

DER NEUE FLAZ – FLUSSBAULICHES MONITORING AN EINEM AUSSERGEWÖHNLICHEN PROJEKT

Marietta von Pfulstein¹, Manuel Epprecht², **Martin Detert**³ und Volker Weitbrecht⁴

ZUSAMMENFASSUNG

Um den Hochwasserschutz von Samedan (Schweiz) zu gewährleisten, wurde der Flaz 2004 in ein 4 km langes neues Gerinne umgeleitet. Dadurch konnte neben dem Hochwasserschutz, inkl. Bewältigung des Überlastfalls, auch eine ökologische Aufwertung des Gewässersystems erfolgen. Das Projekt zeichnet sich durch eine rasche Realisierung sowie ein intensives, multidisziplinäres Monitoring aus. Das dazugehörige flussbauliche Monitoring bildet den Schwerpunkt dieses Artikels. Es wird aufgezeigt, wie mit den umfangreich erhobenen Datensätzen flussbauliche Berechnungsansätze wie die Geschiebetransportberechnung in verzweigten Gerinnen und die Sohlenbeprobung mittels Linienzahlanalyse mit Naturdaten validiert werden konnten. Ausserdem werden neue flussbauliche Methoden wie die automatische Objekterkennung zur Bestimmung der Sohlenzusammensetzung mit den am Flaz erhobenen Daten weiterentwickelt. So trägt das ausführliche Monitoring am Flaz dazu bei, die Qualität zukünftiger Hochwasserschutzprojekte zu verbessern und die dafür zur Verfügung stehenden Ressourcen effizienter einzusetzen.

Keywords: flussbauliches Monitoring, Geschiebetransport in verzweigten Gerinnen, Sohlenbeprobungen, Linienzahlanalyse, automatische Objekterkennung, Makrorauigkeiten

ABSTRACT

In order to protect the village Samedan (Switzerland) against severe flooding, the Flaz River was permanently diverted over 4 km in 2004. Besides providing durable flood protection, that also copes with floods exceeding the design discharge, this measure enables an ecological valorization of the whole fluvial system. The project is characterized by a rapid realization and an intensive, multidisciplinary monitoring. This monitoring includes numerous river engineering aspects, which present the main focus of this paper. It is shown how extensive data sets are used to validate river engineering approaches concerning sediment transport in braiding rivers and in-situ bed sampling methods. Furthermore the development of new approaches for bed sampling methods benefits from the data sets. Consequently the Flaz monitoring contributes to improving the quality of future flood protection projects and enables a more efficient use of the related financial resources.

Keywords: fluvial monitoring, bed load transport in braided rivers, bed sampling methods, line sampling, automated object detection, macro roughness elements

¹ Marietta von Pfulstein, ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Schweiz

² Manuel Epprecht, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Gefahrenprävention, Bern, Schweiz

³ Dr. Martin Detert, ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Schweiz (e-mail: detert@vaw.baug.ethz.ch)

⁴ Dr. Volker Weitbrecht, ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Schweiz

HINTERGRUND

Um in Samedan (Graubünden, Schweiz) den Hochwasserschutz zu gewährleisten, wurde der Flaz 2004 dauerhaft in ein 4 km langes neues Flussbett umgeleitet (Fig.1). Durch die Verlegung des Flussbettes mündet der Flaz, der massgebend für die Hochwassergefährdung von Samedan verantwortlich war, nicht mehr oberhalb sondern *unterhalb* des Ortes in den Inn. Der neue Flaz konnte in Anlehnung an regionspezifische, unverbaute Flussabschnitte gestaltet werden, so dass ein morphologisch, ökologisch und landschaftlich interessantes Gewässer entstanden ist und ausserdem der Hochwasserschutz nachhaltig gewährleistet ist. Das bestehende Gerinne in Samedan kann nun mühelos das restliche Inn-Wasser durch den Ort abführen und konnte zusätzlich revitalisiert werden. Dieses ungewöhnliche Hochwasserschutzprojekt – es ist die erste grosse Flussumlegung in der Schweiz seit 80 Jahren – bot die seltene Gelegenheit, ein detailliertes flussbauliches Monitoring an einem neugebauten Gerinne durchzuführen, welches den Schwerpunkt dieses Beitrags bildet.

