

Forum 2012

Spezialfälle in der Gefahrenbeurteilung



Chärstelenbach (Uri), Hochwasser August 2005, Bild: Amt für Tiefbau, Kanton Uri

Inhalt

Seitenerosion - Prozesse und deren Berechnung	3
Analyse Seitenerosionen 2005 und Lehren für Gefahrenbeurteilungen	5
Auswertung von hydraulisch verursachten Seitenerosionen und Ableitung von Gesetzmässigkeiten zur Ermittlung des Erosionsausmasses	9
Methodik zur Modellierung der Ufererosion basierend auf 2D-Überflutungsmodellierungen	12

Méthode d'évaluation des surfaces exposées au danger d'effondrement en tête de falaise	15
Methodenentwurf Gefahrenbeurteilung an Geländekanten	19
Modellierung Oberflächenabfluss Methodik und Fallbeispiele	22
Caractérisation du ruissellement de surface Démarche basée sur les SIG	25

Herausgeber / Editeur

FAN Fachleute Naturgefahren Schweiz

Offizielle Adresse / Adresse officielle

Nils Hählen, Tiefbauamt des Kantons Bern
Oberingenieurkreis I
Schlossberg 20, 3601 Thun
Tel. 033 225 10 77, E-Mail: nils.haehlen@bve.be.ch

**Sekretariat, Administration, Kurswesen /
Secrétariat, administration, cours**

Ingenieure Bart AG, Rolf Bart,
Waisenhausstrasse 15, 9000 St. Gallen
Tel. 071 /228 01 70, Fax 071/228 01 71
E-Mail: kontakt@fan-info.ch
Internet: <http://www.FAN-Info.ch>

**Redaktion FAN-Agenda /
Rédaction Agenda-FAN**

Jean-Jacques Thormann, HAFL, Zollikofen
Thomas Blattner, Ecosafe Gunzenhauser AG, Kaiseraugst
Alexandre Badoux, WSL, Birmensdorf
Martin Frei, AFW GR, Chur

**Meldungen, Beiträge und Anfragen FAN Agenda an:
Informations, contributions et demandes à
l'adresse suivante:**

Jean-Jacques Thormann, Berner Fachhochschule
Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissen-
schaften HAFL, Fachgruppe Gebirgswald & Naturgefahren
Länggasse 85, 3052 Zollikofen,
Tel. 031 910 21 47, Fax 910 22 99,
E-Mail: jean-jacques.thormann@bfh.ch

Zielsetzung der FAN

Die Tätigkeit der FAN steht im Dienste der Walderhaltung und dem Schutz vor Naturgefahren. Sie widmet sich insbesondere dem Thema Weiterbildung bezüglich Lawinen-, Erosions-, Wildbach-, Hangrutsch- und Steinschlaggefahren. Die ganzheitliche, interdisziplinäre Beurteilung und Erfassung von gefährlichen Prozessen sowie die Möglichkeiten raumplanerischer und baulicher Massnahmen stehen im Zentrum.

Mitgliedschaft bei der FAN

Die Mitglieder der FAN sind Fachleute, welche sich mit Naturgefahren gemäss Zielsetzung der Arbeitsgruppe befassen. Total umfasst die FAN über 350 Mitglieder aus der ganzen Schweiz. Mitgliedschaftsanträge sind an den Präsidenten oder Sekretär zu richten. Die Mitgliedschaft in der FAN kostet Fr. 80.– / Jahr und steht allen Fachleuten aus dem Bereich Naturgefahren offen. Bedingung ist zudem, dass jeweils innerhalb von drei Jahren einmal vom Kursangebot Gebrauch gemacht wird.

Objectif de la FAN

La FAN est au service de la conservation des forêts et de la protection contre les dangers naturels. Elle se consacre en particulier au thème du perfectionnement dans le domaine des dangers que représentent les avalanches, l'érosion, les torrents, les glissements de terrain et les chutes de pierres. Elle met aussi l'accent sur deux aspects importants: des évaluations et des relevés globaux et interdisciplinaires des processus dangereux, et les mesures possibles en matière d'aménagement du territoire et de génie forestier.

Adhésion à la FAN

Les membres de la FAN sont des spécialistes qui s'occupent de dangers naturels conformément aux objectifs du groupe de travail. La FAN comprend au total plus de 350 membres, répartis dans toute la Suisse. Les demandes d'adhésion doivent être adressées au président ou au secrétaire. L'adhésion à la FAN coûte fr. 80.– / an. Elle est ouverte à tous les spécialistes des dangers naturels. Une seule condition imposée est de fréquenter tous les trois ans au moins l'un des cours proposé.

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser

Liebe FAN-Mitgliederinnen und Mitglieder

Das diesjährige FAN-Forum fand Ende Februar zum Thema „Spezialfälle in der Gefahrenbeurteilung“ statt. Es wurden teils neue Methoden und Ansätze aus der Praxis präsentiert.

In der aktuellen FAN-Agenda sind sämtliche Beiträge zu den Themenblöcken „Seitenerosion an Fließgewässern“, „Einsturz an Hangkanten“ und „Oberflächenabfluss“ abgedruckt. Den Verfassern danken wir für die rechtzeitige Zustellung der Beiträge.

Wir wünschen eine spannende Lektüre und eine schöne Sommerzeit.

Für das Redaktionsteam

Jean-Jacques Thormann



Kleine Emme (Werthenstein), Hochwasser August 2005

Bild: Nadine Hilker

Redaktionsschluss FAN-Agenda 3/12:

15. November 2012

Die FAN-Agenda erscheint 1-3 mal jährlich /

Fermeture de la rédaction Agenda-FAN 3/12:

15. Novembre 2012

L'Agenda-FAN paraît 1-3 fois par an.

Seitenerosion - Prozesse und deren Berechnung

Patric Rousselot (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) ETH, Zürich, patric.rousselot@yaw.baug.ethz.ch)

Prozesse

Basierend auf den Modellversuchen von Requena (2008) werden zwei Arten von Seitenerosion unterschieden: primäre und sekundäre Ufererosion.

In einem natürlichen Fließgewässer stellen sich die Neigung in Längsrichtung sowie die Breite des Flusses aufgrund des Abflusses sowie des Geschiebetransports ein.

Man betrachte zuerst ein gerades Fließgewässer mit befestigten Uferböschungen. Die Breite kann aufgrund der Befestigungen nicht variieren. Bei konstantem Abfluss sowie konstanter Zugabe von Sediment stellt sich mit der Zeit ein Gleichgewichtsgefälle ein. Ab diesem Zeitpunkt wird sich die Sohlentopographie nicht mehr ändern.

Im Gleichgewichtszustand werden nun beidseitig die Uferbefestigungen entfernt. Das Gerinne wird sich auf der gesamten Länge gleichmässig verbreitern. Dies ist die sogenannte primäre Ufererosion.

primäre Ufererosion

Der Prozess besteht im Kern aus der Kombination von Erosion und Böschungskollaps. Die Strömungsbelastung bewirkt eine gleichmässige Erosion der Flusssohle, insbesondere auch des Böschungsfusses. Die Böschung wird durch das Abgraben des Böschungsfusses mit der Zeit steiler, zunehmend instabil und kollabiert in Form eines Böschungsver-sagens. Das deponierte Material wird mittels Geschiebetransport weggetragen. Mit der Verbreiterung des Gerinnes reduziert sich sukzessive die Abflusstiefe und die einhergehende spezifische Strömungsbelastung. Der Prozess zieht sich solange hin bis ein scheinbar stabiler Zustand erreicht ist und sich das

Gerinne nicht mehr weiter verbreitert.

In moderaten Neigungsbereichen von weniger als 0.5 % sowie einem Geschiebedefizit bleibt der Zustand in vielen Fällen stabil. Es bildet sich unter Umständen eine Pflästerschicht aus.

sekundäre Ufererosion

Abhängig vom Geschiebeeintrag sowie der Sohlneigung beginnt nun die sekundäre Ufererosion. Geschiebe wird in der aufgeweiteten Strecke tendenziell abgelagert da die geringe Strömungsbelastung nicht dazu ausreicht, das Geschiebe durchzuleiten. Die Ablagerungen führen mit der Zeit zur Bildung von Makrostrukturen, beispielsweise Geschiebebänken. Diese Strukturen führen zu einer Ablenkung der Strömung von der Hauptfließrichtung und ermöglichen einen direkten Strömungsangriff auf die Böschung. Das Ufer wird erodiert und es bildet sich mit der Zeit ein mäandrierendes oder verzweigtes Fließgewässer.

Sekundärströmung

Sobald eine ausgeprägte Kurvenströmung vorhanden ist, kommt die sogenannte Sekundärströmung ins Spiel. Dies ist eine spiralförmige Strömung in Kurven, welche an der Kurvenaussenseite in die Tiefe abtaucht und auf der Kurveninnenseite zurück an die Oberfläche kommt. Man geht davon aus, dass die Sekundärströmung einen wesentlichen Einfluss auf die Seitenerosion in Kurven hat.

Einflussgrößen

Es gibt eine Menge an Einflussgrößen, welche die Seitenerosion beeinflussen können. Dies macht eine physikalische Berechnung der Prozesse aufgrund der Unsicherheiten in der Wahl dieser Parameter schwierig. In der

Literatur werden unter anderem folgende Einflussgrößen genannt:

- Abfluss
- Geländemorphologie (Neigung, Kurvenradius)
- Sohlenmaterial (geschichtet, kohäsiv, Kornverteilung)
- Geschiebeeintrag
- Grundwasserspiegel
- Vegetation (Durchwurzelung)
- Frequenz von Frost / Auftauen
- etc.

Berechnung

Es wird grob unterschieden in makroskopische und mikroskopische Betrachtungsweisen.

makroskopische Betrachtungen

Eine makroskopische Betrachtung beurteilt das Gerinne als Ganzes. Untersucht werden dabei z.B. die Veränderung der Breite und die Position der Uferböschung oder auch statistische Analysen über makroskopische Parameter. Die räumliche Skala bewegt sich in der Größenordnung der Gerinnebreite. Allgemein kann mit wenigen globalen Parametern eine Aussage über die Form und Breite eines Fließgewässers gemacht werden. Eingang in die Praxis haben beispielsweise die Regimetheorie oder die Klassifizierung von Gerinneformen gefunden.

