

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 97 (2005)  
**Heft:** 3-4

**Artikel:** Hochwasserschutzmassnahmen an der Gamsa mit eingegrabenen Betonprismen  
**Autor:** Meile, Tobias / Schleiss, Anton / Bodenmann, Martin  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-941725>

#### **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:** 22.01.2026

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

# Hochwasserschutzmassnahmen an der Gamsa mit eingegrabenen Betonprismen

Tobias Meile, Anton Schleiss, Martin Bodenmann, Jean-Louis Boillat, Martin Jaeggi

## Zusammenfassung

Die Hochwasser der Jahre 1993 und 2000 haben gezeigt, dass entlang dem Wildbach Gamsa vor der Einmündung in den Rotten für Gamsen und das Industriegebiet, insbesondere die Société Suisse des Explosifs, ein bedeutendes Schutzdefizit besteht. Basierend auf den Ereignisanalysen und den lokalen Gegebenheiten wurde ein Hochwasserschutzprojekt erarbeitet. Die Massnahmen bestehen nebst der Geschiebebewirtschaftung aus in den Uferböschungen eingegrabenen Betonprismen, welche linienförmig oder buhnenartig angeordnet sind und als flexible Schutzbauten wirken. Dieses Verbauungskonzept wurde mittels hydraulischer Modellversuche überprüft. Die erste Etappe der baulichen Massnahmen wurde zwischenzeitlich abgeschlossen. Im vorliegenden Artikel werden Schutzkonzept, Modellversuche und Umsetzung der Massnahmen vorgestellt.

## Résumé

Suite aux événements météorologiques exceptionnels de 1993 et 2000, un déficit de protection contre les crues de la Gamsa a été mis en évidence sur le dernier tronçon avant l'embouchure dans le Rhône. Un projet de protection contre les crues a été conçu sur la base de l'analyse des événements et de la situation locale. Les mesures consistent principalement en des épis enterrés, réalisés à l'aide de demi-cubes en béton. Malgré leur poids important, ces blocs de protection comportent une certaine souplesse en regard des variations du lit. Les mesures d'aménagement ont été vérifiées par des essais sur modèle. La première étape de construction est actuellement achevée. Cet article présente le concept de protection, les essais sur modèle ainsi que la réalisation des mesures.

## Abstract

The important floods in the years 1993 and 2000 revealed a protection deficit along the Gamsa-River in his downstream reach before joining the Upper-Rhone-River. Based on the event analyses and the local conditions a flood protection project was defined. The measures consist of concrete prisms arranged in lines and groynes buried in the ground as well as of a sediment management by two sediment trap areas. This project has been examined with hydraulic model tests. The first part of the measures is built today. The present article presents the protection concept, the main results of the hydraulic tests and also some aspects of the execution of the protection works *in situ*.

## 1. Ausgangslage

Das Bau- und Industriegebiet auf dem Gamsaschlüttkegel der Gemeinde Brig-Glis im Kanton Wallis wurde im Verlaufe der letzten Jahrzehnte wiederholt von Hochwassern heimgesucht. Die letzten beiden grossen, mehrtägigen Hochwasser vom Herbst 1993 und 2000 haben auf diesem Abschnitt der Gamsa ein deutliches Schutzdefizit aufgezeigt. Nur mit massivem Maschinen- und Materialeinsatz konnten in den Jahren 1993 und 2000 grossräumige Seitenerosionen und Überflutungen mit schwer wiegenden Konsequenzen verhindert werden (Bild 1).

Der Kegelbereich mit 10,5% Gefälle

liegt am Ausgang der steilen Schlucht mit einem Gefälle zwischen 16% und 40%. Die Bedrohung durch die Gamsa besteht daher hauptsächlich aus dem intensiven Geschiebeeintrag aus der Schluchtstrecke und der Seitenerosion im Bereich der Anlagen der Société Suisse des Explosifs. Daher umfasst das Hochwasserschutzkonzept für die Gamsa die Bewirtschaftung eines oberen Geschiebeablagernsplatzes, die Beherrschung der Erosionsprozesse entlang der Sprengstofffabrik, die Bewirtschaftung eines unteren Geschiebeablagernsplatzes (Gamsasand) sowie die Neugestaltung der Gamsa im Bereich der Einmündung in den Rotten (Bild 2).

## 2. Einzugsgebiet und Hochwasserhydrologie

Das Einzugsgebiet der Gamsa umfasst rund 39 km<sup>2</sup>. Es verläuft zwischen dem Vispertal und dem Simplon von Süd nach Nord und erstreckt sich von 660 bis 3450 m ü.M. Im oberen Teil des Einzugsgebietes befinden sich Gletscher und Geröllhalden im Gneis. Der mittlere, flache Teil im Nanztal besteht aus Alpweiden, die von Visperterminen her genutzt werden. Der unterste Abschnitt, welcher zu einem grossen Teil bewaldet ist, wird durch eine 30–40% steile, enge Schluchtstrecke gebildet, die sich auf dem Schwemmkessel wieder öffnet. Der Abschnitt vor dem Kegel weist ein Gefälle von 16% auf. Die Kegelsohle selber ist 10,5% steil (Bild 3). Die wichtigsten Eigenschaften des Einzugsgebiets sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Beim Geschiebe der Gamsa handelt es sich hauptsächlich um Geschiebeinträge aus den verschiedenen Seitengräben der steilen Schluchtstrecke, da die Flachstrecke Nanztal den Geschiebetransport beschränkt. Sowohl die bedeutenden Seitengräben der Schluchtstrecke (Südlicher Marchgraben, Stockgräben, Nördlicher Marchgraben, Eschlgraben) als auch die Gamsa selbst sind murgangfähig. Die Prozesse der Geschiebeverlagerung in der Schlucht finden somit, nebst normalem Geschiebetrieb, teilweise als Murgang, teilweise als hochkonzentrierter Abfluss statt.

Im Einzugsgebiet der Gamsa führen über den Alpenhauptkamm greifende Südstaulagen mit mehrtägigen, intensiven Regenfällen bei gleichzeitig hoher Schneefallgrenze zu Hochwassern. Dazu braucht es eine Wetterlage mit einer feuchten und stationären Höhenströmung vom Mittelmeer her. Während der letzten grossen Ereignisse im Jahre 1993 und im Jahre 2000 wurden die Abflüsse der Gamsa auf 50–60 m<sup>3</sup>/s respektive 65–70 m<sup>3</sup>/s geschätzt. Die gemessenen Niederschlagssummen rund um das Einzugsgebiet der Gamsa waren im Jahre 2000 entsprechend höher als im Jahre 1993 (BSAP, 2000). Die Analyse dieser beiden Hochwasserereignisse sowie hydrologische Studien erlaubten die für das Projekt massgebenden Abflussmengen mit den zugehörigen Wiederkehrperioden festzulegen (Tabelle 2).

Gemäss diesen Abflusswerten und den dazugehörigen Wiederkehrperioden lag



**Bild 1. Abklingendes Hochwasser der Gamsa im Oktober 2000. Starke Seitenerosion im Bereich des Chemiedepots der Société Suisse des Explosifs.**

das Hochwasser 2000 näher bei einem 50-jährlichen als bei einem 100-jährlichen Ereignis. Die Abschätzung des Extremhochwassers EHQ ist mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Der geschätzte Wert für das EHQ von  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  scheint hoch, aber denkbar zu sein, insbesondere wenn der spezifische Abflusswert mit jenen benachbarter Einzugsgebiete verglichen wird<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Die hydraulischen Modellversuche zur Optimierung der Schutzbauten wurden mit einer Abflussmenge von  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  (Projekthochwasser) durchgeführt, welche einer Wiederkehrperiode von rund 300 Jahren entspricht. Zum Abschätzen des Restrisikos wurde jedoch auch ein Versuch mit Abflussmengen grösser als  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  durchgeführt.