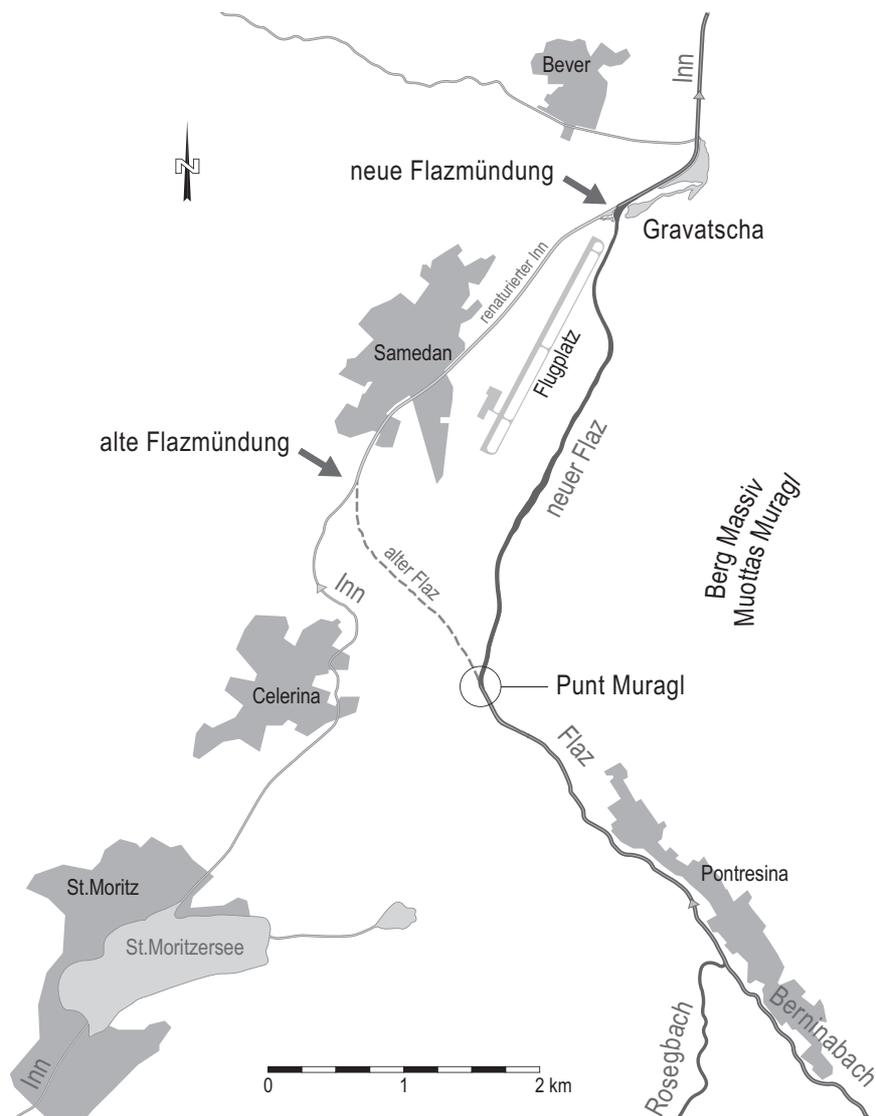


Fig. 1 Übersicht über das Projektgebiet mit dem neuen Umleitungsgerinne „neuer Flaz“. Der neue Flaz verläuft aus Pontresina kommend von Punt Muragl östlich vom Flugplatz und mündet bei Gravatscha in den Inn. Der alte Flaz wird lediglich mit einer Restwassermenge gespeist.

Fig. 1 Overview of the project area with the diverted Flaz River („neuer Flaz“). The river comes from Pontresina, the new channel starts in Punt Muragl and flows into the Inn River at Gravatscha. The old Flaz River („alter Flaz“) is reduced to a small stream.

VORSTELLUNG DES PROJEKTS

Bereits vier Jahre nach dem Entscheid der Gemeinde Samedan für die Verlegung des Flaz konnte der Teil der Arbeiten abgeschlossen werden, welcher den Hochwasserschutz verbessert. Dabei bevorzugte Samedan trotz bedeutend höherer Baukosten eine zukunftsweisende, ganzheitliche Lösung statt eine vorwiegend bautechnische Sanierung der damaligen Schutzbauten.

Das neue Flaz-Gerinne besteht aus vielfältigen Abschnitten, die in Fig. 2 dargestellt sind. Die Gerinneabschnitte wurden so weit wie möglich in Anlehnung an naturnahe Abschnitte des Flazes gestaltet (z.B. Aufweitung), in einigen Abschnitten, wie z.B. im Kanal, wo eine maximale Geschiebetransportkapazität gewährleistet werden musste, standen hochwassertechnische Aspekte im Vordergrund.

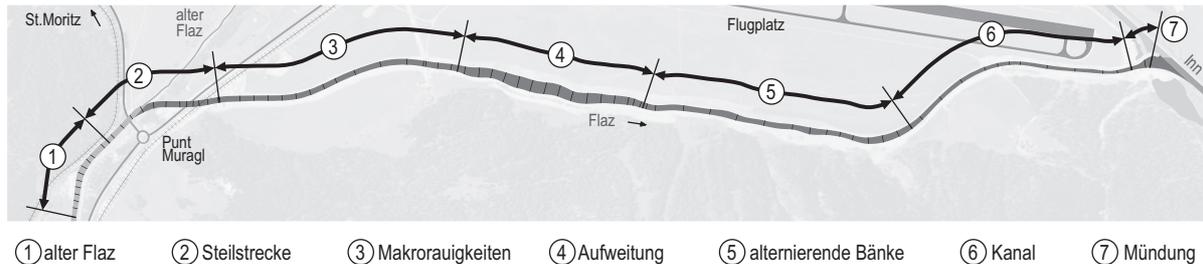


Fig. 2 Darstellung der verschiedenen Abschnitte des neuen Flaz-Gerinnes.

Fig. 2 The new Flaz River with its different river sections.

Die nachfolgende Tab. 1 fasst die wichtigsten Gerinneparameter zusammen und gibt einen Überblick über die Hochwasserabflüsse:

Tab. 1 Zusammenfassung der Gerinnecharakteristiken am neuen Flaz.

Tab. 1 Main characteristics of the new Flaz river.

Gerinnelänge [km]	4
Gefälle [%]	0.3 – 1
Sohlenbreite [m]	15 – 40
Sohlenmaterial [cm]	$d_m = 1.5 - 6$
Einzugsgebiet [km ²]	194, davon ca. 10% vergletschert
Hochwasserabflüsse [m ³ /s]	$HQ_2 = 69$; $HQ_5 = 105$; $HQ_{10} = 130$; $HQ_{100} = 270$; $HQ_{200} = 340$; wobei HQ_x einem x-jährigem Ereignis entspricht
Böschungsverbau	grober Blocksatz, teilweise überschüttet; kurze Abschnitte mit unverbautem Ufer
Sohlenverbau	weitestgehend unverbaut, teilweise mit groben Blöcken belegt

Das Projekt setzt die heutigen Anforderungen an Hochwasserschutzprojekte beispielhaft um. Es erfüllt insbesondere zwei zentrale Anliegen des modernen Hochwasserschutzes: Mit dem verlegten Flaz wird das Siedlungsgebiet mit seinem hohen Schadenpotential von der Hochwassergefahr befreit und die Überflutzungszone wird in bedeutend weniger sensibles Gebiet verlagert. Der Lebens- und Wirtschaftsraum Samedan wird damit dauerhaft vor Überschwemmungen geschützt. Das Flusssystem ist heute überlastbar, das heisst, wenn der Dimensionierungsabfluss (HQ_{100}) überschritten wird, wachsen die Schäden nicht mehr sprunghaft an, denn der Siedlungsraum von Samedan wird durch den Überlastfall nicht mehr berührt. Das Restrisiko wird gegenüber früher auf ein Minimum reduziert.