Die Regimetheorie stellt Formeln bereit, welche die theoretische Gleichgewichtsbreite eines Fließgewässers in Abhängigkeit von Abfluss, Korndurchmesser, Sohlenneigung, etc. quantifizieren. Eine Klassifizierung von Gerinneformen ist z.B. mit dem sogenannten

da-Silva-Diagramm möglich. Mit den globalen Parametern Fließgewässerbite, Abflusstiefe und Korndurchmesser kann man abschätzen, ob sich ein verzweigtes Gerinne, alternierende Bänke oder mäandrierende Strukturen bilden.

mikroskopische Betrachtungen

Mikroskopische Betrachtungen untersuchen die lokalen physikalischen Vorgänge an der Böschung, z.B. die Prozesse welche ein Einzelkorn aus der Böschung herauslösen und abtransportieren. Die räumliche Skala reicht von Korngrösse bis Abflusstiefe. Beispiele für mikroskopische Betrachtungen sind Theorien zum Böschungsversagen oder Geschiebetransport. Es gibt nur wenige Untersuchungen

zum Thema Seitenerosion, welche sich mit mikroskopischen Betrachtungsweisen auseinandersetzen. Allerdings ist gerade das Verständnis der lokalen Prozesse von entscheidender Bedeutung, wenn man in Zukunft die übergeordneten Phänomene wie Ufererosion akkurat simulieren will. Momentan stellen numerische Programme – wenn überhaupt – nur stark vereinfachte Modelle wie z.B. für einen Böschungskollaps zur Verfügung.

Literatur

REQUENA MENDEZ, PATRICIA (2008): *Seitenerosion in kiesführenden Flüssen. Prozessverständnis und quantitative Beschreibung*. DISS. ETH Nr 18074



Engelberger Aa (Strasse nach Engelberg), Hochwasser August 2005

Bild: Schweizer Luftwaffe

Analyse Seitenerosionen 2005 und Lehren für Gefahrenbeurteilungen

Lukas Hunzinger (Flussbau AG SAH, Bern, lukas.hunzinger@flussbau.ch)

Einleitung

Beim Hochwasser 2005 ist in vielen Flüssen des Alpennordhanges Seitenerosion in einem Ausmaß und einer Häufigkeit aufgetreten, wie sie in der Schweiz bisher noch nicht beobachtet worden waren. Die Seitenerosion ist entweder in Kombination mit intensivem Geschiebetransport aufgetreten (in Gebirgsflüssen) oder als Einzelprozess bzw. in Kombination mit dem Überschreiten der Abflusskapazität der Gerinne (in Talflüssen). Im Rahmen der Ereignisanalyse der Unwetter 2005 wurden einzelne Erosionsstellen dokumentiert und die Faktoren, welche zur Erosion geführt haben, identifiziert und quantifiziert. Damit wurden neue Erkenntnisse über Ursachen und auslösende Momente der Seitenerosion gewonnen. Der vorliegende Artikel ist eine gekürzte Fassung des Beitrags von Hunzinger & Durrer (2007), welcher im Rahmen der Ereignisanalyse der Hochwasser 2005 verfasst wurde.

Vorgehen

Datenbank Seitenerosion

Für die Analyse der Seitenerosion wurde eine Datenbank mit 119 einzelnen Erosionsstellen

in verschiedenen Flüssen der Alpennordseite erstellt (Abb. 1). Die Angaben zu den einzelnen Erosionsstellen stammen aus Ereignisdokumentationen und -analysen der Kantone (StorMe-Formulare und zusammenfassende Analysen) und aus technischen Berichten zu Instandstellungsprojekten oder wurden durch Befragung von Gebietskennern sowie durch eigene Erhebungen erstellt.

Für jede Erosionsstelle wurden elf qualitative und quantitative Parameter erhoben, welche die Grunddisposition des Gewässers, die Belastung auf das Ufer, dessen Widerstand und schließlich das Ausmaß der Seitenerosion beschreiben.

Erfasste Parameter

Zur Grunddisposition werden Parameter gezählt, welche die Morphologie des Gewässers im Zustand vor dem Ereignis beschreiben. Das sind die Verbauungsgeschichte und die Gerinneform (gestreckt, verzweigt oder mäandrierend) sowie die Gerinnebreite und das Längengefälle. Zur Grunddisposition wird auch die Zuordnung zu Gebirgs- oder Talflüssen gezählt. Kriterien für diese Unterscheidung sind in erster Linie die Größe des

Einzugsgebietes und das Längengefälle.

Die Belastung während des Hochwassers wird mit dem Abfluss Q und der daraus abgeleiteten Strömungsleistung $S = \rho_w \cdot g \cdot Q \cdot J$ quantifiziert. Darin bezeichnen ρ_w die Dichte des Wassers, g die Erdbeschleunigung und J das Längengefälle. Im Sinne einer Vereinfachung wird die Belastung auch mit der Ereignisgröße beschrieben. Die Ereignisse werden in drei Klassen mit einer Wiederkehrdauer der Abflussspitze < 30 Jahre, 30 bis 100 Jahre und > 100 Jahre, unterteilt. Als wesentliche qualitative Faktoren für die Belastung werden die übergeordneten Gerinneprozesse während des Ereignisses betrachtet, also etwa Gerinneverzweigung (Abb. 2), Mäanderbildung (Abb. 3) oder Ablagerungen, sowie die daraus resultierende lokale Strömungssituation wie Querströmungen bei einer Verzweigung, die Strömung an einem Prallhang (Abb. 4) oder Ausuferungen.

Der Widerstand des Ufers wird qualitativ erfasst. Es wird lediglich unterschieden, ob und wie ein Ufer verbaut war (mit Blöcken, mit einer Ufermauer, mit Bühnen etc.) oder ob es unverbaut war.

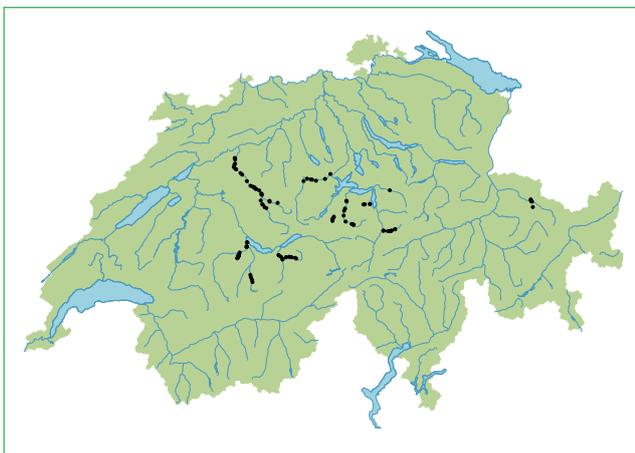


Abb. 1: Übersicht über die erfassten Erosionsstellen.



Abb. 2: Seitenerosion an der Grossen Melchaa: Gerinneprozess Verzweigung. Bildquelle: Kantonspolizei Obwalden.

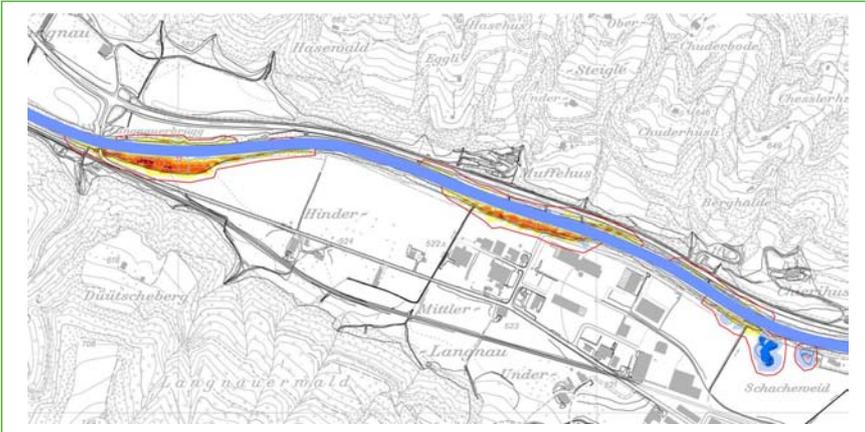


Abb. 3: Seitenerosion an der Kleinen Emme: Gerinneprozess Mäanderbildung. Quelle: Ingenieure Bart AG.

Abb. 4: Seitenerosion an der Kleinen Emme: Strömung an einem Prallhang ohne Ausuferung. Ufer mit Ufermauer verbaut. Bildquelle: Schweizer Luftwaffe.



Mit der Länge der Erosionsstelle und Rückgriffweite der Seitenerosion wird das Ausmaß der Erosion beschrieben (Abb. 5).

Datenbank Seitenerosion

Zur Auswertung wurden die relativen Häufigkeiten des Auftretens eines Faktors bestimmt und in Histogrammen dargestellt oder es wurden quantitative Größen gegeneinander aufgetragen. Die Daten wurden für Gebirgs- und Talflüsse getrennt ausgewertet und zwar jeweils für die gesamte Stichprobe und für die Teilmenge derjenigen Datensätze, bei welchen die entsprechenden Parameter zuverlässig bestimmt werden konnten. Einzelne Faktoren sind mit Unsicherheiten behaftet, weil die entsprechenden Parameter in Ereignisdokumentationen entweder rudimentär erhoben wurden, nicht bekannt sind oder weil bei sich

überlagernden Prozessen eine Zuordnung zu einem maßgeblichen Prozess schwierig ist. Für 74 der insgesamt 119 dokumentierten Erosionsstellen konnten mindestens 9 der 11 Eingangsgrößen mit ausreichender Sicherheit bestimmt werden.

In den folgenden Ausführungen beziehen sich



Abb. 5: Seitenerosion an der Ilfis. Definition von Erosionslänge und Rückgriffweite. Bildquelle: Flussbau AG SAH.

quantitativen Angaben auf die Teilmenge der zuverlässigen Daten.

Ergebnisse

Beschreibende Auswertung

Seitenerosion ist in Flüssen aller Gerinneformen und Verbauungsgeschichten aufgetreten. In Gebirgsflüssen dominierten die Seitenerosionen in verzweigten Flüssen oder in solchen, die vor einer Korrektur verzweigt waren, sowie in Steilstrecken. In Talflüssen dominierten Erosionen in korrigierten, ehemals mäandrierenden oder verzweigten Flussabschnitten, traten aber auch in unkorrigierten Gewässern auf.

Die Seitenerosion ist in Gebirgs- und Talflüssen an unterschiedliche Gerinneprozesse geknüpft (Abb. 6). In Gebirgsflüssen sind Seitenerosionen hauptsächlich dort aufgetreten, wo übergeordnete Prozesse wie Gerinneverzweigung und Mäanderbildung vorherrschten (zusammen 72 % der Erosionsstellen) oder die Sohle einer Veränderung (Auflandung oder Erosion) unterworfen war (zusammen 19 %). In Talflüssen wurde das Ufer vor allem bei Verlagerungen in einzelnen Flusskrümmungen (54 %) sowie – in vermindertem Ausmaß – in Gerinnen mit stabiler Sohle (24 %) erodiert. Stabile Sohle heißt in diesem Fall, dass die Sohlenlage vor und nach dem Hochwasser ungefähr gleich war. Schwankungen während des Ereignisses sind nicht erfasst.