### 3. Schutzziele

Basierend auf den Empfehlungen des Bundes (BWG, 2001) wurden im Hochwasserschutzkonzept der Stadtgemeinde Brig-Glis die Schutzziele für die im Gefahrenbereich lie-

genden Objekte festgelegt. Wegen des grossen Gefahrenpotenzials müssen im Bereich der Société Suisse des Explosifs (SSE) unkontrollierte Seitenerosionen auch für das Extremhochwasser verhindert werden. Daselbe Schutzziel gilt auch für die Nationalstrasse. Für die anderen Objekte (Kantonsstrasse, Bahnen, Inertstoffdeponie, Industriezone, Kehrichtverbrennungsanlage, Dorf Gamsen) entspricht das Schutzziel dem hundertjährlichen Hochwasser (Bild 2). Faktisch ist aber durch den Schutz der Société Suisse des Explosifs das Dorf Gamsen gleichermassen geschützt.

### 4. Schutzkonzept und Massnahmen

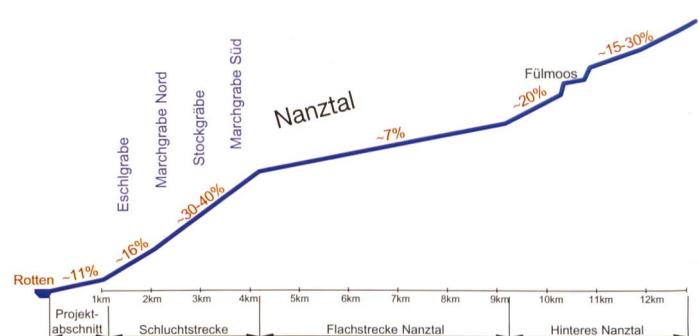
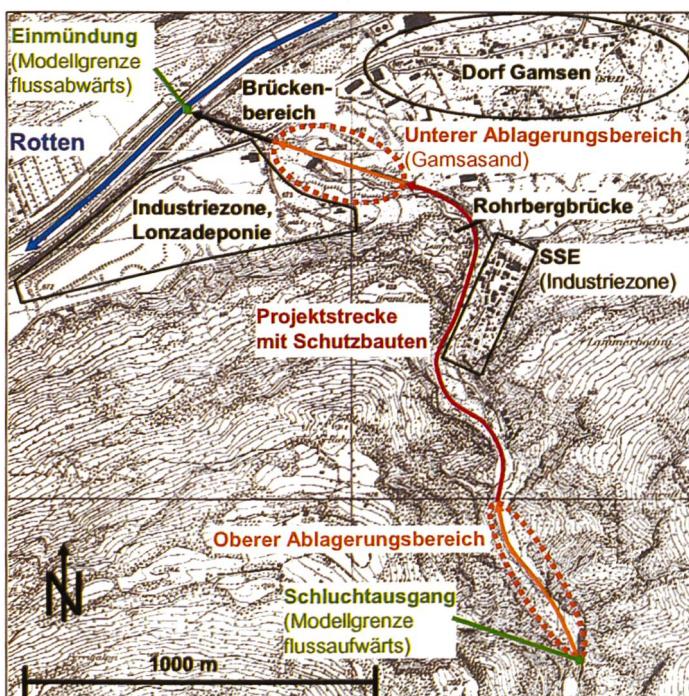
Das Schutzkonzept der Gamsa beinhaltet die Schaffung und Bewirtschaftung von zwei Geschiebeablagerungsplätzen sowie die Realisierung von Schutzbauten aus Betonprismen, welche im Gelände eingegraben sind und nur ab einem mittleren Hochwasser freigelegt werden. Die Sohle der Gamsa wird le-

diglich in einem steilen Abschnitt (18%) mit Hilfe einer Blockrampe, bestehend aus Betonprismen, gesichert. Ansonsten bleibt die Sohle der Gamsa unverbaut.

#### 4.1 Geschiebeablagerungsplätze

Wegen der grossen Geschiebetransportkapazität der Schluchtstrecke und der bedeutenden Seitengräben hängt die Hochwassersicherheit der Gamsa stark von der Geschiebebewirtschaftung ab. Gemäss Hochwasserschutzkonzept ist vom Schluchtausgang bis zur Einmündung in den Rotten ein oberer (Kapazität ca.  $150\,000 \text{ m}^3$ ) und ein unterer Geschiebeablagerungsplatz (Kapazität ca.  $250\,000 \text{ m}^3$ ) vorgesehen (Bild 2). Der obere Geschiebeablagerungsplatz soll in Zukunft so bewirtschaftet werden, dass er bei Abflüssen mit gesättigtem oder ungesättigtem Geschiebetrieb aus der Schluchtstrecke als Pufferzone wirken kann. Dazu muss er eine ähnliche Neigung besitzen wie die anschliessende Projektstrecke. Der untere Geschiebesammler muss gemäss einer jährlichen Beurteilung bewirtschaftet (entleert) werden. Entlang der Projektstrecke soll das Geschiebe durchtransportiert werden, um Auflandungen und damit verbundene Ausuferungen zu vermeiden.

Während des Hochwassers 2000 wurden zum Beispiel rund  $160\,000 \text{ m}^3$  aus der Schluchtstrecke in den Projektabschnitt eingetragen. Davon blieben  $30\,000 \text{ m}^3$  im oberen Geschiebeablagerungsplatz liegen. Entlang der Projektstrecke wurden insgesamt  $20\,000 \text{ m}^3$  erodiert. Schliesslich wurden  $150\,000 \text{ m}^3$  im unteren Geschiebeablagerungsplatz abgelagert (BSAP, 2000). Der Geschiebeeintrag in den Rotten war unbedeutend.



**Bild 3 (oben). Schematisches Längenprofil durch das Einzugsgebiet der Gamsa.**

**Bild 2 (links). Schematische Darstellung der Gamsa im Unterlauf vom Schluchtausgang (obere Modellgrenze) bis zur Rotteneinmündung (untere Modellgrenze).**

## 4.2 Schutzbauten

Massgebender Prozess entlang der Gamsa im Bereich der Fabrikanlagen der SSE (Projektbereich) ist die Seitenerosion, welche ihrerseits stark vom Erosions- oder Auflandungsverhalten der Gamsa abhängt. Die Hochwasserschutzmassnahmen müssen diesen Seitenerosionen und den zu erwartenden grossen Sohlenschwankungen standhalten. Gefragt sind deshalb flexible Uferschutzmassnahmen, welche sich den Sohlenschwankungen, insbesondere den allfälligen Erosionen anpassen können. Die Uferschutzmassnahmen müssen zudem eine hohe Rauigkeit aufweisen, welche die Fließgeschwindigkeiten entlang dem Ufer reduziert und so die Unterkolkung der Schutzelemente erheblich verringern kann. In Anbetracht der grossen Abflussgeschwindigkeiten und Erosionskräfte können die Seitenerosionen nur mit massiven, aber dennoch flexiblen Schutzmassnahmen beherrscht werden. In Anlehnung an die im Kanton Uri für ähnliche Verhältnisse an der Reuss in Gurtnellen und Göschenen gemachten Erfahrungen kann dies mit im Gelände eingegrabenen Betonprismen erfolgen, welche verschieden angeordnet werden können (Schleiss & al., 1992, 1996, 1998).