Ein zweiter wichtiger Punkt ist die Verbesserung der ökologischen Situation. Mit dem neuen Flaz, dem Rückbau des alten Flazgerinnes und mit dem renaturierten Inn werden naturnahe Lebensräume wie die Auenlandschaft Cristiansains und das Ökosystem Gravatscha besser vernetzt. Damit entwickeln sich die Gewässer zu bedeutenden und verbindenden Elementen in der Talebene von Samedan.

Unabdingbare Voraussetzung für den sehr zeitnah realisierten Hochwasserschutz von Samedan mit Kosten von 30 Mio. CHF waren der grosse Wille zur Zusammenarbeit und die Konsensfähigkeit aller Beteiligten. Die aktive und offene Informationspolitik der Gemeinde schaffte Vertrauen und machte die verschiedenen Interessenskreise frühzeitig zu betroffenen Beteiligten. Der neue Hochwasserschutz

von Samedan weist in die Zukunft. Er sichert die Lebensgrundlagen in der Talebene für die heutige und für spätere Generationen.

Für diese gesamtschweizerisch bedeutende und weitsichtige Leistung erhielten die Gemeinde Samedan und der Kanton Graubünden den Gewässerpreis Schweiz 2005 zugesprochen. Dieser Preis wird von den Organisationen Verein für Ingenieurbiologie, Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute und Pro Natura alle zwei Jahre verliehen.

ZIELE DES FLUSSBAULICHEN MONITORINGS

Um heraus zu finden, ob sich die vielfältigen Erwartungen an das neue Gerinne erfüllt haben, wird seit 2004 ein interdisziplinäres Monitoring am Flaz durchgeführt. Neben Aspekten, die die Ökologie und das Grundwasser betreffen, liegt der Schwerpunkt beim flussbaulichen Monitoring. Dieses wird im Auftrag des schweizerischen Bundesamt für Umwelt (BAFU) von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)/ETHZ bis Ende 2011 durchgeführt und ist Hauptthema dieses Konferenzbeitrags. Ziel ist es zum einen, den Erfolg dieses Projektes in Bezug auf Hochwasserschutz und ökologische Aufwertung zu beurteilen. Andererseits soll die detaillierte Dokumentation der Entwicklung eines neugebauten Gerinnes hin zu einem naturnahen Flussabschnitt die Validierung verschiedener flussbaulicher Berechnungsansätze, die häufig im Labor entwickelt wurden, ermöglichen. Das Monitoring am Flaz trägt somit dazu bei, dass die Prognose flussbaulicher Entwicklungen von Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojekten besser gelingt und die Qualität solcher Projekte verbessert werden kann. Dazu werden seit 2004 folgende Datengrundlagen erhoben:

- detaillierte Sohlenbeprobungen
- ausführliche Fotodokumentation, u.a. mittels Webcam-Aufnahmen
- laufende Radarsondenaufnahmen des Wasserspiegels an 3 Standorten
- regelmässige Vermessung der Gerinnegeometrie
- ereignisbezogene Aufnahmen von Hochwasserspuren und morphologischen Formen

Aus den verschiedenen flussbaulichen Aspekten, die im Rahmen des Monitorings am Flaz bearbeitet wurden, werden hier ausgewählte Ergebnisse zum Geschiebetrieb, zum Flussabschnitt „Makrorauigkeiten“ und zu verschiedenen Sohlenbeprobungsmethoden genauer behandelt.

GESCHIEBETRIEB IN DER AUFWEITUNG

Der Geschiebetrieb am neuen Flaz wurde mit verschiedenen Methoden untersucht: Geschiebebilanzierung gemäss topographischer Vermessung der Sohle, abschnittsweise Berechnung des Geschiebetriebs mittels gängiger, semi-empirischer Ansätze und numerische Modellierung des Geschiebetriebs (1d und 2d) (VAW, 2009).

Von grossem Interesse ist die Sohlenentwicklung in der Aufweitung, wo sich ein verzweigtes Gerinne gebildet hat. Wie aus Fig. 3a-c ersichtlich, bewirkte das Hochwasser vom Juli 2004 („HW‘04“, Abflussspitze $Q_{\max} = 130 \text{ m}^3/\text{s}$, $\sim HQ_{10}$) in diesem Abschnitt die Bildung von morphologischen Strukturen, deren Entwicklung sich mit verminderter Dynamik in den nachfolgenden Jahren fortgesetzt hat. Ursprünglich war dieser Abschnitt als potenzieller Standort für Geschiebeentnahmen gedacht. Allerdings haben die geschiebetechnischen Untersuchungen sowie die Beobachtungen der letzten Jahre gezeigt, dass sich dieser Abschnitt annähernd im Gleichgewicht befindet. Das Geschiebe wird bei bettbildenden Ereignissen durch diesen Abschnitt durchtransportiert, um sich dann im flussabwärtsliegenden Abschnitt als „alternierende Bänke“ abzulagern. Erst bei sehr grossen Hochwassern ($\sim HQ_{100}$) ist gemäss Naturdaten und Prognose (1d-Modellierung des Geschiebetransports, s. VAW, 2009) mit nennenswerten Ablagerungen in der Aufweitung zu rechnen.



