphologische Vielfältigkeitsindex: Fallstudien an der Bünz und an der Venoge. Proc. 11. Treffen junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an Wasserbauinstituten, Communication 40, LCH, EPF Lausanne, 109–114. Ingenieurgesellschaft En-Flaz, Auflageprojekt (2001). Hochwasserschutz Samedan, Flazverlegung und Renaturierung En. Technischer Bericht Projekt Nr. 429.27-D. Kanton Graubünden, Gemeinde Samedan.

Janisch, T. (2007). Flussbauliches Monitoring am Flaz – Ziele und Methoden. Wasser Energie Luft 99(3), 208–212.

VAW (2009). Flussbauliches Monitoring Flaz, Schlussbericht Phase II. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, VAW-Bericht Nr. 4206/2, unveröffentlicht.

Becker, A., Rey, P., Mürle, U., Ortlepp, J., Michel, M., Steiner, P., Gritti, R. (2007). Gewässerökologische Erfolgskontrollen. Wasser Energie Luft 99 (3), 215–222.

Grünenfelder, J. (2007). Hochwasserschutzprojekt Samedan: Grundwasser-Monitoring. Wasser Energie Luft 99 (3), 213–214.

Woolsey, S., Weber, C., Gonser, T., Hoehn, E., Hostmann, M., Junker, B., Roulier, C., Schweizer, S., Tiegs, S., Tockner, K., Peter, A., Capelli, F., Hunzinger, L., Moosmann, L., Paetzold, A., Rohde, S. (2005). Handbuch für die Erfolgskontrolle bei Fliessgewässerrevitalisierungen. Eawag, WSL, LCH-EPFL, VAW-ETHZ.

Anschrift des Verfassers

Lukas Vonwiller, wissenschaftlicher Mitarbeiter; Dr. Volker Weitbrecht, Abteilungsleiter Flussbau; Marietta von Pfuhlestein, wissenschaftliche Mitarbeiterin; Prof. Dr. Robert Boes, Direktor. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Gloriastrasse 37/39, CH-8092 Zürich
vonwiller@vaw.baug.ethz.ch
www.vaw.ethz.ch