In den Gebirgsflüssen sind nicht ganz 60 % der Erosionsstellen an verbauten Ufern aufgetreten. Die Verteilung auf die verschiedenen Verbauungstypen (Blöcke, Mauer, Buhnen) dürfte in etwa der Verteilung dieser Verbauungstypen entsprechen. In Talflüssen zeigt sich ein ähnliches Bild, wenn man alle Ereignisse zusammen betrachtet. Schlüsselst man die Daten nach der Ereignisgröße auf, zeigt sich, dass der Anteil der verbauten erodierten Ufer bei den Ereignissen mit einer Wiederkehrdauer von > 100 Jahren größer war (67 %) als bei den Ereignissen mit einer Wiederkehrdauer von 30-100 Jahren (53 %).

Quantitative Auswertung

Die größte beobachtete Rückgriffweite betrug 90 m (Kleine Emme in Malters), die längste Erosionsstelle misst 630 m (Kleine Emme in Emmenbrücke). Diese zwei Extreme sind allerdings die Ausnahme. Die größten Rückgriffweiten und Erosionslängen sind in den Talflüssen mit großen Ereignissen (Wiederkehrdauer der Abflussspitze > 100 Jahre) aufgetreten. In den Gebirgsflüssen waren die Rückgriffweiten annähernd so groß, in den Talflüssen mit mittleren Ereignissen (Wiederkehrdauer der Abflussspitze 30-100 Jahre) ungefähr halb so groß (Abb. 7).

Bei den seltenen Ereignissen mit einer Wiederkehrdauer der Abflussspitze über 100 Jahre war die Rückgriffweite in 90 % der Fälle kleiner als 4 mal die Gerinnebreite (in Gebirgsflüssen) bzw. kleiner als 2 mal die Gerinnebreite (in Talflüssen). Bei den mittleren Ereignissen in den Talflüssen war das entsprechende Verhältnis 0.7. Aus den Daten lässt sich jedoch keine Abhängigkeit der Rückgriffweite von der Gerinnebreite herleiten (Abb. 8). Es lässt sich aber zeigen, dass die Rückgriffweiten bei Erosionen, welche durch lokale Phänomene verursacht wurden, geringer waren als solche, welche von übergeordneten Strömungsverhältnissen (Querströmung in Verzweigung, Prallhangsituation) geprägt waren.

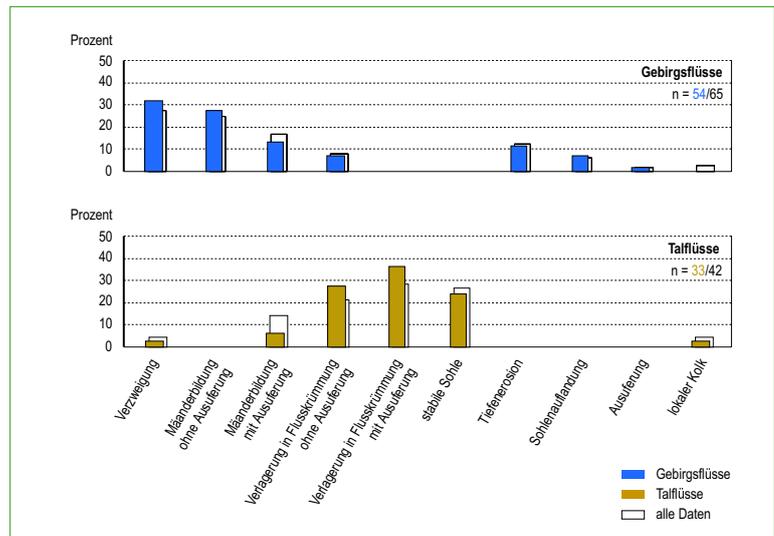


Abb. 6: Relative Häufigkeit des Auftretens von Seitenerosionen bei verschiedenen Gerinneprozessen während des Ereignisses.

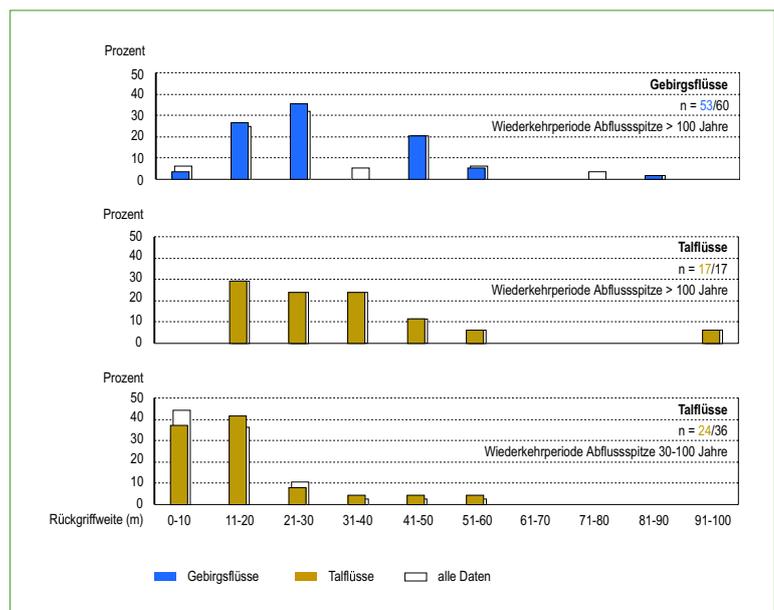


Abb. 7: Verteilung der Rückgriffweiten der Seitenerosion in Abhängigkeit der Ereignisgröße.

Zwischen Erosionslänge und Strömungsleistung bzw. zwischen Rückgriffweite und Strömungsleistung lässt sich aus den vorliegenden Daten kein Zusammenhang herleiten.

Diskussion

Gesamtbild Seitenerosionen

Trotz großer Streuung der Daten lassen sich die Ergebnisse zu folgendem Gesamtbild der Seitenerosionen beim Hochwasser 2005 zusammen fügen:

In Gebirgsflüssen waren die Abflüsse außerordentlich hoch und haben, zusammen mit dem hohen Geschiebeaufkommen, großräumige morphologische Veränderungen (Verzweigungen, Mäanderbildung) mit ihren dazu gehörigen Strömungssituationen (Querströmung, Prallhangsituationen) ausgelöst. Die damit verbundenen Seitenerosionen und Gerinneverlagerungen betragen bis zum vierfachen der Gerinnebreite.

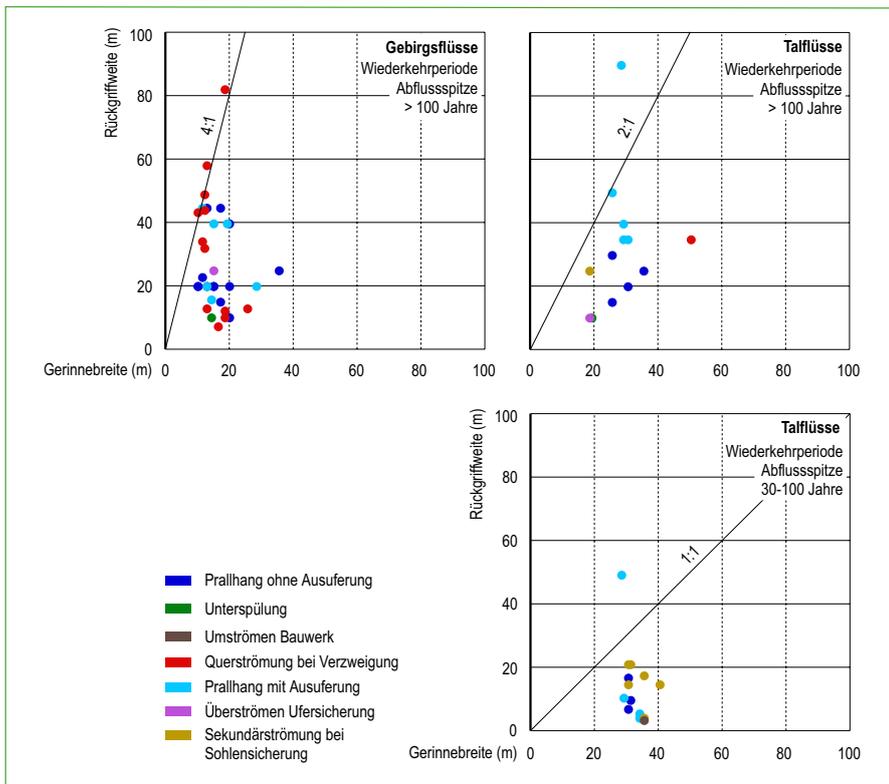


Abb. 8: Beobachtete Rückgriffweiten in Abhängigkeit der Gerinnebreite.

Die Belastung in den Talflüssen war häufig weniger hoch als in den Gebirgsflüssen. Weil der Geschiebetransport eine weniger wichtige Rolle gespielt hat, waren die großräumigen morphologischen Veränderungen seltener. So hat sich die Erosion mehrheitlich auf einzelne Flusskrümmungen beschränkt, ohne dass sich z.B. eine Pendelbewegung der Strömung flussabwärts zu einer eigentlichen Mäanderbildung hätte ausdehnen können.

Die Prozess-Skala hat das Ausmaß der Seitenerosion bestimmt. In Gewässern, in welchen übergeordnete morphologische Prozesse wie Verzweigung oder Mäanderbildung abgelaufen waren – vor allem bei großen Ereignissen in Gebirgsflüssen – waren mehr und stärkere Seitenerosionen zu verzeichnen als in Gewässern ohne übergeordnete Prozesse. Sind übergeordnete Prozesse aufgetreten, war das Verhältnis von Länge zu Rückgriffweite durch die charakteristische Form morphologischer Strukturen bestimmt.

Bei mittleren Ereignissen mit einer Wiederkehrdauer der Abflussspitze von 30-100 Jahren waren die Erosionsprozesse stärker von lokalen Phänomenen beeinflusst (Bauwerke, einzelne Prallhangsituationen), und die Geometrie war durch lokale Gegebenheiten bestimmt und die Rückgriffweiten im Allgemeinen geringer.