Fig. 3 Entwicklung der Aufweitung von 2004 -2008, Webcam-Aufnahmen, Blick flussaufwärts, Abfluss jeweils $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$: (a) Juni 2004, vor HW'04; (b) Juli 2004, nach HW'04; (c) August 2007; (d) September 2008, nach einem HQ_5

Fig. 3 Development of the river widening 2004 – 2008, Webcam photos, upstream view, discharge $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$: (a) June 2004, before flood 2004; (b) July 2004 after flood 2004; (c) August 2007; (d) September 2008, after HQ_5

Validierung der Berechnung des Geschiebetransports in der Aufweitung nach Zarn (1997)

Zarn (1997) schlägt einen Berechnungsansatz für den Geschiebetransport in verzweigten Gerinnen vor. Dieser wurde aufgrund von Modellversuchen entwickelt und wurde anhand von Naturdaten aus der Aufweitung am Flaz überprüft. Da es aus Kostengründen nicht immer möglich ist, mit einem numerischen Modell die Geschiebeführung eines Flusses zu prognostizieren, ist es sehr wichtig, dass auch für morphologisch komplexe Flussabschnitte eine Abschätzung des Geschiebetriebs mittels eines vereinfachten Berechnungsansatzes erfolgen kann. Das Berechnungsverfahren nach Zarn (1997) basiert darauf, dass die komplizierten Abflussverhältnisse und die hohe Variabilität der Sohlenstrukturen in verzweigten Gerinnen zu einem idealisierten Ersatzgerinne vereinfacht werden. Das Ersatzgerinne ist durch einen rechteckigen Querschnitt mit ebener Sohle und einer eindimensionalen Strömung mit Normalabflussbedingungen gekennzeichnet, wobei der Einfluss von Bänken auf den Fließwiderstand berücksichtigt wird.

Am Flaz wird die nach Zarn (1997) berechnete Geschiebefracht GF für das HW'04 ($130 \text{ m}^3/\text{s}$, $\sim HQ_{10}$) mit den aus vermessenen Sohlenveränderungen ermittelten Geschiebefrachten verglichen (Fig. 4): Aus Abschätzungen der Geschiebefracht für verschiedene Abschnitte im alten Flaz ist der Geschiebeeintrag in das neue Gerinne während des HW'04 annähernd bekannt ($GF = 6 \cdot 200 \text{ t}$). Von diesem Wert ausgehend wird anhand der gemessenen Sohlenänderungen die Geschiebefracht für alle weiteren Gerinneabschnitte berechnet. Es wird erkennbar, dass es während des HW'04 vor der

Steilstrecke zu deutlichen Erosionen, und dann in der Steilstrecke selber zu deutlichen Ablagerungen kam. In den „Makrorauhigkeiten“ kam es zur Mobilisierung von Geschiebe. Da sich in der Aufweitung die Sohle nur sehr wenig verändert hat (siehe Ablagerungs- und Erosionsverlauf in oberer Graphik), bleibt die Fracht in diesem Abschnitt ungefähr konstant bei $GF = \sim 13'500$ t. Erst in den alternierenden Bänken kommt es zu grösseren Ablagerungen. Während nach Zarn (1997) mit einer Geschiebefracht von $GF = 14'000$ t zu rechnen war, ergaben also die Frachten aus den Vermessungsdaten, unter Annahme des in Fig. 4 dargestellten Geschiebeinputs, $GF = \sim 13'500$ t. Dies entspricht einer sehr guten Übereinstimmung, sodass die Validierung an einem kiesführenden, verzweigten Gerinne als erfolgreich betrachtet werden kann. Diese Validierung gilt für Flussaufweitungen, die sich, wie am Flaz, annähernd im Gleichgewicht befinden.

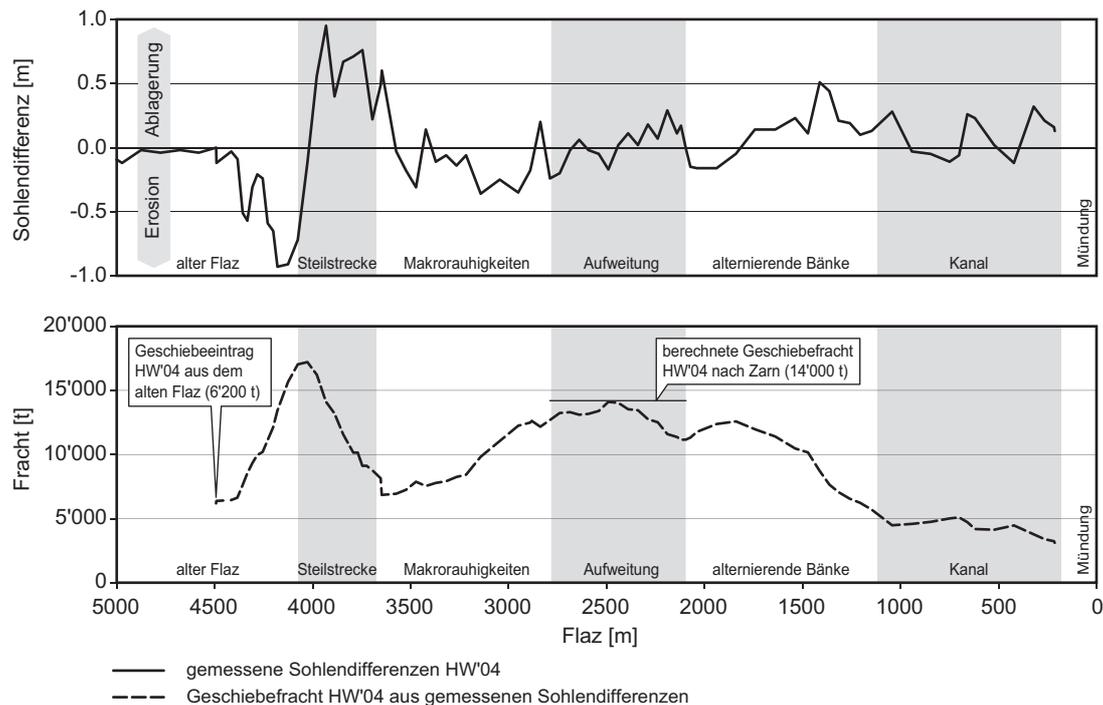


Fig. 4 *Oben:* gemessene Sohldifferenzen HW'04. *Unten:* Geschiebefrachten HW'04: Vergleich der aus den vermessenen Querprofilen ermittelten Geschiebefracht (gestrichelte Linie) mit der in der Aufweitung nach Zarn (1997) berechneten Fracht (durchgezogene Linie).