Parameter	Einheit	Grösse
Fläche	km <sup>2</sup>	38,5
Umfang	km	32,3
Mittlere Meereshöhe	m ü.M.	2246
Höchster Punkt	m ü.M.	3450
Mittlere Hangneigung	Grad (%)	23,3 (43)
Vergletscherte Fläche	%	2,8
Geröllhalden, Fels	%	12,8
Lockergesteinsböden	%	62,2
Wald	%	22,2
Versiegelte Fläche	%	≈ 0

**Tabelle 1. Eigenschaften des Einzugsgebietes der Gamsa (Rebord, 1994).**

Bezeichnung	Abflussmenge	Spezifischer Abfluss
HQ <sub>30</sub>	40 m <sup>3</sup> /s	1,1 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup>
HQ <sub>100</sub>	90 m <sup>3</sup> /s	2,4 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup>
HQ <sub>300</sub>	150 m <sup>3</sup> /s	3,9 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup>
EHQ	200 m <sup>3</sup> /s	5,2 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup>

**Tabelle 2. Wiederkehrperioden, Abflussmengen und spezifische Abflüsse der Gamsa (ARGE SBWZ – Martin Jäggi, 2001).**

Für die Gamsa wurden Betonprismen aus diagonal halbierten Betonwürfeln mit einer Kantenlänge von 2,8 m gebildet, was ein Gewicht von rund 27 t pro Halbwürfel ergibt (Bild 11). Die erforderliche Grösse der Halbwürfel wurde basierend auf den Resultaten der Modellversuche im Kt. Uri (Gurtnellen und Göschenen) unter Ähnlichkeit der Schleppkräfte und unter Anwendung von Blockmodellen abgeschätzt (Tabelle 3).

Die Anordnung und Anzahl der buhnenförmigen und linienförmigen Schutzelemente (Bild 4) zur Beschränkung der Seitenerosion erfolgte aufgrund einer detaillierten Analyse der lokalen Gegebenheiten. Da die Gamsa nach dem Austritt aus der Schlucht linksufrig grösstenteils entlang der Schluchtwand (Bündner Schiefer) verläuft und auf dieser Seite nur ein Trinkwasserreservoir der Gemeinde Brig-Glis geschützt werden muss, beschränken sich die buhnenförmigen Schutzelemente auf die rechte Flussseite, wo sich die Industrieanlagen der Société Suisse des Explosifs (SSE) befinden (Bilder 1 und 2).

Die Sohle der Gamsa wird nur an zwei Stellen durch Querbauwerke fixiert. Am Ende des oberen Geschiebeablagerungsplatzes kommt eine neue Wasserfassung zu liegen, eine Schwelle trennt die Projektstrecke vom unteren Geschiebeablagerungsplatz. Entlang der ganzen Projektstrecke bleibt die Sohle der Gamsa, mit Ausnahme eines heute abrupten Sohlenabsturzes, unverbaut. Dieser wird zukünftig mit einer kontinuierlichen Blockrampe überwunden (Bild 11, rechts), welche mit denselben Betonprismen realisiert wird. Die Funktionsweise der Blöcke in der Rampe ist im Hochwasserfall vergleichbar mit jener von Residualblöcken in Wildbächen.

Da sowohl die Bauwerke zur Einschränkung der Seitenerosion als auch jene zur Stabilisierung der Sohle nicht starr sind, können sie sich einer eventuellen Sohlenerosion anpassen. Sie verhalten sich bei Extremereignissen gutmütig (Minor, 2004), was heisst, dass ein plötzliches Versagen unwahrscheinlich ist.

Im Sinne von sekundären Notfallmassnahmen sind im Bereich der SSE Dammbalken und Mauern zur Rückleitung des Wassers hin zur Gamsa vorgesehen, sofern es zu Ausuferungen kommen sollte.

## 5. Hydraulische Modellversuche

### 5.1 Zielsetzung

Hauptziel der hydraulischen Modellversuche war die Überprüfung der Funktionsweise der geplanten Erosionsschutzmassnahmen, bestehend aus Betonprismen (LCH, 2003). Dabei wurden Anzahl und Anordnung der Halbwürfel zum Erreichen der Schutzziele optimiert. Parallel dazu wurden die Grundlagen für die Geschiebebewirtschaftung erarbeitet. Aufgrund der komplexen dreidimensionalen Phänomene bezüglich der vorherrschenden Abfluss- und Geschiebeverhältnisse musste ein Modell mit beweglicher Sohle im Massstab 1:35 gewählt werden. Dies erlaubte die realitätsnahe Wiedergabe der physikalischen Phänomene während eines Hochwassers.

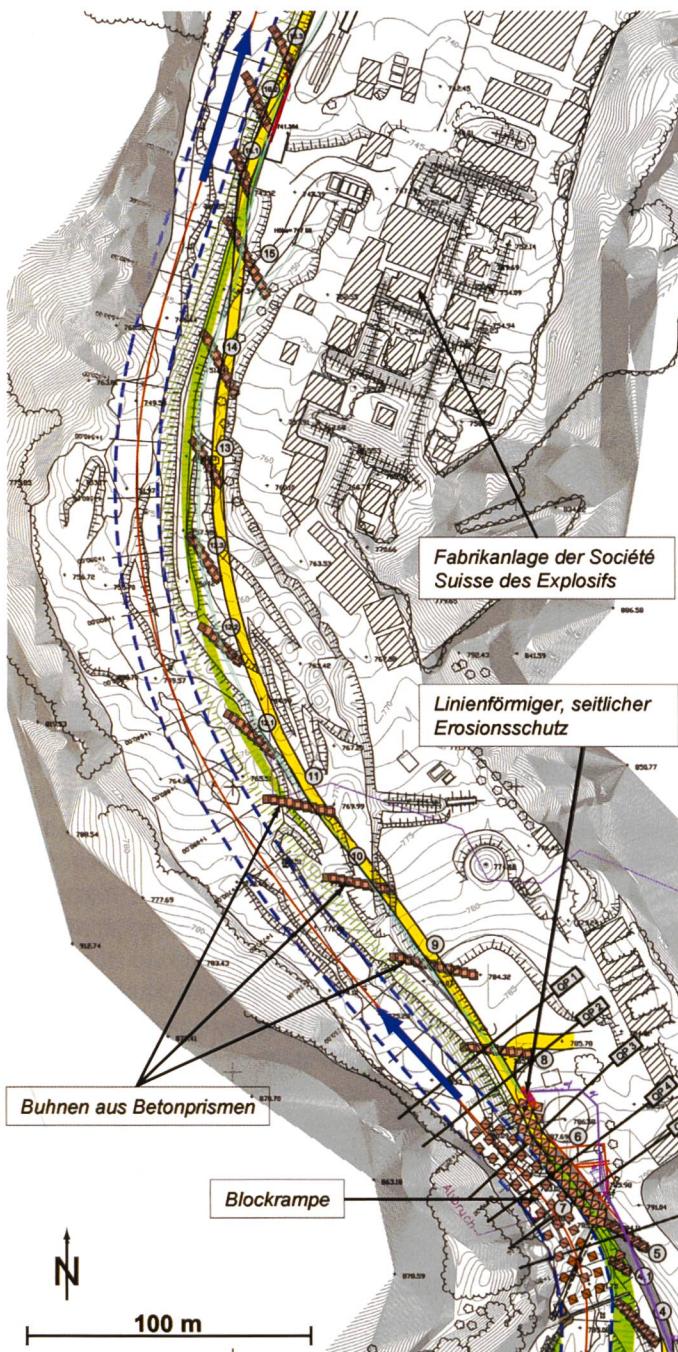
### 5.2 Modellbau, Randbedingungen und Messungen