Bei übergeordneten Gerinnprozessen hat – vor allem in Gebirgsflüssen – ein allfälliger Uferschutz seine Wirkung nicht mehr entfalten können. Das Verhältnis von erodierten verbauten Ufern zu erodierten unverbauten Ufern von 60 : 40 in Gebirgsflüssen dürfte in etwa dem Verbaunungsverhältnis in den betreffenden Gewässern entsprechen. In Talflüssen haben sich Gerinne bildende Prozesse nicht im gleichen Maße ausgebildet. Bestehende Uferverbauungen haben dort offenbar Erosionsprozesse verhindern können. Geht man davon aus, dass die Ufer in den Talflüssen ein Verbaunungsverhältnis von 75:25 aufweisen, dann waren verbaute Ufer im Verhältnis ihres Vorkommens

nur halb so oft von Erosion betroffen wie unverbaute Ufer.

Lehren für die Gefahrenbeurteilung

Aus den Untersuchungen zur Seitenerosion beim Hochwasser 2005 lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Annähernd 90 % der hier dokumentierten Erosionsstellen haben eine Rückgriffweite von 10 m und mehr (bis maximal 90 m) und liegen damit weit über der bei einer Gefahrenbeurteilung verwendeten Intensitätsklassengrenzen von 0.5 m und 2 m. Aufgrund dieser Erkenntnis wäre zu überprüfen, die Klassengrenzen entweder stark auszuweiten oder ganz aufzuheben und die gesamte von Seitenerosion potenziell betroffene Fläche zu bezeichnen. Erste Anhaltspunkte für eine solche Ausscheidung liefern die folgenden zwei Punkte:
- Über die Hälfte der Seitenerosionen sind an Prallhängen aufgetreten. Potenzielle Erosionsstellen dieser Art sind vorhersehbar. Allerdings ist fast die Hälfte der Seitenerosion nicht an Prallhangssituationen aufgetreten und demzufolge nicht von vornweg zu lokalisieren.
- Bei hohen Belastungen (Wiederkehrdauer der Abflussspitze > 100 Jahre) haben die Rückgriffweiten in Gebirgsflüssen bis zu vier mal die Gerinnebreite betragen und in Talflüssen bis zu zweimal die Gerinnebreite.

Literatur

HUNZINGER L. & DURRER S. (2008): *Seitenerosion*. In: Bezzola G. R. & Hegg C. (Hrsg): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2, Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Bundesamt für Umwelt & Eidg. Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft, Umwelt-Wissen, Nr. 0825, Bern, S. 125-136.

Auswertung von hydraulisch verursachten Seitenerosionen und Ableitung von empirischen Zusammenhängen zur Ermittlung des Erosionsausmasses

Annette Bachmann (Geographisches Institut, Bern, annette.bachmann@students.unibe.ch)

Die Seitenerosion ist in vielen Fällen eine der schadenreichsten Gefahrenarten und muss deshalb im Rahmen der Gefahrenkartierung berücksichtigt werden (BWW, BRP und BUWAL 1997). Daher sind ein gutes Verständnis des Prozesses und des möglichen Erosionsausmasses entscheidend. In Diskussion mit Nils Hählen (Oberingenieurkreis I, Thun) entstand die Idee, eine Masterarbeit zum Thema Seitenerosion zu verfassen, die derzeit an der Universität Bern unter der Leitung von Hans Kienholz erarbeitet wird.

Ziel

Das Ziel dieser Arbeit ist die Herleitung eines empirischen Zusammenhangs zwischen dem Erosionsausmass und unabhängigen Parametern. Mittels tatsächlich aufgetretener Seitenerosionen wurden Daten zur Geometrie der Erosion und weitere beschreibende Kenngrößen erhoben und einander gegenübergestellt.

Methodik

Es wird davon ausgegangen, dass sowohl der Widerstand der Böschung als auch die Erosionsleistung des Abflusses das Ausmass einer Seitenerosion massgeblich beeinflussen (BWW, BRP und BUWAL 1997). Deshalb wurden nebst der Erosionslänge und -breite Kenngrößen erhoben, die diese beiden Komponenten beschreiben (siehe Abb. 1).

Für die Datenerhebung wurden zwei unterschiedliche Vorgehensweisen gewählt: Einerseits das Erosionsausmass mittels Orthophotos zu untersuchen und es andererseits direkt nach dem Hochwasser im Feld zu vermessen. Als Grundlage für Informationen zum Abfluss dienten Ereignisdokumentationen und -analysen. Flussmorphologische Kenngrößen



Abb. 1: Auswahl der erhobenen Parameter sowie Erosionslänge und -breite an der Weissen Lüttschine 2011

wie die Gerinneneigung und -breite oder die Einzugsgebietsgrösse wurden vorwiegend mit Geodaten in ArcGIS bestimmt.

Grundlagen

Die Datenerhebung beinhaltet Hochwasserereignisse in Gebirgsflüssen und Wildbächen

im voralpinen und alpinen Raum. Die Stichprobe sollte möglichst umfangreich sein, dies sowohl bezüglich der Ereignisse als auch der Auswahl der Gewässer, um anschliessend fundierte Zusammenhänge herleiten zu können.

In Tabelle 1 sind die untersuchten Gewässer mit den wichtigsten Merkmalen zu den jeweiligen Ereignissen aufgelistet. Die Erhebungen anhand von Orthophotos sind rot hinterlegt. Es handelt sich dabei um grossräumige Ereignisse aus den Jahren 2005 und 2011. Grün dargestellt sind Felderhebungen, welche insbesondere kleinräumige Gewitterereignisse umfassen.

Vorläufige Resultate

Mit den erhobenen Daten wurden erste Auswertungen vorgenommen. Um Gewässer unterschiedlicher Grösse miteinander vergleichen zu können, wurde die Variable „Gerinnbreiteverhältnis“ wie folgt berechnet.

$$\text{Gerinnbreiteverhältnis} = \frac{\text{Gerinnbreite nach Ereignis}}{\text{Gerinnbreite vor Ereignis}}$$

Uferverbauungen erhöhen den Widerstand

Gewässer	Ereignisjahr	EZG [km ²]	Auslösebedingung	Max. Abfluss [m ³ /s]	Jährlichkeit	Anzahl Erosionen
Schwarze Lüttschine	2005	180	Dauerregen	140 - 160	300	35
Chirel	2005	130	Dauerregen	100	100	14
Chiene	2005	91	Dauerregen	90	30 - 100	14
Lonza	2011	165	Starkregen	140 - 150	100 - 300	66
Kander	2011	150	Starkregen	135	100 - 300	34
Weisse Lüttschine	2011	165	Starkregen	112	100	19
Simme	2011	30	Gletscherausbruch	27	30 - 100	7
Glatt	2011	8	Gewitter	87	30 - 100	14
Altibach	2011	8	Gewitter	24	30	7
Chalberhönibach	2010	13	Gewitter	30	100	46
Heubach	2010	6	Gewitter	55	EHQ	71

Tab. 1: Untersuchte Gewässer und Ereignisse mit charakteristischen Kennzahlen

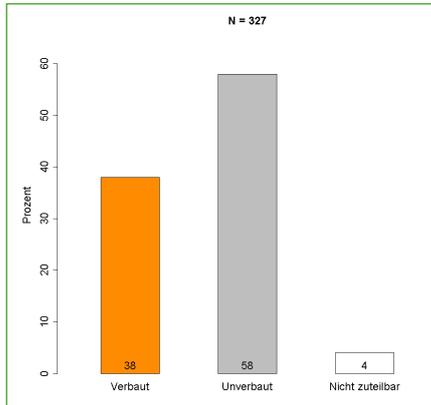


Abb. 2: Anteil [%] der Erosionsstellen an verbauten, respektive unverbauten Ufern

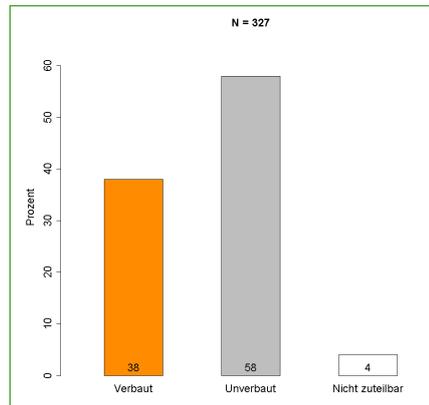


Abb. 3: Gerinnebreitungsverhältnis für die beiden Ufertypen „verbaut“ und „unverbaut“

der Böschung gegenüber dem Strömungsangriff (BWW, BRP und BUWAL 1997). Aus diesem Grund wurde, wenn möglich, bei allen erhobenen Erosionsstellen unterschieden, ob das Ufer vor der Erosion verbaut war oder eine natürliche Böschung aufwies. Die Art der Verbauung ging nicht in die Untersuchung ein. In Abbildung 2 ist dargestellt, dass ungefähr 38 % der Erosionen an verbauten und 58 % an unverbauten Ufern auftraten. 4 % der Erosionsstellen konnten keiner dieser Kategorien zugeteilt werden.

Für die Gefahrenbeurteilung ist insbesondere von Interesse, inwiefern das Erosionsausmass der beiden Ufertypen voneinander abweicht. In

Abbildung 3 ist das Gerinnebreitungsverhältnis für verbaute und unverbauten Ufer dargestellt. Beide haben einen Median von ca. 1.7 und weisen gemäss statistischer Tests keinen signifikanten Unterschied in der zentralen Tendenz auf. Auch die Varianz ist mit einem ähnlich grossen Interquartilsabstand etwa identisch, womit das Ausmass der untersuchten Erosionsstellen unabhängig vom Ufertyp vergleichbar ist.

Um die Erosionsleistung des Abflusses zu untersuchen, wurden die verschiedenen Parameter (Abbildung 1) gegenüber dem Gerinnebreitungsverhältnis dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass mit dieser direkten Ge-

genüberstellung das Erosionsausmass mit einem einzelnen Parameter nicht ausreichend beschreiben lässt. Die Untersuchung der Variable „spezifischer Durchfluss“ [m^2/s] zeigte dennoch ein interessantes Resultat. In Abbildung 4 ist diese Kenngrösse gegenüber dem Gerinnebreitungsverhältnis für sämtliche Gewässer dargestellt.

Der Korrelationskoeffizient nach Spearman beträgt 0.26, womit nur ein schwacher linearer Zusammenhang besteht. Trotzdem ist visuell betrachtet ein gewisser „Maximaltrend“ erkennbar. In Abbildung 4 ist dieser Trend mit einer roten Linie eingezeichnet. Dabei steigt für einen zunehmenden spezifischen Durchfluss das maximale Gerinnebreitungsverhältnis an. Das Gerinnebreitungsverhältnis der Stichprobe variiert allerdings für einen gegebenen spezifischen Durchfluss zwischen dieser Maximalen und 1. Für die Gefahrenbeurteilung ist aber insbesondere das maximale Ausmass der Erosion von Bedeutung. Die erwähnte visuelle Analyse konnte bisher mit keiner statistischen Methode erfasst werden, weshalb noch weitere Ansätze zur Bestimmung des Erosionsausmasses gesucht werden.