Fig. 4 *Top:* measured differences of the river bed elevation (flood 2004); *Bottom:* Total bed load (flood 2004): comparison of the total bed load calculated from the measured river bed differences (broken line) with the total bed load according to Zarn (1997) (continuous line).

MAKRORAUIGKEITEN

Ein ~1000 m langer Abschnitt am neuen Flaz ist unregelmässig mit Blöcken belegt (Blockdurchmesser 0.4 – 0.9 m, Gefälle $J_{\text{Sohle}} = 1\%$ (Fig. 5). Die Belegungsichte beträgt im Durchschnitt ~5%. Diese Art der Sohlensicherung wird häufig in Hinblick auf eine ökologische Aufwertung angewendet. Es besteht aber in Bezug auf Belastungsgrenzen, Geschiebetransport und ökologischen Erfolg ein grosser Forschungsbedarf, weshalb dieser Flaz-Abschnitt einen Schwerpunkt des flussbaulichen Monitorings bildet.



Fig. 5 Abschnitt mit Makrorauigkeiten, $Q = 8 \text{ m}^3/\text{s}$, Belegungsdichte 5%, September 2006.

Fig. 5 River bed with macro roughness elements, $Q = 8 \text{ m}^3/\text{s}$, block placement density 5%, September 2006.

Die Makrorauigkeiten wurden im Herbst 2009 detailliert in ihrer Lage und in ihrer Grösse vermessen. Die Neuvermessung im Herbst 2011 wird eine Aussage über die Stabilität der einzelnen Blöcke bei einem $\sim HQ_2$ (Juli 2011) erlauben. Die aus den Felddaten gewonnenen Erkenntnisse werden mit Ergebnissen der Modellversuche verglichen, die seit 2009 an der VAW/ETHZ durchgeführt werden. Es wurden einerseits Modellversuche durchgeführt, die die Verhältnisse am Flaz abbilden, und so eine Prognose über das weitere Verhalten dieses Abschnittes und Aussagen zum Geschiebetransport ermöglichen (Plüer, 2009). Andererseits werden im Rahmen eines vom BAFU finanzierten Forschungsprojekts („Aufgelöste unstrukturierte Blockrampen“, vgl. Tamagni et al., 2010) Modellversuche an unstrukturierten Blockrampen durchgeführt. Diese entsprechen Flussabschnitten mit Makrorauigkeiten, allerdings mit grösseren Belegungsdichten. Das Forschungsprojekt soll für diese flussbauliche Massnahme zur Sohlensicherung allgemeingültige Dimensionierungsgrundlagen liefern, sowohl in Hinblick auf die Stabilität wie auch auf die Ökologie.

Die Modellversuche bestätigen, dass die am Flaz gewählte Blockgrösse ($D/d_{90} = 4 - 6$, mit D = Blockdurchmesser und d_{90} des Untergrundmaterials) zum „Abgleiten“ neigt (Fig. 6). So wird erwartet, dass schon das HQ_2 vom Juli 2011 eine Umlagerung der Blöcke bewirkt hat. Diese Blöcke werden eventuell im flacheren Unterwasserabschnitt auftauchen. Durch die Umlagerungen entstehen neben kleinen, stabilen Blockgruppen aufgrund der relativ geringen Belegungsdichte auch Bereiche, die ungeschützt sind und bei höheren Hochwassern Erosionen begünstigen. Erste Ergebnisse des Forschungsprojektes „Aufgelöste und unstrukturierte Blockrampen“ zeigen, dass erst bei Belegungsdichten von 15 – 25% Blockumlagerungen entstehen, die in ihrer Anordnung eine selbststabilisierende Wirkung auf die Sohle haben. Insgesamt muss heute davon ausgegangen werden, dass sich der Abschnitt „Makrorauigkeiten“ bei einem grossen Hochwasser ($\sim HQ_{100}$) Erosionstendenzen aufweisen wird und die Blöcke mehrheitlich weggespült werden. Diese Prognose wird einerseits durch die Modellversuche (Plüer, 2009) und andererseits durch Stabilitätsberechnungen nach Whittaker (1988) am exponierten Einzelblock gestützt. So liefern die Natur- und Modelldaten zum neuen Flaz gute Validierungsmöglichkeiten von Stabilitätsberechnungen einer Makrorauigkeitenstrecke mit relativ niedriger Belegungsdichte. Für grössere Belegungsdichten soll das Forschungsprojekt „Aufgelöste und unstrukturierte Blockrampen“ Dimensionierungsleitlinien liefern, die dann mit Daten des flussbaulichen Monitorings am Flaz validiert werden können.

Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen an den Makrorauigkeiten ist die Unsicherheit bezüglich des zu erwartenden Geschiebetransports. Wegen der bimodalen Rauigkeit und den daraus resultierenden Turbulenzverhältnisse (Strömungskonzentrationen und strömungsberuhigte Zonen) in diesem Abschnitt liegen die bekannten Transportformeln ausserhalb ihres Anwendungsbereiches. Berechnungen nach Meyer-Peter und Müller (1948) liefern insofern keine zuverlässigen Angaben zum erwarteten Geschiebetrieb. Die Modellversuche nach Plüer (2009) zeigen qualitativ auf, dass der

Geschiebetrieb schon durch relativ geringe Belegungsdichten, wie sie am Flaz vorliegen, gebremst wird. Weitere Untersuchungen zu diesem wichtigen Thema sind im Rahmen des Forschungsprojekts „Aufgelöste und unstrukturierte Blockrampen“ vorgesehen.