Das physikalische Modell (Bild 5) wurde aus Platzgründen unter freiem Himmel vor Ort im Massstab 1:35 realisiert. Der im Modell untersuchte Bereich erstreckt sich vom Schluchtausgang (obere Randbedingung, Abflussganglinie gegeben) bis zur Einmündung der Gamsa in den Rotten (untere Randbedingung, Rottenenergienniveau gegeben), was einem Flussabschnitt von rund 2300 m entspricht (Bild 2). Die Breite des untersuchten Bereichs wurde den lokalen Gegebenheiten angepasst und betrug maximal 200 m im unteren Geschiebeablagerungsplatz. Mit der Einlaufstrecke für die Geschiebezufuhr ergeben sich eine Modelllänge von 70 m und eine maximale Breite von 6 m.

Das Modell wurde auf zwei Arten mit Geschiebe beschickt. Entweder wurde so viel Material zugegeben, damit die Sohle im Einlaufbereich im Gleichgewicht gehalten werden konnte, oder aber es wurden gemäss der Formel von Smart & Jäggi (1983) abgeschätzte Geschiebemengen entsprechend der Transportkapazität der Gamsa beigefügt.

Das Modell wurde in drei Etappen erstellt. Zuerst wurde eine starre und dichte Schale aus leicht armiertem Beton erstellt. Anschliessend wurden die Felsbereiche mit Mörtel nachgebildet. Zum Schluss wurde die bewegliche Sohle mit einer Kiesmischung eingebaut, deren Korngrössenverteilung für die naturgetreue Nachbildung der Erosions- und Ablagerungsprozesse in den Versuchen massgebend ist. Die vor den Modellversuchen genommenen Linienproben haben sich zur Bestimmung einer gewünschten Modellgranulometrie bewährt (Fehr, 1987).

Während der Versuche wurden die Wasserspiegel mit Ultraschallsonden und die Zuflussmenge mit einem elektromagneti-



**Bild 4. Ausschnitt aus dem Übersichtsplan der optimierten Schutzbauten.**

schen Durchflussmesser erfasst. Die Topografie wurde jeweils vor und nach den Versuchen vermessen, um die Ablagerungs- und Erosionszonen (Bild 7) sowie die eingetragenen, transportierten, abgelagerten und ausgetragenen Geschiebemengen zu bestimmen (Bild 9).

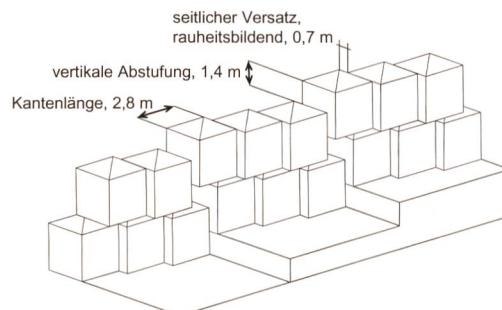
### 5.3 Versuchsprogramm

Für die Überprüfung und Optimierung der Massnahmen wurden insgesamt acht Modellversuche durchgeführt (Tabelle 4). Die Versuche unterschieden sich durch die maximale Abflussmenge, die Versuchsdauer, die Anzahl und Anordnung der Schutzbauten sowie die Art und Menge der Geschiebezugabe.

Versuch 1 diente der Eichung des Modells, indem das Hochwasser 2000 nachgebildet wurde. Ausgangslage für den Versuch 2 waren die Schutzmassnahmen gemäß Projektvorschlag. Zwischen den einzelnen Versuchen wurden immer wieder Änderungen an den Schutzmassnahmen (Bild 7; links) vorgenommen. In einer ersten Phase der Versuche musste die Halbwürfenzahl zum Erreichen der Schutzziele erhöht werden. In der zweiten Phase konnte die Halbwürfenzahl im Rahmen der Optimierung der Schutzbauwerke wiederum reduziert werden. Im Anschluss an Versuch 8 wurden aufgrund aller Beobachtungen die optimierten Schutzbauten für das definitive Gesamtprojekt festgelegt.



**Bild 5. Hydraulisches Modell der Société Suisse des Explosifs mit Blickrichtung flussaufwärts.**



**Bild 6. Schematische Darstellung einer vertikal abgestuften Buhne, 3D.**

Nr.	Beschreibung	$Q_{\max}$	Dauer	Zweck	Geschiebezugabe
1	Nachbildung Hochwasser 2000 ohne Schutzbauten	65 m <sup>3</sup> /s	30,9 h	Eichung des Modells	Mengen gemäß Hochwasser 2000
2	Hochwasser 2000 mit SB (983 Halbwürfel)	65 m <sup>3</sup> /s	20,5 h	Vergleich mit Versuch 1	Gleichgewicht der Sohlenlage bei Geschiebezugabe
3	Hundertjährliches Hochwasser mit SB (1106 Halbwürfel)	100 m <sup>3</sup> /s	22,6 h	Optimierung	Gleichgewicht der Sohlenlage bei Geschiebezugabe
4	Hundertjährliches Hochwasser mit SB (1078 Halbwürfel)	100 m <sup>3</sup> /s	24,1 h	Optimierung	Gleichgewicht der Sohlenlage bei Geschiebezugabe
5	Projekthochwasser mit SB (1116 Halbwürfel)	150 m <sup>3</sup> /s	24,6 h	Optimierung	Gerechnete Transportkapazität für 10,5% Sohleneigung
6	Projekthochwasser mit SB (1099 Halbwürfel)	150 m <sup>3</sup> /s	24,1 h	Überprüfung	Gerechnete Transportkapazität für 10,5% Sohleneigung
7	Projekthochwasser mit SB (1040 Halbwürfel)	165 m <sup>3</sup> /s	23,1 h	Optimierung, Überprüfung	Gerechnete Transportkapazität für 10,5% Sohleneigung
8	Überlastversuch (1026 Halbwürfel)	250 m <sup>3</sup> /s	5,5 h	Hydraulische Belastbarkeit	Gerechnete Transportkapazität für 10,5%, 16% und Murgang

**Tabelle 4. Übersicht über die durchgeföhrten Versuche; SB = Schutzbauten.**

### 5.4 Verhalten der Schutzbauten

Die Effizienz des Verbauungskonzeptes, bestehend aus buhlen- und linienvormig angeordneten Schutzbauten aus halbierten Betonwürfeln, konnte mit den Modellversuchen bestätigt werden. Zum Erreichen der Schutzziele entlang dem ganzen Projektabschnitt waren aber einige Änderungen in der Anordnung der Schutzbauten notwendig. Im ursprünglichen Projekt waren insgesamt 983 Halbwürfel vorgesehen, im aufgrund der Modellversuche optimierten Ausführungsprojekt müssen maximal 1026 Halbwürfel eingesetzt werden. Die Zuverlässigkeit der Schutzbauten konnte entlang der Strecke durch die Modellversuche homogenisiert und Schwachstellen konnten beseitigt werden.