Gemäss heutigem Stand der Forschung beginnt Seitenerosion ab einer spezifischen

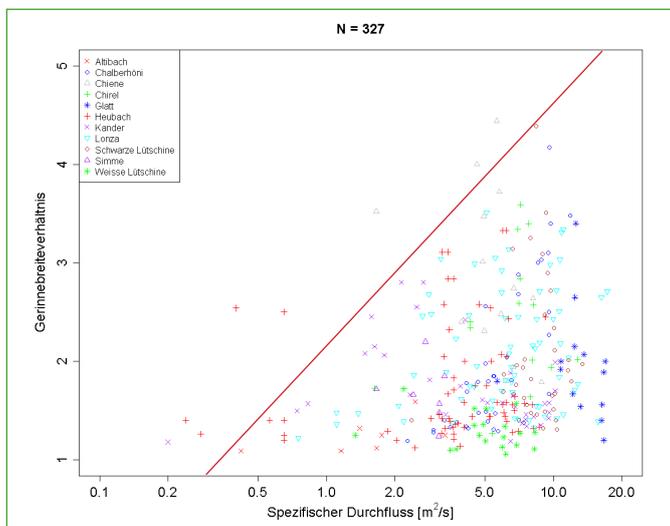


Abb. 4: Spezifischer Durchfluss [m^2/s] gegenüber dem Gerinnebreitungsverhältnis für alle Erosionsstellen

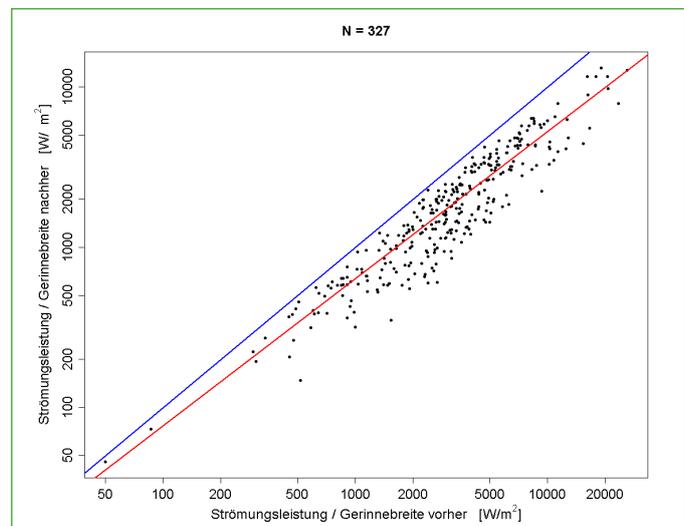


Abb. 5: Strömungsleistung geteilt durch die Gerinnebreite vor (Abszisse) und nach (Ordinate) dem Hochwasserereignis. Die Regressionslinie ist rot eingezeichnet und die blaue Linie weist eine Steigung von 1 auf

Strömungsleistung von ungefähr 300 W/m² (Krapesch et al. 2011, Magilligan 1992). Dies konnte mit dem hier zu Grunde liegenden Datensatz bestätigt werden. Die spezifische Strömungsleistung wird aus der Strömungsleistung [W/m] dividiert durch die Gerinnebreite [m] berechnet. Wird bei einem Hochwasser dieser Wert von etwa 300 W/m² überschritten, setzt Erosion ein und die Gerinnebreite vergrössert sich. Dadurch nimmt die spezifische Strömungsleistung ab und es sollte folglich bei Unterschreiten von einem gewissen Wert keine Seitenerosion mehr stattfinden. Dieser Wert kann nicht exakt bestimmt werden, da die Ganglinie des Abflusses auch einen massgeblichen Einfluss auf die spezifische Strömungsleistung hat. Nach Hochwasserereignissen können aber meist nur noch die Maximalabflüsse bestimmt werden, weshalb die Ganglinie häufig nicht bekannt ist. In dieser Arbeit variiert die spezifische Strömungsleistung deshalb nur mit der sich verändernden Gerinnebreite. Gemäss diesem Gedanken soll untersucht werden, ob sich ein Zusammenhang bezüglich dem Beginn der Seitenerosion bei Überschreiten einer gewissen spezifischen Strömungsleistung, beziehungsweise dem Ende mit sich veränderter Gerinnebreite herstellen lässt.

In Abbildung 5 ist die Strömungsleistung dividiert durch die Gerinnebreite vor und nach dem Ereignis abgebildet. Dass die Variablen mit einem Bestimmtheitsmass von $R^2 = 0.88$ einen linearen Zusammenhang aufweisen, ist nicht weiter erstaunlich, da für jede Erosionsstelle dieselbe Strömungsleistung als wichtige Grösse einfliesst. Von Interesse ist allerdings, wie stark sich das Gerinne durch das Hochwasser verbreitert. Aus diesem Grund ist in Abbildung 5 eine blaue Linie mit der Steigung 1 eingezeichnet. Wenn sich das Gerinne durch das Hochwasser nicht verändert, würde der Punkt auf dieser blauen Linie zu liegen kommen. Die rote Linie stellt die Regressionsgerade durch die Punktwolke dar, womit

gezeigt werden kann, wie stark sich das Gerinne im Verhältnis zu seiner Ausgangsbreite durchschnittlich verändert hat. Es ist hier beispielsweise festzustellen, dass mit zunehmender Strömungsleistung die Verbreiterung des Flussbettes markanter ist als bei kleiner Strömungsleistung.

Dieses Gedankenmodell wurde an einem Ereignis verifiziert, das nicht in die Datengrundlage einfluss. Hierfür wurde ein gut dokumentiertes Gewitterereignis an der Entschlinge oberhalb von Adelboden aus dem Jahr 1987 gewählt. Mittels der Gleichung für die Regressionslinie aus Abbildung 5 wurde für jeden Gewässerabschnitt das potentielle Erosionsausmass ermittelt. Dieser berechnete Erosionspuffer ist in Abbildung 6 als grünes Band dargestellt. Die Erosionsstellen, welche durch das Unwetter verursacht wurden, sind als rote Flächen eingezeichnet. Die Gerinnebreite wurde dem Geodatensatz „Ökomorphologie der Fliessgewässer“ entnommen. Die Resultate basieren somit auf einem groben Erhebungsstabsstab von 1:5'000 – 1:10'000.

Dennoch kann festgestellt werden, dass die Erosionsstellen mit dieser Berechnung entsprechend dieser Fragestellung ausreichend gut erfasst wurden. Gewisse Erosionen liegen innerhalb des Puffers und andere weisen ein etwas grösseres Ausmass auf. Da mittels der Regressionslinie ein Mittelwert berechnet wurde, war zu erwarten, dass das effektive Erosionsausmass kleiner oder grösser ausfallen kann.

Ausblick

In einem nächsten Schritt wird mit dem oben beschriebenen Gedankenmodell das maximale Erosionsausmass angenähert und an weiteren Ereignissen und Gewässern geprüft.

Die Bestimmung des möglichen Erosionsausmasses während einem Hochwasserereignis bleibt eine Herausforderung. Der Prozess und seine Entstehung sind komplex, weshalb

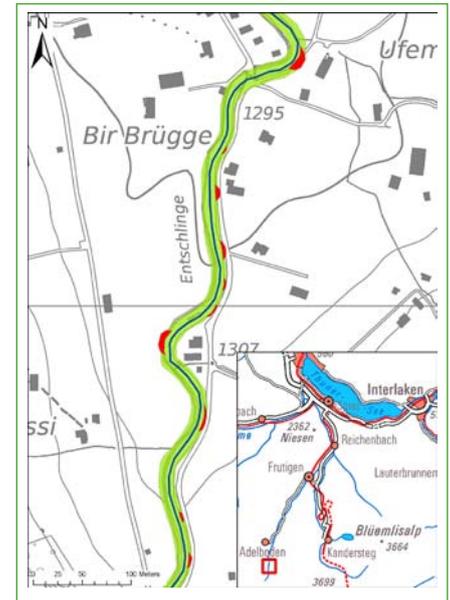


Abb. 6: Erosionsstellen vom Hochwasser 1987 an der Entschlinge sind rot und der Puffer für das Erosionsausmass grün dargestellt

Karten: Digitaler Übersichtsplan UP5 © Amt für Geoinformation des Kantons Bern, OEKOMORF © Gewässer- und Bodenschutzlabor des Kantons Bern. Eigene Darstellung.

deren Beschreibung mit einzelnen Parametern schwierig ist. Allerdings ist es im Hinblick auf die Gefahrenkartierung unablässig eine Vorstellung der möglichen Intensität zu haben.

Literatur

LOAT R., PETRASCHECK A. (1997) *Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten*. Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Bundesamt für Raumplanung (BRP), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Biel

KRAPESCH G., HAUER C., HABERSACK H. (2011) *Scale orientated analysis of river width changes due to extreme flood hazards*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 2137-2147.

MAGILLIGAN F.J. (1992) *Thresholds and the spatial variability of flood power during extreme floods*. Geomorphology, 5. S.: 373-390.

Methodik zur Modellierung der Ufererosion basierend auf 2D-Überflutungsmodellierungen

Rolf Bart (Ingenieure Bart AG, St. Gallen, rolf@bart.ch)

Problemstellung

Die Überschwemmungen 2005 waren verschiedentlich durch grössere Ufererosionen begleitet. Die ungewöhnlich lange Dauer der Hochwasserabflüsse wurde als einer der wesentlichen Gründe für die Ufererosionen erkannt. Bis dahin wurde die Ufererosion nicht wie die übrigen Gefahrenprozesse systematisch bearbeitet. Es ist schwierig den Prozess hinsichtlich Intensität und räumlicher Ausdehnung zu bestimmen. Die häufigsten Beispiele sind eher kleinräumig und erscheinen im Vergleich zu den auslösenden Hochwasserabflüssen meist von untergeordneter Gesamtbedeutung. Letzteres ist neben der Kleinräumigkeit auch eine Folge der kleinen räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit. Bauwerken, die von Ufererosion betroffen werden, droht jedoch die Zerstörung, was dem Prozess entsprechende Bedeutung verleiht.

Prozess

Die hier vorgestellte Methodik behandelt die Ufererosion als Gefahrenprozess, der einen begrenzten Uferbereich durch Hochwasserabflüsse bei einem Ereignis abträgt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Abflussvorgänge im Gerinne selbst und dessen unmittelbar angrenzender Überflutungsbereich entscheidend sind. Die nachfolgenden Bilder stammen alle von der Kleinen Emme zwischen Werthenstein und Emmen, aufgenommen nach dem Hochwasser von 2005. Die Fotos zeigen unterschiedliche Formen der Ufererosion.