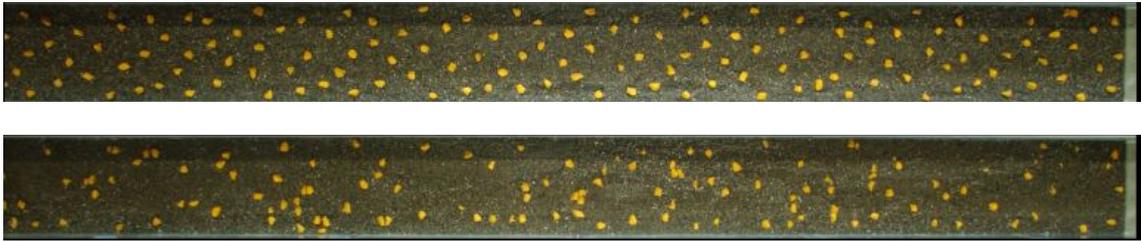


Fig. 6 Modellversuche VAW (Plüer, 2009), Draufsicht Modellgerinne, Massstab 1:20, Makrorauigkeiten (gelbe Blöcke) mit Belegungsdichte 5%, $J_{\text{Sohle}} = \sim 1\%$; Blockgrösse, Untergrundmaterial und Gerinnegeometrie entsprechen den Verhältnissen am Flaz. *Oben:* $Q_{\text{Natur}} = 31 \text{ m}^3/\text{s}$, Blockverteilung entspricht der Ausgangssituation; *Unten:* $Q_{\text{Natur}} = 63 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\sim HQ_2$), deutliche Blockumlagerungen.

Fig. 6 VAW flume experiments (Plüer, 2009), topview, scale 1:20, boulders (yellow blocks) placed with a density of 5%, slope $J_{\text{Sohle}} = \sim 1\%$; block size, bed material and channel geometry according to the conditions at the Flaz River. *Top:* $Q_{\text{Natur}} = 31 \text{ m}^3/\text{s}$, repartition of the blocks corresponds to the initial condition. *Bottom:* $Q_{\text{Natur}} = 63 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\sim HQ_2$), obvious redistribution of the blocks.

SOHLENBEPROBUNGSMETHODEN

Seit 2003 wurden über 170 Sohlenbeprobungen am neuen Flaz entnommen. Dies bietet einerseits eine ungewöhnlich umfassende Grundlage für die Beurteilung und Berechnung des Geschiebetransports. Andererseits macht es die Vielzahl an Beprobungen möglich, verschiedene Beprobungsmethoden miteinander zu vergleichen. Einen Schwerpunkt dieser Untersuchungen bildet die in der Praxis noch nicht angewendete, optimierte Variante der „automatischen Objekterkennung“, bei der mittels digitaler Fotos der Sohle eine Ermittlung der Kornverteilungskurve möglich ist. Um diese Methode zu validieren und zu optimieren standen Volumenproben der Unter- und Deckschicht sowie Linienzahlanalysen zur Verfügung. Die Sohlenbeprobungen wurden sowohl im Gerinne wie auch auf den Geschiebebänken durchgeführt.

Vergleich Volumenproben (VP) – Linienzahlanalyse (LZA)

Mit der guten Datengrundlage soll die im schweizerischen Flussbau etablierte Methode der Linienzahlanalyse nach Fehr (1987) validiert werden. Am Flaz wurden systematisch Linienzahlanalysen und Volumenproben am gleichen Ort und zum gleichen Zeitpunkt durchgeführt, so dass ein direkter Vergleich von Naturdaten möglich ist. Die Ergebnisse von 2004 bis 2010 zeigen auf, dass die aus den Volumenproben ermittelten Kornverteilungskurven mehrheitlich gut mit den aus den Linienzahlanalysen ermittelten Kornverteilungskurven übereinstimmen (Fig. 7, Tab. 2). Die Übereinstimmung wird als gut beurteilt, wenn d_m und d_{90} der Linienzahlanalyse durchschnittlich nicht um mehr als 20% von den entsprechenden Werten der Volumenprobe abweichen.

Die mit wenig technischen Hilfsmitteln durchführbare Beprobungsmethode der Linienzahlanalyse lohnt sich vor allem in kiesführenden Flüssen, in denen eine direkte Beprobung der Unterschicht durch Aussiebung ein grosses Probenvolumen und damit hohe Kosten bedingt. Allerdings erfordert auch das Aufnehmen von Linienzahlanalysen mindestens 20 min. pro Probe (à 2 Personen), so dass die Anzahl aufgenommener Proben häufig auf wenige Proben pro Gewässerabschnitt begrenzt bleiben muss. Daher ist die Wahl eines repräsentativen Standortes von entscheidender Bedeutung, aber auch nicht immer ganz einfach zu gewährleisten. Insofern ist es von grossem Interesse, eine noch effizientere Methode zur Sohlenbeprobung zu entwickeln.

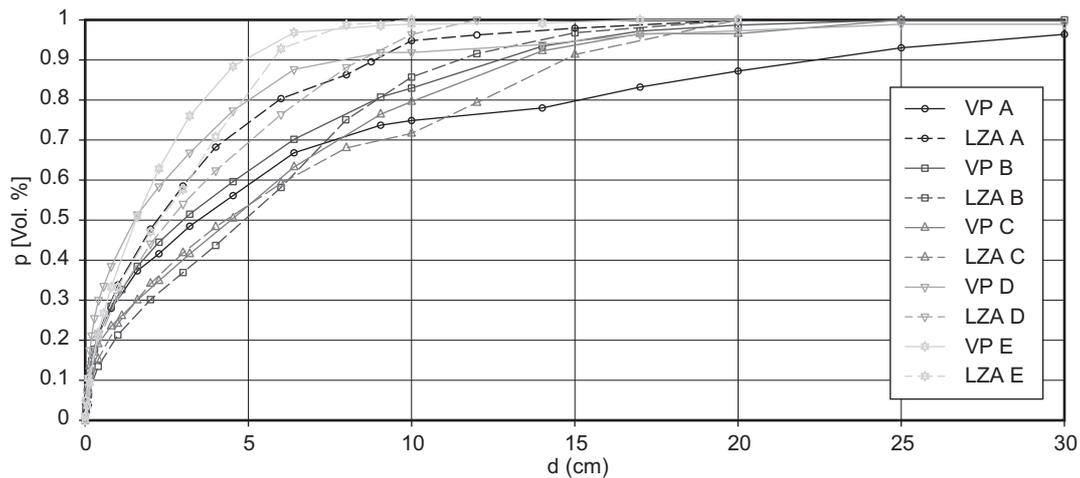


Fig. 7 Vergleich Volumenproben (VP, durchgezogene Linien) und Linienzahlanalysen (LZA, gestrichelte Linien) aus dem Jahr 2007: Jede Markierung entspricht einem Probenpaar mit gleichem Entnahmestandort und -zeitpunkt. Die Linienproben wurden unter Berücksichtigung einer Deckschicht ausgewertet. In 3 von 5 Probenpaaren stimmt die Linienzahlanalyse gut mit der Volumenprobe überein. Vgl. Tab. 2 für d_{90} und d_m .