Die im Gelände eingegrabenen Buhnen werden bei Hochwasser sukzessive freigelegt. Zwischen den Buhnen formen sich im Hochwasserfall Buchten aus. Solange die Buhnen nicht überströmt werden (bis ca. 100–150 m<sup>3</sup>/s je nach Sohlenlage), lenken diese den Abfluss vollständig zur Gewässermitte zurück. Die Würfel sind durch das dahinter liegende Terrain gestützt und die Buhnen bleiben mehrheitlich intakt. Nimmt der Abfluss weiter zu, kann die Buhne überströmt werden, was zur Erosion des dahinter liegenden Terrains führt und somit die Buchten zwischen den Buhnen vergrößert. Dadurch können die Betonprismen bei gleichzeitiger Unterkolkung am Buhnenkopf weggekippt werden, und es stellt sich betreffend Gewässerbreite und Abfluss wiederum ein hydraulisches Gleichgewicht ein. Die flexibel funktionierenden Schutzbauten sind somit eine angebrachte Lösung, um die Seitenerosionen einzuschränken, aber gleichzeitig dem Gewässer eine gewisse Dynamik zu gewährleisten, welche für die Bewältigung der Hochwasser (insbesondere von extremen Ereignissen) wichtig ist. Die beschriebene Funktionsweise ist nur garantiert, falls die Buhnen nicht gleichzeitig auf der ganzen Länge überströmt werden können. Dazu wurden sie vertikal deutlich abgestuft (Bild 6). Sofern der Hochwasserabfluss während eines Ereignisses 150 m<sup>3</sup>/s nicht übersteigt, sind nach dem Ereignis an den Schutzbauwerken höchstens einzelne Würfel zu ergänzen (Bild 7; rechts).

Die Modellversuche und insbesondere der Versuch 8 (Überlastversuch) erlaubten, die kritischen Stellen entlang der Projekt-



**Bild 7. Einbau der Blockbuhnen im Modell (links); freigespülte Schutzbauten im Versuch 8 für 150 m<sup>3</sup>/s (rechts).**

strecke zu identifizieren respektive zu bestätigen sowie das Restrisiko abzuschätzen. Die am stärksten beanspruchten Bereiche sind die zwei ausgeprägten Linkskurven der Gamsa bergwärts der Fabrikanlagen der SSE und im Bereich der Rohrbergbrücke. In diesen Abschnitten ist im Hochwasserfall auch am ehesten mit Interventionen zu rechnen.

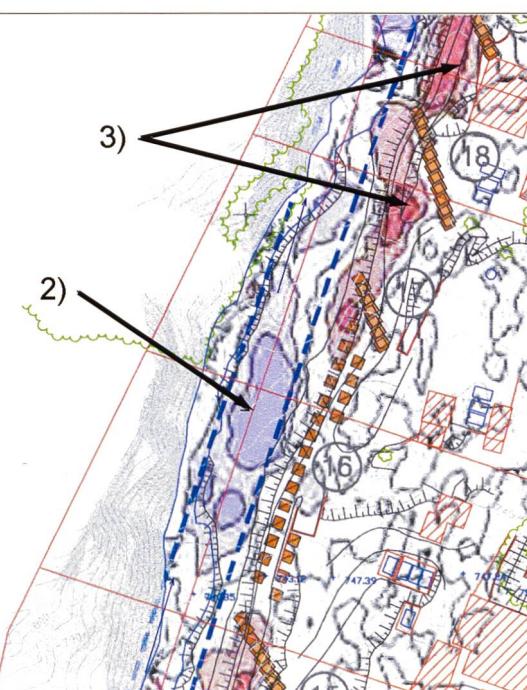
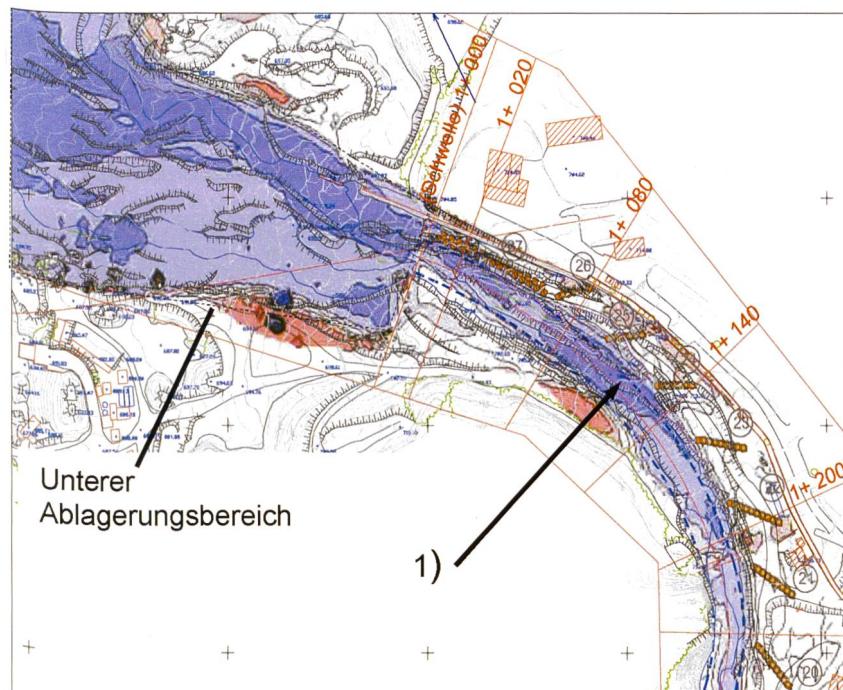
### 5.5 Erosions-, Ablagerungs- und Geschiebetransportprozesse

Die Modellversuche zeigten deutlich, dass nicht nur die Belastung der Schutzbauten durch Erosionsprozesse, sondern auch sämtliche Phänomene im Zusammenhang mit dem Geschiebetransport und der Geschiebebewirtschaftung zum Erreichen der erforderlichen Schutzziele bedeutend sind. Die Gefährlichkeit eines Hochwassers ist

gegeben durch Maximalabfluss, Ganglinie (Dauer) und Geschiebetransportverhältnisse. Probleme traten insbesondere dann auf, wenn Auflandungsprozesse zu seitlichen Wasseraustritten und somit zu einer zusätzlichen Reduktion der Geschiebetransportkapazität führten.

In der Gamsa konnten drei verschiedene Arten von vertikalen Erosions- respektive Ablagerungsprozessen beobachtet werden (Bild 8):

- 1) allgemeine Sohlenhebung/Sohlensenkung (z.B. Sohlenhebung vom unteren Ablagerungsbereich her)
- 2) lokale Gerinneauflandung/-eintiefung mit Anhebung/Absenkung der mittleren Sohlenlage (z.B. beim Chemiedepot durch die Gerinneaufweitung; leichter Kolk unterhalb der Blockrampe)
- 3) lokale Erosion ohne Einfluss auf die mittlere Sohlenlage – blau: Auflandung, rot: Erosion, orange: Schutzbauten; rot schraffiert: Gebäude.



**Bild 8. 1) Allgemeine Sohlenhebung, 2) lokale Gerinneauflandung mit Anhebung der mittleren Sohlenlage, 3) lokale Erosion ohne Einfluss auf die mittlere Sohlenlage – blau: Auflandung, rot: Erosion, orange: Schutzbauten; rot schraffiert: Gebäude.**

3) lokale Auflandung/Eintiefung ohne Anhebung/Absenkung der mittleren Sohlenlage (z.B. Kurvenkolk, Erosionen zwischen den Buhnen und an den Buhnenköpfen).