Ansatz

Aus Sicht der Gefährdung interessiert der Verlust an Boden im Uferbereich. Die Kenntnisse zu den genauen Vorgängen interessieren iso



Abb. 1: Typische Erscheinung der Ufererosion, die stark im Einflussbereich des Gerinnes liegt. Die Abtragtiefe nimmt gegen aussen ab. Die Rückgreiftiefe liegt im Ausmass der Gerinnebreite. Am äusseren Rand wäre ein Gebäude noch kaum gefährdet, da die Erosionstiefe zu gering ist.



Abb. 2: Bei langen, geneigten Uferböschungen geht die Ufererosion oft fliessend in Uferferrutschung über. Die Methodik erfasst die Uferferrutschungen nicht korrekt.



Abb. 3: Ufererosionen treten immer wieder hinter resp. neben Verbauungen auf. Dabei sind hydraulische Belastungen massgebend, die hoch am Ufer oder im Überflutungstreifen direkt neben dem Gerinne angreifen.



Abb. 4: Die Einsturzgefahr eines Gebäudes hängt von der Abtragshöhe (Erosionstiefe) ab. Die Rückgreiftiefe begrenzt den Wirkungsraum des Gefahrenprozesses.



Abb. 5: In diesem Fall war die Erosionstiefe so hoch, dass das Gebäude einstürzte.

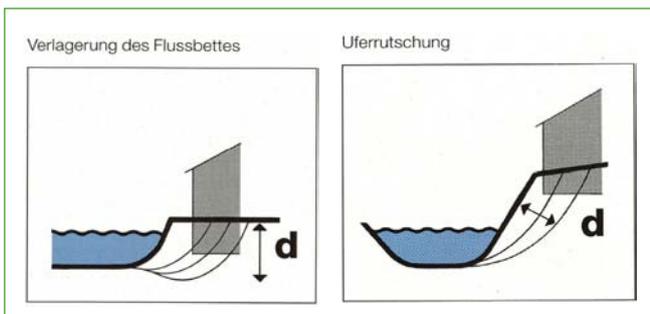


Abb. 6: aus der Bundesempfehlung [1], Unterscheidung zwischen Ufererosion und Uferrutschung. Wesentlich ist, dass die Intensität mit der Erosionstiefe erfasst wird. Die beiden Beispiele der Gebäude in den Abb. 4 und 5 unterstreichen die Richtigkeit dieses Vorschlages.

Jährlichkeit	30	100	300
Einzugsgebiet in km2			
<0,5	3 m	4 m	5 m
0,5 bis 1	5 m	7 m	9 m
1 bis 5	7 m	10 m	13 m
5 bis 20	9 m	13 m	17 m
20 bis 200	11 m	16 m	21 m
>200	13 m	19 m	25 m

Tab. 1: Rückgreiftiefe in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße und der Jährlichkeit

fern, als sie helfen, gute Gefahrenabklärungen zu erstellen. Die Methodik stellt auf folgende Feststellungen und Beobachtungen ab:

- Eine massgebende hydraulische Grösse ist die Schleppspannung. Sie wird als indirektes Mass für die Intensität der Erosion verwendet (d bei Verlagerung Flussbett in Abb. 6).
- Die Rückgreiftiefe (Distanz von der Uferkante vor Ereignis zu jener nach Ereignis) ist vor allem von der Dauer der hohen Beanspruchung abhängig.
- Der Erosionswiderstand kann die Rückgreiftiefe oder Intensität begrenzen
- Wesentliche Erosionsschäden (z.B. Kleine Emme 2005) können auch in hohen Bereichen der Böschungen oder unmittelbar neben dem Gerinne ihren Anfang finden. Diese Form der Erosion soll mit erfasst werden (vgl. Abb. 7).

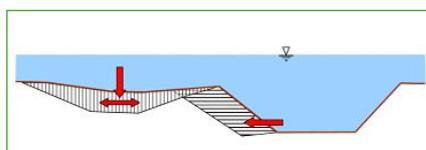


Abb. 6: Die Schleppspannungen wird im Gerinne und im gerinnenahen Überflutungsbereich ermittelt und verwendet.

Vorgehen

Aus der Überflutungsmodellierung sind die Fliesstiefen, Fließgeschwindigkeiten sowie die Rauigkeiten in Gerinne und Überflutungsfläche bekannt. Die Schleppspannung ergibt sich aus:

$$J_E = \frac{v^2}{k_{St}^2 \cdot h^{4/3}}$$

J_E : Energiegefälle(-)
 v : Fließgeschwindigkeit(m/s)
 k_{St} : Rauigkeitsbeiwert, nach Strickler(m^{0.5}/s)
 h : Fliesstiefe(m)

Statt des hydraulischen Radius wird die Fliesstiefe verwendet, da bei den interessierenden Extremabflüssen die Wasserspiegelbreite im Verhältnis zur Fliesstiefe gross ist. Zur Berechnung der Schleppspannung fehlt noch das Energiegefälle. Dieses wird nach Strickler berechnet, wobei auch hier der hy-

draulische Radius durch die Fliesstiefe ersetzt wird.

$$\tau = \gamma \cdot h \cdot J_E$$

τ : Schleppspannung (N/m^2)
 γ : Wichte (N/m^3)
 h : Fliesstiefe (m)
 J_E : Energiegefälle (-)

Damit kann die Schleppspannung als eine der zentralen Grössen aus den Überflutungsmodellierungen gerechnet werden. Die Rückgreiftiefe wird nach einer gutachterlichen Schätzung in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgrösse bestimmt. In kleinen Einzugsgebieten treten kurze Ganglinien auf, in grossen lange. Damit wird die Belastungsdauer auf einfache Art in der Tendenz richtig berücksichtigt.

Die Schleppspannungen werden direkt in Intensitäten der Ufererosion umgesetzt. Der Sohlenbereich wird im Endergebnis gelöscht.

Wertung

Details fliessen namentlich über das DTM, die Hydraulik und die Gewässeraufnahmen in die Methodik ein. Die hydraulischen Abklärungen bilden direkte Grundlage, was die Methodik sehr effizient gestaltet. Der Erosionswiderstand wird rein binär erfasst: entweder ist Erosion ausgeschlossen (Fels, Verbau) oder in vollem Ausmass möglich. Spezielle Effekte (Kurven, Brücken) werden gut erfasst, Details in den Ergebnissen sind jedoch nicht ohne weiteres selbsterklärend. Bodeneigenschaften, Bewuchs und Grundwassereinflüsse werden nicht berücksichtigt und die Methodik setzt hochauflösende 2D-Modellierungen voraus, welche Gerinne und Überflutungsgebiet vollständig erfassen. Die vorhandenen Ergebnisse sind vielversprechend, jedoch noch nicht ausreichend geprüft und erhärtet.

Literatur

[1] LOAT R., PETRASCHECKA. (1997) *Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten*. Bundesamt

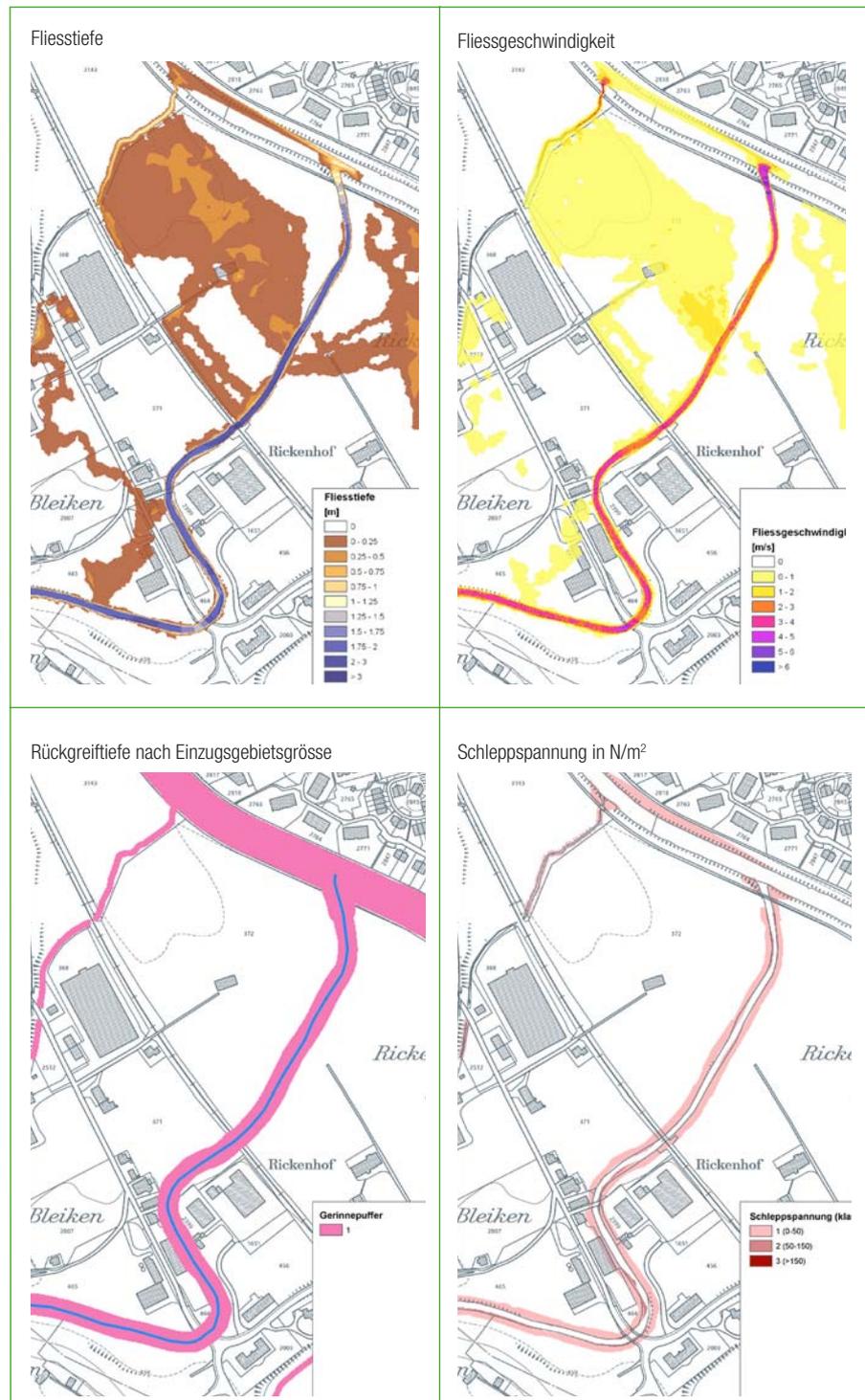


Abb. 7: Vorgehensschema am Beispiel für den Rickenbach bei Wattwil

für Wasserwirtschaft (BWW), Bundesamt für Raumplanung (BRP), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Biel

Méthode d'évaluation des surfaces exposées au danger d'effondrement en tête de falaise

Benoît Mazotti (Service des forêts et de la faune SFF, Fribourg, Benoit.Mazotti@fr.ch)

Définition

L'altération progressive d'un pan de falaise ou la rupture du sous-sol dans des formations rocheuses hydrosolubles (calcaires, gypses, cornieule) ou instables (roches molassiques sur le plateau) peut entraîner une déstabilisation des rebords de falaises et ainsi provoquer des effondrements et/ou des éboulements rocheux.