Fig. 7 Comparison of bulk sieve analyses (VP, continuous line) with line sampling (LZA, broken line) from year 2007: every marker code corresponds to a sampling couple collected at the same time and place. The line sampling were analyzed assuming the presence of a course armoring layer. Here, 3 of the 5 sampling couples show a satisfying correlation between the two sampling methods. See Tab. 2 for d_m and d_{90} .

Tab. 2 Charakteristische Kennwerte d_{90} und d_m der in Fig. 7 dargestellten Volumenproben und Linienzahlanalysen, Daten 2007

Tab. 2 Characteristic values d_{90} and d_m of the bulk sieve analyses (VP) and line samples (LZA) shown in Fig. 7, data 2007

	Volumenproben (VP)		Linienzahlanalyse (LZA)		Übereinstimmung
	d_{90} [cm]	d_m [cm]	d_{90} [cm]	d_m [cm]	
Standort A (Steilstrecke)	22.38	7.31	8.86	3.47	schlecht
Standort B (Makrorau.)	12.69	4.83	11.46	5.39	gut
Standort C (Aufweitung)	13.28	5.73	14.66	6.12	gut
Standort D (Alt. Bänke)	7.88	3.43	8.45	3.51	gut
Standort E (Mündung)	4.88	2.2	5.74	2.68	mässig

Automatische Objekterkennung (AO)

Bei der „automatischen Objekterkennung“ wird die Kornverteilungskurve des Sohlenmaterials aufgrund eines digitalen Fotos der Flusssohle ermittelt. Dieses ermöglicht es, effizienter als mit anderen Methoden zahlreiche Sohlenbeprobungen im Feld durchzuführen, wodurch die Zuverlässigkeit dieser wichtigen Grundlage für die Prognose des Geschiebetriebs und der Morphologie erheblich gesteigert werden kann.

An der VAW wird z. Zt. ein MATLAB-Tool und darauf basierend eine lizenzunabhängige Applikation entwickelt, welches die einfache und in vielen Punkten automatisierte Ermittlung der charakteristischen Kenngrößen einer Flusssohle ermöglicht. Dieses wird mit Daten u. a. aus dem Flaz-Monitoring validiert. Mitte 2012 soll das Tool der Praxis als einfache und zuverlässige Hilfe zur Sohlenbeprobung zur Verfügung stehen.

Das Programm kalibriert den Massstab zunächst halbautomatisch auf einen im Gesamtbild vorgegebenen Abstand (z.B. Meterstab oder Zielkreuze mit bekanntem Abstand). Im Anschluss wird das digitale 2D-Foto in einem frei wählbaren Bildausschnitt mit Hilfe verschiedener Algorithmen der Sohlenoberfläche in verschiedene Flächenelemente, die einzelnen Steinen entsprechen, aufgetrennt. Von jedem Element wird die b-Achse eines quasi flächen-äquivalenten Ellipsoids ermittelt (Fig. 8a, b). Eine Benutzeroberfläche ermöglicht hierbei die Kontrolle und nötigenfalls eine Anpassung der Zerteilung in Elemente. Anschliessend wird die statistische Verteilung der b-Achsen in Anlehnung an Fehr (1987) in eine Kornverteilungskurve des Untergrundmaterials umgerechnet (Fig. 8c) und es werden die charakteristischen Kenngrößen wie d_m , d_{90} , σ ermittelt. Erste Validierungen mit Daten

von Monitoring-Kampagnen an Flaz und Töss (Schweiz) liefern befriedigende Ergebnisse. Faktoren, die im Feld die Aufnahme von Fotos in ausreichender Bildqualität erschweren, sind Schlagschatten, hoher Feinanteilgehalt bzw. Verschlickung, ungleichmässige Benetzung und die Inhomogenität des Steinmaterials.