Während der Versuche konnte zudem eine für steile Gebirgsbäche typische Sohlenform beobachtet werden. Es handelt sich um so genannte Steilbereichsdünen («Dunes à forte pente» gemäss Koulinski, 1993), die in der Gamsa bei einem Abfluss von rund  $35 \text{ m}^3/\text{s}$  entstehen und bei abklingendem Hochwasser wieder verschwinden. Sowohl während des Hochwassers 2000 als auch in den Modellversuchen (LCH, 2003) wurden Steilbereichsdünen beobachtet, deren Intensität örtlich und zeitlich variiert. Die damit verbundenen Sohlenschwankungen erreichen mit 3–4 m rund das Doppelte der Abflusstiefe (Bild 9). Diese Sohlenschwankungen müssen für die Auslegung und die Dimensionierung der Hochwasserschutzmassnahmen berücksichtigt werden. Ausuferungen sind im Modell dann aufgetreten, wenn bei starkem Geschiebetrieb die Sohlenschwankungen vom Typ «Steilbereichsdünen» sich einer generellen Auflandungstendenz überlagert haben. Wie ausgeprägt und regelmässig sich

die Steilbereichsdünen entwickeln, hängt von Abfluss, Geschiebeintrag und Gewässermorphologie ab. An Stellen, wo Steilbereichsdünen beobachtet wurden, betrug ihre Durchgangsfrequenz in der Natur rund 30 min (Zeitabstand zwischen zwei maximalen bzw. minimalen Sohlenlagen).

Die für die Bildung von Steilbereichsdünen massgebenden Parameter (Abfluss, Gewässergeomtrie, Geschiebetriebsverhältnisse, Kornverteilung) sind bis heute wenig untersucht worden. Die in Tabelle 5 dargestellten Faktoren scheinen sich fördernd respektive hemmend auf die Existenz und das Ausmass der Steilbereichsdünen auszuwirken (Koulinski, 1993; LCH, 2003).

### 5.6 Topografische Vermessung

Die topografische Vermessung des Modells mit Laser vor und nach den Versuchen ermöglichte die Bestimmung der Erosions- und Ablagerungszonen sowie der Geschiebebilanzen in den verschiedenen Abschnitten entlang dem Modell.

Es hat sich gezeigt, dass der obere Ablagerungsbereich als Puffer wirkt, insbesondere im Versuch 8 mit zeitweise intensivem

Geschiebeeintrag aus der Schluchtstrecke (Tabelle 4) sowie in den Versuchen 2 und 3 (Bild 10). Für nicht gesättigte Abflüsse hat sich der obere Ablagerungsbereich teilweise eingetieft respektive bei abklingendem Hochwasser wieder entleert. Entlang der Projektstrecke wurde insgesamt mehr Material abgelagert als erodiert, weil der unterste Abschnitt der Projektstrecke als Folge des Ablagerungskörpers im Gamsasand auflandete (Bild 8). Praktisch die gesamte Geschiebemenge wurde im Gamsasand abgelagert. Nur ein Bruchteil des Materials gelangte bis in den Rotten. Die in den Rotten eingetragene Menge hängt von der Wasserfracht des Ereignisses sowie vom vorhandenen Fassungsvermögen des unteren Geschiebeablagernsplatzes vor einem Ereignis ab. Ist dieser geleert, beträgt das in den Rotten eingetragene Geschiebevolumen 0,25% der Wasserfracht, ist der untere Sammler voll, sind es 0,55%. Entlang dem Modell wurde eine deutliche Sortierung des Geschiebes beobachtet. So betrug zum Beispiel im oberen Ablagerungsplatz  $d_{90} = 85 \text{ cm}$ , bergwärts des Gamsasands (unterer Ablagerungsplatz)  $d_{90} = 65 \text{ cm}$ , in der Mitte des Gamsasands

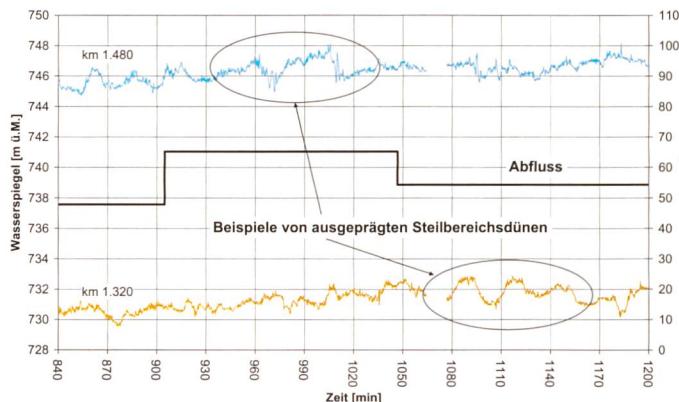


Bild 9. Steilbereichsdünen, illustriert an der Messung des Wasserspiegels zweier Ultraschallsonden.

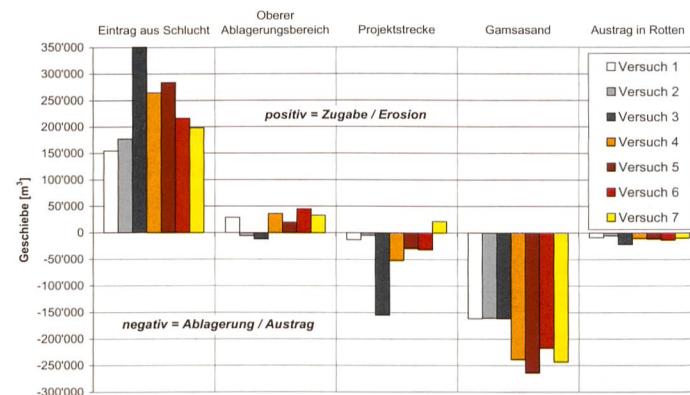


Bild 10. In die verschiedenen Projektabschnitte eingetragene, erodierte, abgelagerte und ausgetragene Geschiebemenge für die Versuche 1 bis 7 (Charakteristiken gemäss Tabelle 4).



Bild 11. Links: Bau der Buhne vor dem Chemietank. Im Vordergrund eine platzierte, aber noch nicht ausbetonierte Hülle. Die Prismen sind rauheitsbildend seitlich versetzt. Rechts: Bau der Blockrampe unterhalb der bestehenden Fassung. Betonwürfel werden im Bachbett versetzt und anschliessend überdeckt.



$d_{90} = 45$  cm und für den Geschiebeeintrag in den Rotten  $d_{90} = 15$  cm.

Für ein Hochwasser mit einer Abfluss spitze von  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  werden rund 220 000 bis  $260 000 \text{ m}^3$  Geschiebe in den unteren Ablagerungsbereich Gamsasand transportiert. Für ein Hochwasser von  $65 \text{ m}^3/\text{s}$  sind es 160 000 bis  $170 000 \text{ m}^3$ . Bei einem Ereignis von  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  dürfte der Wert je nach Eintrag aus der Schluchtstrecke und Füllungsgrad des oberen Ablagerungsbereiches zwischen 180 000 und max.  $240 000 \text{ m}^3$  liegen (Bild 10). Die einge tragenen, erodierten und abgelagerten Volumen hängen natürlich ebenfalls stark von der Ereignisdauer<sup>2</sup> und der zeitlichen Sättigung des Abflusses ab. Da in den Modellver suchen verschiedene Geschiebeszenarien untersucht wurden, darf das vorhandene Volumen der Geschiebeablagerungsplätze als ausreichend betrachtet werden.