Contexte

Dans le cadre de la cartographie des dangers de type « instabilités » sur le plateau fribourgeois, les effondrements en bordure de falaise sont une thématique récurrente qui doit être prise en compte. Par exemple, une habitation à proximité de Fribourg a dû être abandonnée dans ce contexte en 2007. Étant donné l'absence de méthodologie établie pour apprécier ce problème, une réflexion a été menée dans ce sens. En effet, une analyse des processus « chutes » seule ne permet pas de décrire correctement le danger d'une éventuelle perte de stabilité du rebord de la falaise. Tout au long du mandat, les différents résultats ont permis de l'améliorer et la version la plus à jour est ici décrite.

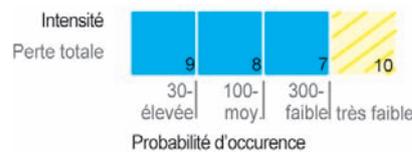
La méthode proposée tient compte principalement de falaises molassiques.

Objectifs et évaluation du danger

L'objectif de cette démarche est double :

- localiser les secteurs exposés ;
- permettre une prise en compte adéquate de ce danger dans l'aménagement du territoire.

En analogie avec la recommandation «Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain » (1997) pour le phénomène de dolines une seule intensité élevée associée à un niveau de danger moyen a été prise en compte. Cela se justifie en fonction de la marge d'erreur de l'évaluation et en fonction de la faible probabilité d'occurrence du processus d'effondrement abrupte. Trois scénarios doivent être établis pour les temps de retour de 30, 100 et 300 ans.



Sur tous les rebords étudiés, une largeur minimale de 5 m est associée à ce processus.

Caractéristiques morphologiques des falaises du plateau fribourgeois

Sur le plateau fribourgeois, les observations de terrain montrent que les falaises sont généralement constituées de haut en bas des parties suivantes :

- d'une couche d'altération composée de sédiments quaternaires et d'une couche de molasse altérée (h) ;
- d'une *ligne critique* (lc) qui marque la limite sommitale d'aplomb à la falaise sous la couche d'altération ;
- de molasse saine (rocher) (hF).

Dynamique du processus

La caractérisation des principales spécificités de ce processus a permis de mettre en place

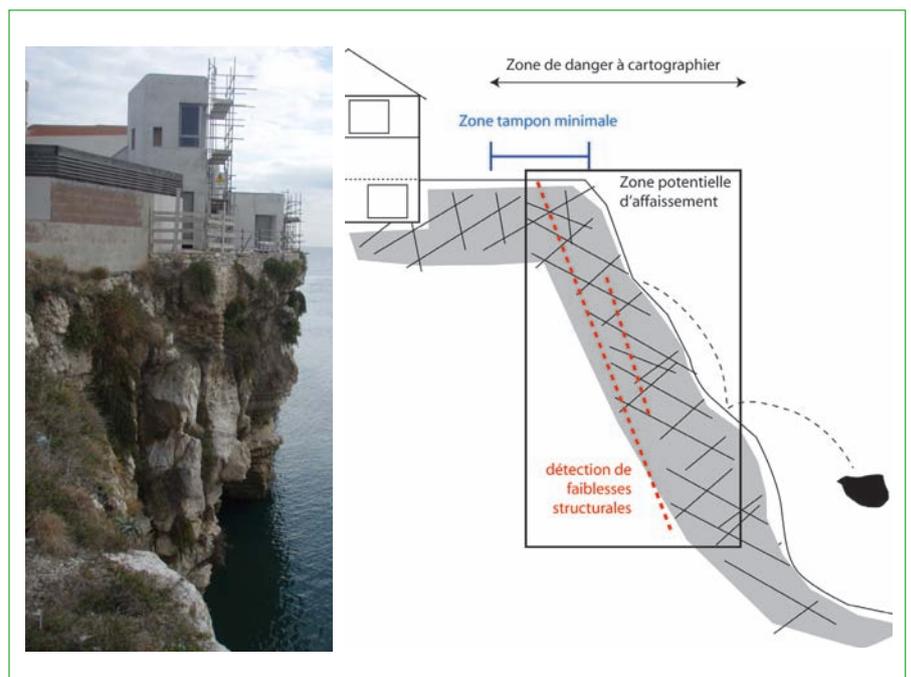


Fig. 1: Illustration d'un cas de figure que cette méthodologie vise à éviter. (Photo W. Eyer, Vieste, Italie)

une méthodologie d'analyse qui se rapproche le plus possible de la réalité.

Types d'altération

Les types d'altération suivants ont été identifiés comme prépondérant :

- érosion directe liée à l'eau ;
- altération superficielle de la roche (chimique, vent, température, etc.) ;
- déstabilisation due à la végétation (poids des arbres ou racines par exemple) ;
- soucavement en pied de falaise par érosion fluviale (création de surplombs) ;
- soucavement différentiel des niveaux plus tendres de la molasse.

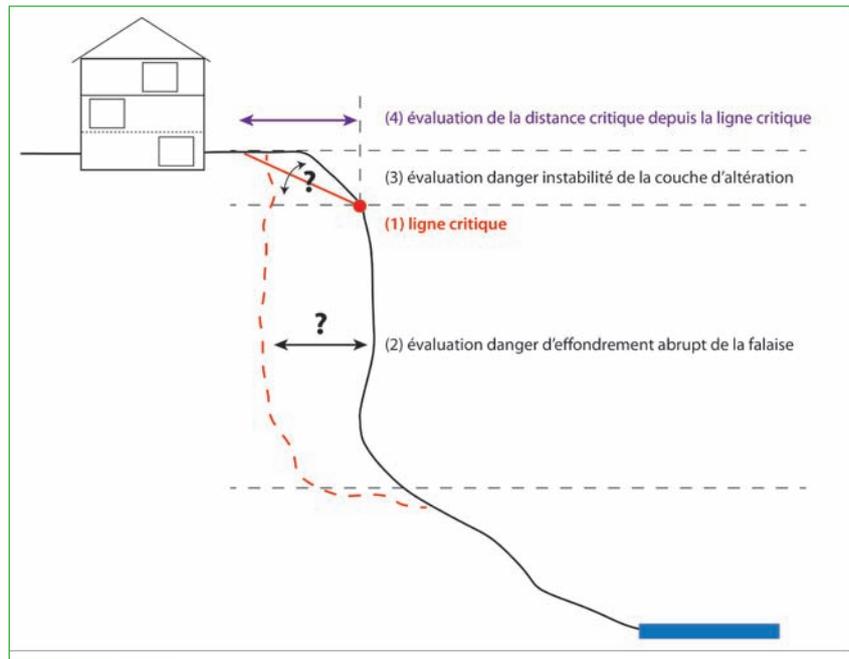


Fig. 2: Illustration des différentes évaluations du danger d'effondrement qui doivent être effectuées.

Mécanismes d'effondrement

Deux mécanismes d'effondrement ont été identifiés et sont analysés dans cette méthodologie :

- les mécanismes d'effondrements abrupts de la falaise ;
- les mécanismes de déstabilisation de la couche d'altération en amont de falaises (glissement de terrain meuble ou rocheux selon une pente critique définie par la cohésion du sol ou déstabilisation de la couche d'altération suite à l'effondrement d'une partie de la falaise par exemple). À noter qu'en cas d'occurrence de ce type de processus, l'ensemble des matériaux se retrouveront en aval de la falaise puisque rien ne peut les retenir.

Méthodologie d'estimation du danger d'effondrement rocheux en bordure de falaise

À partir des observations pratiques de ce processus, une méthodologie en quatre étapes a été mise en place (cf Figure 3). Grâce à une combinaison entre SIG et analyse de terrain,

Méthodologie - Analyse danger effondrement - FR			
Étapes	But	Analyse	
(1)	acquisition des données de base <i>Geodatabase</i> <i>Étape cruciale</i>	déterminer le ligne critique (l_c) de la falaise. La l_c correspond à la limite sommitale d'aplomb à la falaise, sous la couche d'altération. déterminer l'épaisseur de la couche d'altération h [m]	
(2)	évaluation de la distance critique (d_1) pour les mécanismes d'effondrement abrupts liés à la paroi / falaise	la distance critique d_1 est définie selon : Analyse de la stabilité de la falaise à partir de plusieurs critères	
		Occurrence [ans]	300
		Critères d'analyse	- présence de fissuration - présence de surplomb - qualité de la roche (typologie) - hauteur falaise (hF) - stratification roche
		Distance (d_1) [m]	5 / 10 / 15 / 20 / *autre valeur
* Critères d'analyse exceptionnels justifiant une distance $d_1 > 20$ m			
Conditions d'analyse			
si $h > 10$ m, passer directement à l'étape (4) et le potentiel de glissements spontanés doit être évalué pour la couche d'altération			
si $h < 10$ m, passer à l'étape (3)			
(3)	évaluation de la distance critique (d_2) pour les instabilités liées à la couche d'altération au-dessus de la falaise	la distance critique d_2 est définie en fonction des pentes limites suivantes établies depuis la ligne critique :	
		Occurrence [ans]	30 100 300
		Pente limite [-]	1 : 1 2 : 3 1 : 2
(4)	évaluation de la distance critique (d) pour les deux types de processus	Occurrences	Évaluation de la distance critique (d)
		30, 100 et 300 ans	Cas où $h < 10$ m : C'est la valeur d_1 ou d_2 la plus élevée qui est prise en compte pour cette évaluation
		300 ans	Cas où $h > 10$ m : C'est la valeur d_1 qui est prise en compte

Fig. 3: Méthodologie en quatre étapes d'estimation du danger d'effondrement rocheux en bordure de falaise.

elle permet de tenir compte des conditions locales tout en restant généralisable à la grande partie des falaises fribourgeoises. Le principe consiste à estimer une distance critique (d) pour le *danger d'effondrement* depuis le rebord de falaise (ligne critique) pour les trois temps de retour standardisés au niveau Suisse (30, 100 et 300 ans).