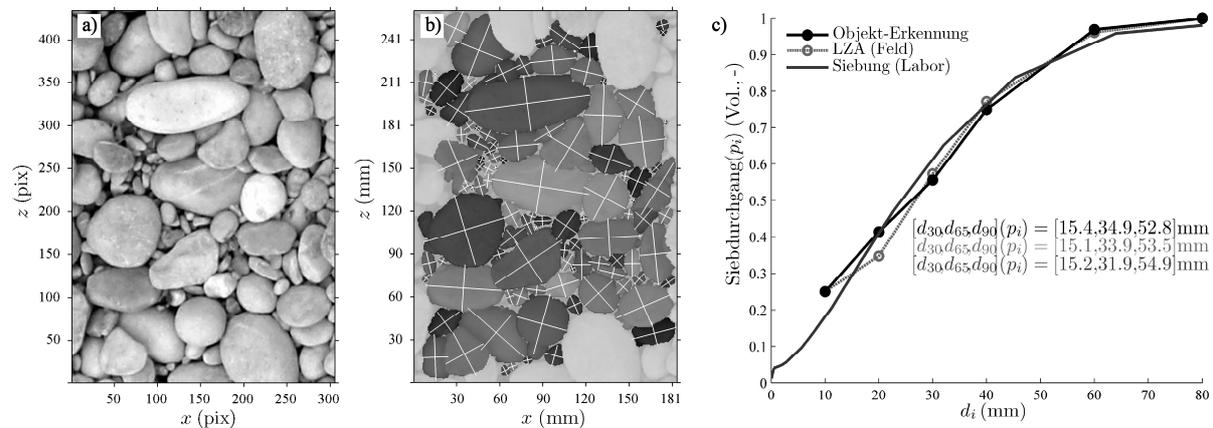


Fig. 8 Beispiel einer Fotoauswertung mittels automatischer Objekterkennung. a) Rohaufnahme einer typischen Kiessohle in der Draufsicht (Bildausschnitt). b) Ergebnis des Objekterkennungsalgorithmus, angewendet auf Fig. 8a. Die jeweilig als ein volles Einzelkorn interpretierten Flächen sind grau abgestuft. Die Hauptachsen der Flächen-Ersatzellipsoide sind in weiss gekennzeichnet. c) Vergleich von Sieblinien aus Objekterkennung, Linienzahlanalyse und Laborsiebung (Volumenprobe), je aus Analyse des Gesamtbildes bzw. der Gesamtprobe.
Fig. 8 Example of an automated object analysis. a) Photograph of a typical gravel river bed in topview (cutout). b) Result of the algorithm applied to Fig. 8a. Each area interpreted as a single grain is color coded in gray steps. The a- and b-axis of an ellipsoid with the same normalized second central moments are indicated in white. c) Comparison of grain size distributions obtained by automated object analysis, line sampling and bulk sieve analysis (each analysis from total sampling area/ volume).

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der neue Flaz stellt ein ungewöhnliches Hochwasserschutzprojekt dar, welches äusserst schnell realisiert wurde und das in der Schweiz etablierte, zeitgemässe Konzept der Restrisikobewältigung in die Praxis umsetzt. Zusätzlich beseitigt es zahlreiche ökologische Defizite, die im fluvialen System rund um Samedan vorhanden waren. Der Erfolg des Projekts in Bezug auf den Hochwasserschutz und die ökologische Aufwertung wird durch die Ergebnisse des Monitorings belegt. Der Erfolg der Nutzung als Freizeitraum ist offensichtlich – das Wegenetz im Bereich der neuen und renaturierten Gewässer erfreut sich bei Spaziergängern und Velofahrern heute grosser Beliebtheit. Die weitere Landschafts- und Gewässerentwicklung wird nun weitestgehend der Natur überlassen, damit sich eine ortstypische und natürliche Landschaft entwickeln kann.

Aus den in diesem Artikel dargestellten praxisrelevanten Ergebnissen des flussbaulichen Monitorings wird deutlich, wie lohnend der grosse Aufwand, der für die Datenerhebung betrieben wurde, gewesen ist. Es konnten wichtige flussbauliche Berechnungsansätze wie die Geschiebeberechnung nach Zarn (1997) und die Linienzahlanalyse nach Fehr (1987) mit Naturdaten validiert werden. Für weitere neue flussbauliche Ansätze liefert der Flaz wertvolle Grundlagendaten (Entwicklung der automatischen Objekterkennung, Berechnungsansätze zu Stabilität und Geschiebetransport in Flussabschnitten mit Makrorauigkeiten). So trägt das ausführliche Monitoring am Flaz dazu bei, die Qualität zukünftiger Hochwasserschutzprojekte zu verbessern und die dafür zur Verfügung stehenden Ressourcen effizienter einzusetzen.

REFERENZEN

- Bischoff A., Pitsch P., Rey P. (2005). Die Flazverlegung und andere Gewässersanierungen im Kanton Graubünden, Wasser, Energie, Luft, Heft 3/4: 80-104.
 BUWAL/BWG (2003). Leitbild Fliessgewässer Schweiz. Für eine nachhaltige Gewässerpoltik. Bern.

- Engler S., Nievergelt T., Epprecht M., Bischoff A. (2004). Engadiner Post, Eine Vision wird Wirklichkeit, Projekt Hochwasserschutz Samedan 2002 bis 2006, Beilage zur Nr. 64, 3. Juni 2004.
- Gemeinde Samedan, Kanton Graubünden (2001). Hochwasserschutz Samedan, Flazverlegung und Renaturierung Inn, Auflageprojekt, unveröffentlicht.
- Gemeinde Samedan, Kanton Graubünden (2001). Umweltverträglichkeitsbericht Hochwasserschutz Samedan, unveröffentlicht.
- Fehr R. (1987). Geschiebeanalyse in Gebirgsflüssen. Mitteilung 92, Herausgeber D. Vischer, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Zürich.
- Meyer-Peter E., Müller R. (1948). Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebs. Schweizerische Bauzeitung Nr. 3.
- Plüer M. (2009). Transportkapazität in Flussabschnitten mit Makrorauigkeiten – experimentelle Untersuchung. Masterarbeit. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, unveröffentlicht.
- Rey P., Grünenfelder J., Pitsch P., Bischoff A. (2007). Hochwasserschutzprojekt Samedan – Aspekte und Effekte der ökologischen Begleitplanung, Wasser, Energie, Luft, Heft 3:199-207.
- Tamagni S., Weitbrecht V., Boes R. (2010). Design of unstructured block ramps: A state-of-art review. River Flow 2010, 729-736.
- Tamagni S., Weitbrecht V., Boes R. (2011). Stability and ecological functionality of unstructured block ramps. EUROMECH Colloquium 523: 135 – 142.
- VAW (2009). Flussbauliches Monitoring Flaz, Schlussbericht Periode 2003 – 2007. VAW-Bericht 4206/2. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, unveröffentlicht.
- Whittaker J. G., Hickman W. E., Croad R. N. (1988). Riverbed stabilization with placed blocks. Report 3-88/3, Hydraulics Section, Central Laboratories Works Corporation, Lower Hutt, New Zealand.
- Wickenhäuser M. (2003). Methoden zur Sohlenaufnahme in Wildbächen. Diplomarbeit, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, unveröffentlicht.
- Zarn B. (1997). Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität. Mitteilung 154, Herausgeber D. Vischer, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Zürich.