<sup>2</sup> Die in den Versuchen getesteten Ereignisdauern waren mit Ausnahme von Versuch 1 und 8 für die verschiedenen Abflussspitzen vergleichbar (Tabelle 4).

## 6. Realisierung erste Bauetappe und Herbsthochwasser 2004

Die Schutzbauten wurden im Herbst 2002 durch die Gemeinde Brig-Glis in fünf Baulos ausgeschrieben. Die Ausschreibung erlaubte grundsätzlich zwei Varianten für die Würfelherstellung: die Betonierung vor Ort oder die Vorfabrizierung einer Betonaussen schale im Werk und Betonauffüllung vor Ort.

Der Unternehmer wählte für das erste Baulos von 332 Betonhalbwürfeln aufgrund der guten Zugänglichkeit die zweite Variante. Die drei Seitenwände (PC300) des Halbwürfels wurden im Werk betoniert und mit einem Tieflader auf die Baustelle transportiert. Dort wurden diese vorfabrizierte Hülle ( $d = 10 \text{ cm}$ ) versetzt, der Boden und die Decke ausarmiert und anschliessend der Halbwürfel mit Beton (PC250) aufgefüllt und vibriert (Bild 11, links).

Die Arbeiten des vordringlichen Bau loses 1 inklusive der Blockrampe im Bachbett wurden zwischen Sommer und Herbst 2003 ausgeführt. Die Arbeiten wurden dabei durch die geringe Wasserführung der Gamsa im

Sommer 2003 erheblich erleichtert (Bild 11, rechts).

Im Herbst 2004 (Starkniederschläge vom 2. November 2004) trat in der Gamsa erstmals seit der Realisierung der dringlichen Massnahmen ein kleineres Hochwasser von  $18-20 \text{ m}^3/\text{s}$  mit mässigem Geschiebetrieb auf. Die abgeplästerte Sohle der Gamsa entlang der SSE wurde nicht aufgerissen. Im unteren Ablagerungsbereich kam es jedoch zu Erosionen des im Jahre 2000 abgelagerten, feineren Materials. Die seitlichen Schutzbauten wurden nicht belastet. Im Bereich der Blockrampe wurde die Oberseite der Halbwürfel teils freigespült, ohne dass diese jedoch bewegt wurden. Durch transportierte Steinblöcke wurden einige Würfelkanten wie zu erwarten leicht abgerundet. Durch geschicktes Platzieren der Halbwürfel im Schutz von grösseren Blöcken können die Kanten bei kleineren Hochwassern geschützt und die Dauerhaftigkeit der Schutzbauten noch erhöht werden.

## 7. Schlussfolgerungen

Die Hochwassereignisse der Jahre 1993 und 2000 haben an der Gamsa im Bereich der Société Suisse des Explosifs zu kritischen Situationen geführt. Das aufgrund der Ereignisanalysen erarbeitete Hochwasserschutz projekt wurde durch die Modellversuche überprüft, grundsätzlich bestätigt und optimiert. Die Schutzmassnahmen beinhalten, nebst der Bewirtschaftung eines oberen ( $150 000 \text{ m}^3$ ) und unteren ( $250 000 \text{ m}^3$ ) Geschiebeablagerungsplatzes, den Bau von im Gelände eingegrabenen Schutzbauten aus Betonprismen (halbe Würfel mit  $2,8 \text{ m}$  Kan tenlänge,  $27 \text{ t}$ ). Es handelt sich um linienförmige und hauptsächlich buhnenartige Elemente, welche ab einem mittleren Hochwasser (ca.  $40-50 \text{ m}^3/\text{s}$ ) freigespült werden. Die Modellversuche haben für dieses und ähnliche Projekte folgende wichtige Erkenntnisse gebracht:

- Da die Buhnen (Bild 7, rechts und Bild 11) aus massiven, aber trotzdem flexiblen Elementen gebaut sind, können sie sich der Sohlenerosion anpassen. Bei einem grossen Hochwasser werden die Buhnen

zuerst an-, dann überströmt und schliesslich am Buhnenkopf sukzessive erodiert. Dadurch vergrössert sich die Gewässer breite, ohne dass es aber zu unkontrollierten Seitenerosionen kommt. Die so gewonnene Gewässerdynamik ist für die Bewältigung von Extremereignissen von Bedeutung. Damit diese Funktionsweise gewährleistet ist, wurden die Buhnen im Fall der Gamsa zwischen  $30^\circ$  und  $45^\circ$  bezüglich der «theoretischen Gewässer achse» geneigt. Zudem müssen die Buhnen wenn immer möglich vertikal gegen das Gerinne abgestuft sein, was ein gleichzeitiges Überströmen auf ihrer ganzen Länge verhindert.

- Der steilste Abschnitt kann im Sinne einer Blockrampe mit in der Sohle eingegrabenen Halbwürfeln effizient gegen Tiefenerosionen gesichert werden. Um das vorzeitige Abschlagen der Würfelkanten durch transportierte Gesteinsbrocken bei kleineren Hochwassern zu vermeiden, sollten flussabwärts der Würfelemente grosse Blöcke vorhanden sein, welche die Würfeloberkante leicht überragen.
- Die maximal beobachteten Sohle schwankungen infolge Steilbereichsdünen, wie sie bei starkem Geschiebetrieb in steilen Gewässern auftreten, waren mit  $3-4 \text{ m}$  grösser als erwartet und haben das Ausführungsprojekt beeinflusst. Die massgebenden Parameter (Abfluss, Gewässer breite, Korngrössenverteilung, Neigung, Gewässerführung) wurden bis heute noch nicht systematisch untersucht. In hinsichtlich Neigung und Geschiebetrieb mit der Gamsa vergleichbaren Gewässern muss aber mit ähnlichen Sohlenschwankungen gerechnet werden.
- Das Geschiebe kann zwischen dem oberen und unteren Geschiebeablagerungsplatz durchtransportiert werden, solange es nicht zu einer Auflandung vom unteren Geschiebeablagerungsplatz her (Bild 8) respektive zu Ausuferungen kommt. Der untere Geschiebeablagerungsplatz muss daher nach einem Ereignis rasch entleert werden. Bedeutende Ausuferungen müssen verhindert werden, da sie die Geschie betransportkapazität reduzieren und so zu Auflandungen führen, welche die Ausuferungen noch verstärken. Im optimierten Projekt werden Ausuferungen durch ein Freibord und die vertikal abgestuften Buhnen verhindert.
- Die Lenkung der Gamsa durch Buhnen und eine, von den Buchten zwischen den Buhnen abgesehen, nahezu konstante Gewässer breite verhindern zweidimensionale Strömungseffekte, welche zu einer erhöhten Belastung der Schutzbauten führen.

Fördernde Faktoren	Hemmende Faktoren
<ul style="list-style-type: none"> <li>• steiles Gewässer (Gamsa: <math>10,5\%</math>)</li> <li>• bedeutender Geschiebetransport</li> <li>• breite Kornverteilung</li> <li>• lange Gewässerabschnitte mit konstanter Breite (z.B. Fels links und Längsverbau rechts)</li> <li>• genügende Gewässerbreite, welche ein Wechselspiel von lokalen Ablagerungen und Erosionen zulässt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausbildung von Buchten zwischen den Buhnen, besonders bei grossem Abfluss</li> <li>• natürliche und künstliche Schwellen, Fixpunkte</li> <li>• generelle Auflandungs- und Erosionstendenz (verringert Wechselspiel zwischen Ablagerung und Erosion)</li> <li>• Führung des Gewässers durch Uferbefestigungen (z.B. durch Buhnen)</li> </ul>

Tabelle 5. Fördernde und hemmende Faktoren für Bildung und Ausmass von Steilbereichsdünen.

Die Wahl eines Hochwasserschutzkonzeptes mit flexiblen Ufer- und Sohlenschutzbauten in Form von Halbwürfeln steigert die Hochwassersicherheit der Gamsa signifikant und erlaubt die Schäden bis zu extremen Ereignissen für verschiedene Geschiebeszenarien in Grenzen zu halten. Die dringlichen Massnahmen wurden mittlerweile umgesetzt. Die hydraulischen Modellversuche haben zur Optimierung der Anordnung der Schutzbauten massgeblich beigetragen.

#### Verdankung

Auftraggeber für Projekt und Modellversuche war die Stadtgemeinde Brig-Glis, welche für den Modellbau und die Durchführung der Versuche Mitarbeiter des städtischen Werkhofs zur Verfügung gestellt hat.

#### Literatur

ARGE SBWZ – Martin Jäggi (2001): Hochwasserschutz Brig-Glis – Synthesebericht, Gemeinde Brig-Glis (unveröffentlicht).  
BSAP (2000): Sanierung Gamsa, Analyse des Ereignisses vom 15. Oktober 2000, Zwischenbericht, BSAP Nr. 33035.004, Gemeinde Brig-Glis (unveröffentlicht).

BWG (2001): Hochwasserschutz an Fließgewässern. Wegleitung des BWG. Bern.

Fehr R. (1987): Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzählanalyse, Schweizer Ingenieur und Architekt, Sonderdruck aus Heft 38/1987, Zürich.

Jaeggi M. (1983): Alternierende Kiesbänke, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 62, Zürich.  
Koulinski V. (1993): Etude de la formation d'un lit torrentiel par confrontation d'essais sur modèle réduit et d'observations de terrain, Etudes CEMA-GREF n° 15, Grenoble.

LCH (2003): Hochwasserschutzprojekt der Gamsa in Gamsen (Brig-Glis), Hydraulische Modellversuche, Schlussbericht, Bericht Nr. 11/03, Lausanne.

Meile T., Bodenmann M., Schleiss A., Boillat J.-L. (2004): Umsetzung des Hochwasserschutzkonzeptes der Gemeinde Brig-Glis im Kanton Wallis. Internationales Symposium Interpraevent, Riva del Garda, Band 2, 219–230.

Minor H.-E. (2004): Zur Überlastbarkeit von Hochwasserschutzbauten, Wasser, Energie, Luft – Eau, énergie, air, 96 (5/6), 153–157.

Rebord Y.-G. (1994): Hydrologie du bassin versant de la Gamsa, Rébord SA, Ingénieurs en génie civil et hydraulique, Vétroz.

Schleiss A., Aemmer M., Philipp E., Weber H. (1998): Erosionsschutz an Gebirgsflüssen mit eingegrabenen Betonprismen. Wasser, Energie, Luft – Eau, énergie, air, 90 (3/4), 45–52.

Schleiss A., Bär H., Gmür A. (1992): Projektierung und Bau von Hochwasserschutzmassnahmen an der Reuss in Gurtmellen-Wiler. Internationales Symposium Interpraevent, Bern, Band 5, 43–54.

Schleiss A., Gmür A. (1996): Hochwasserschutzmassnahmen zur Verhinderung von Seitenerosionen an der Reuss in Göschenen. Internationales Symposium Interpraevent, Garmisch-Partenkirchen, Band 4, 243–254.

#### Anschrift der Verfasser

Tobias Meile, dipl. Bauing. EETHL, Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), CH-1015 Lausanne, tobias.meile@epfl.ch

Anton Schleiss, Prof. Dr. dipl. Bauing. ETHZ, LCH, EPFL, anton.schleiss@epfl.ch

Martin Bodenmann, dipl. Kult.-Ing. ETHZ, BSAP, Ingenieure und Berater, Brig, buero@bsap.ch

Jean-Louis Boillat, Dr. dipl. Bauing. ETHZ, LCH, EPFL, jean-louis.boillat@epfl.ch

Martin Jaeggi, PD Dr. dipl. Kult.-Ing. ETHZ, Flussbau und Flussmorphologie, CH-8123 Ebmatingen, jaeggi@rivers.ch

# Lawinenforschung – Spektakuläre Versuche helfen den Forschern die Lawinen zu verstehen

■ Andreas Walker

Lawinen stellen für die Bewohner der Alpen eine Gefahr dar. Je besser man die Eigenschaften der Lawinen kennt, desto effizienter kann man sich vor ihnen schützen. Spektakuläre Versuche des Eidgängischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) in Davos helfen Lawinen besser zu verstehen und zu berechnen.

## Staublawinen

25. Februar 1999, 9.15 Uhr im Vallée de la Sionne VS. Nur wer genau hinschaut, sieht das kleine weiße Wölkchen (Bild 1a), das sich aus dem Schnee erhebt und von einer Sprengladung stammt, die ein Helikopter zwei Minuten vorher abgeworfen hat. Die Wirkung ist frappant (Bilder 1b, c, d). Schlagartig

scheint sich der ganze Hang in Bewegung zu setzen. Weiße Staubwolken bilden sich in einer Front – die Lawine beginnt zu fließen. Jetzt trifft der Knall ein, der für die 2,5 km Entfernung zu unserem Standort knapp acht Sekunden gebraucht hat. Zwei Lawinen stürzen den Berg hinunter, vereinigen sich wie Flüsse zu einer gigantischen Staubwolke.

600 000 Tonnen Schnee stürzen mit 300 km/h in die Tiefe, prallen am Gegenhang ab und donnern ins Tal. Es ist weltweit die grösste durch Sprengung ausgelöste Lawine. Danach steigen riesige blumenkohlförmige Staubwolken in die Luft, die aussehen wie sommerliche Quellwolken. Die Lawine rast einem Tornado gleich mit Getöse ins Nebelmeer, das über dem Wallis hängt, und die Staubwolken fallen zusammen. Wie ein Spuk ist alles vorbei, doch hört man noch einige Minuten lang das Knirschen des Schnees und

das Brechen von Bäumen und Ästen, denn noch immer wälzt sich ein weißer Schneefluss träge den Hang hinunter.

Mitten auf ihrem Weg rast die Lawine auch über den Bunker (Bilder 2, 3, 4), der für die Lawinenforschung dort gebaut wurde. Die Lawine verschüttet diesen Bunker unter 5 m betonhartem Schnee und erzeugt eine derartige Druckwelle, dass den Leuten, die sich darin befinden fast das Trommelfell platzt. Doch damit nicht genug. Eine Stahlpanzertür wird von der Druckwelle aus den Angeln gehoben und zerknittert wie Karton.

Die 300 km/h der Staublawine waren eines der neuen Forschungsresultate, die bis anhin eher niedriger geschätzt wurden. Mit einem Doppler-Radar konnte die Geschwindigkeit der Lawine genauestens gemessen werden, bevor man im Bunker die Luken dicht machte.