(1) Acquisition des données de base (SIG)

Cette 1^{ère} étape est cruciale car déterminante dans l'estimation de ce danger. Il s'agit d'identifier la ligne critique (l_c) de la falaise et d'estimer l'épaisseur de la couche d'altération (h), tous deux sur SIG. Cet élément assure la transparence de la démarche.

(2) Mécanisme d'effondrement abrupt (analyse de terrain)

L'évaluation du mécanisme d'effondrement abrupt fait appel à la détection sur le terrain de faiblesses structurales des falaises étudiées (présence de fissuration, présence de surplomb, qualité de la roche, hauteur de la falaise (h_f), autres). Les observations de terrain servent à établir un scénario d'événement extrême (300 ans). L'expert évalue la distance critique (d_1).

Occurrence [ans]	300
Critères	présence de fissuration, présence de surplomb, qualité de la roche, hauteur de la falaise (h_f), autres
Distance critique (d_1)	5m / 10m / 15m / 20m / * autre valeur (cas exceptionnel)

Tab. 1: Critères d'évaluation du danger d'effondrement abrupt.

(3) Déstabilisation de la couche d'altération en amont de falaises (SIG)

La distance critique (d_2) est évaluée à partir de pentes limites forfaitaires établies depuis la ligne critique de la falaise.

Occurrence [ans]	30	100	100
Pente limite (d_2)	1 : 1	2 : 3	1 : 2

Tab. 2: Évaluation du danger de déstabilisation de la couche d'altération.

C'est une étape qui est effectuée de manière semi-automatique sur SIG.

(4) Évaluation de la distance critique

Les distances d_1 et d_2 évaluées lors des étapes (2) et (3) sont confrontés dans cette dernière étape pour les scénarios à 30, 100 et 300 ans. Il s'agit d'établir une distance critique depuis la ligne critique qui prend en compte les deux types d'instabilités :

Occurrences	Hauteur h	Évaluation de la distance critique (d)
30 et 100 ans	Cas où $h < 10$ m *	C'est la valeur d_1 qui est prise en compte pour cette évaluation. (effondrement abrupt)
300 ans	Cas où $h < 10$ m *	C'est la valeur d_1 ou d_2 , la plus élevée qui est prise en compte pour cette évaluation. (effondrement abrupts ou déstabilisation de la couche d'altération)
300 ans	Cas où $h > 10$ m *	C'est la valeur d_1 qui est prise en compte pour cette évaluation. (effondrement abrupt). Dans ce cas de figure, l'analyse du danger pour la couche d'altération doit se faire selon les processus glissements.

* Cette valeur n'est pas encore établie définitivement.

Tab. 3: Évaluation du danger d'effondrement.

Au final, il est possible de cartographier de manière automatique sur SIG les secteurs de danger *effondrement* pour chaque scénario en fonction des distances critique d .

Développements futurs

Cette méthodologie a été testée dans le cad-

re de la création des cartes de dangers du plateau fribourgeois. Les étapes ou critères d'analyses qui ont posés problème ont été identifiés par les bureaux mandatés et la direction du projet.

Les premières expériences effectuées ont déjà permis de modifier la méthodologie présentée dans ce document et de dégager quelques améliorations qui devront être apportées :

- Il s'est avéré que les distances critiques obtenues à l'étape (3) étaient surestimées dans les cas où h était supérieur à 10-20 mètres. C'est pourquoi plusieurs pentes forfaitaires ont finalement été retenues pour évaluer la distance critique dans ce contexte de danger. Lorsque cette épaisseur dépasse 10-20 mètres, il s'agit plutôt de processus de type glissements qui doivent être évalués selon la matrice correspondante.
- En fonction de paramètres différents pour des scénarios adjacents, le résultat peut donner des incohérences spatiales dans la délimitation des périmètres d'intensités. Des règles de cartographie devront être établies afin d'éviter toute incohérence (cf. Figure 4). Toutefois, la méthodologie actuelle permet une correction manuelle après le traitement automatique.
- La localisation de la ligne critique n'obéit pour l'instant à aucun critère précis. Elle est établie à partir des cartes topogra-

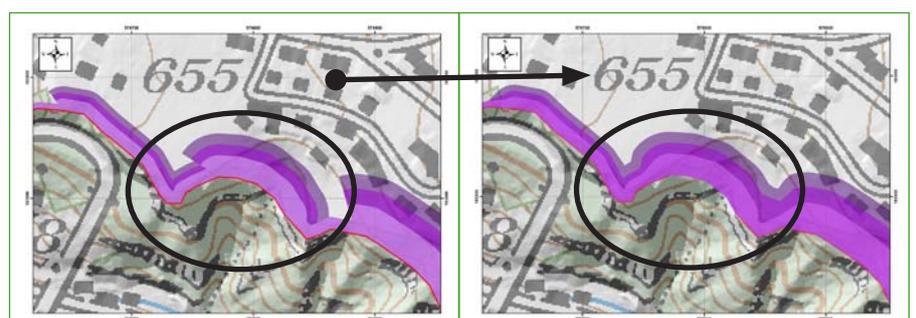


Fig. 4: Exemple d'une incohérence avec correction manuelle. (Modifié d'après les résultats de Geotechnisches Institut)

phiques, des MNT ou des orthophotos. Il faudrait donc établir des critères de localisation.

- La méthodologie devra être testée et adaptée si nécessaire pour qu'elle puisse être appliquée à d'autres contextes géologiques.

Discussion

La méthodologie présentée est le résultat d'une collaboration entre les bureaux privés (Böhringer AG, Geotechnisches Institut AG et CSD SA (Fribourg) mandatés et les services

étatiques spécialisés du canton de Fribourg (SFF, SeCA). Ses quatre étapes permettent d'évaluer les différents processus liés à la déstabilisation des rebords de falaises alliant expertises de terrain et analyses SIG. La notion de ligne critique est un paramètre clé dans cette démarche et permet de délimiter clairement les distances critiques par rapport à la falaise tout en garantissant un maximum de transparence.

Le potentiel d'effondrement d'une falaise est logiquement associé à une intensité élevée et l'évaluation se fait pour un scénario très rare

(300 ans). L'établissement de trois scénarios d'événements (30, 100 et 300 ans) associé à la perte de stabilité de la couche d'altération directement en amont de la falaise permet d'affiner encore plus cette analyse.

Zusammenfassung: Umgang mit dem Gefahrenprozess «Absturz an Felskanten»

Die Gefahrenhinweiskarte des Kantons Freiburg weist den Randbereich (Abbruchgebiet) oberhalb von Kanten an meist horizontal geschichteten Felsformationen als „stein-, block- oder felssturzgefährdet“ aus, obwohl hier keinerlei Impact von Blöcken möglich ist und keine Intensität in Form von Energie ausgewiesen werden kann. Vielmehr besteht die Gefährdung in Form eines Verlusts des Baugrunds infolge eines Absturzes, analog zu der Einsturzgefahr z.B. in Karstgebieten. Im Jahr 2007 musste aufgrund dieses Gefährdungsbildes ein Wohnhaus aufgegeben werden.

Im Rahmen der Detailanalysen für den Prozess Instabilitäten wurde im Kanton Freiburg eine einfache Methode vorgeschlagen, welche den Umgang mit diesem Prozess klärt. Diese Methode, hauptsächlich ausgelegt auf den Kontext von Sedimentgesteinen im Mittelland, kann noch verbessert und weiter entwickelt werden.

Der Ansatz sieht wie folgt aus:

- a) Festlegung eines kritischen Punkts (im Profil) resp. einer Linie (in der Situation).
- b) Festlegung einer maximalen Mäch-

tigkeit (Distanz ab kritischem Punkt) eines Absturzes, normalerweise mit einer Abstufung von 5 / 10/ 15 /20 m. Wegen der Schwierigkeit einer solchen Ansprache wird auf eine Unterscheidung verschiedener Eintretenswahrscheinlichkeiten verzichtet, nur das sehr seltene Ereignis ist massgebend. Eine argumentierte Abweichung von diesen Standardwerten ist möglich.

- c) Falls eine Lockermaterialauflage auf dem Fels besteht, kann diese vom gleichen Prozess betroffen sein. Die potenzielle Instabilität dieser Schicht im Randbereich kann mit verschiedenen Eintretenswahrscheinlichkeiten beschrieben werden. Die Methode schlägt dafür pauschale Winkel vom kritischen Punkt weg von 1:1 (Szenario 30.j.), 2:3 (Szenario 100.j.) und 1:2 (Szenario 300.j.) vor.

Der grössere Wert der beiden Ansprachen wird für die Szenarien resp. für die Abgrenzung des gefährdeten Bereichs zurückbehalten. In allen Fällen ist nur die Intensität „hoch“ möglich.

Die Empfehlung „Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten, 1997“ sieht für den ähnlichen Prozess „Absenkung, Einsturz“ einzig eine mittlere Intensität vor („Dolinen vorhanden“), was in einer mittleren Gefährdung resultiert. Analog zu diesem Ansatz wird die hohe Intensität mit der Gefahrenstufe „mittel“ verbunden. Dies ist in erster Linie begründet mit der Schwierigkeit der fachlichen Ansprache und der geringen Eintretenswahrscheinlichkeit.

Eine Schwäche der Methode hat sich gezeigt bei der laufenden Bearbeitung der Gefahrenkarten. Bei mächtigen Lockermaterialauflagen führt der pauschale Ansatz (Festlegung eines Winkels ab einem kritischem Punkt) zu einer sehr konservativen Erfassung eines gefährdeten Bereichs, welche kritisch hinterfragt sein muss. Die einfachste Lösung könnte darin bestehen, bei grösseren Mächtigkeiten einen Prozesswechsel hin zu den klassischen Rutschprozessen vorzusehen. Im Übrigen führt die Methodik zu plausiblen und gut in die Raumplanung umsetzbaren Resultaten.

Methodenentwurf Gefahrenbeurteilung an Geländekanten

Patrizia Köpfl (Louis Ingenieurgeologie GmbH, Weggis, patrizia.koepfli@louis-weggis.ch)
 Dr. Klaus Louis, (Louis Ingenieurgeologie GmbH, Weggis, klaus.louis@louis-weggis.ch)
 Rolf Bart (Ingenieure Bart AG, St. Gallen; Koreferent)

Ausgangslage, Veranlassung

Verschiedentlich verlaufen die Grenzen von Gefahrenkartenperimetern entlang von Geländekanten. An solchen Orten entstehen Naturgefahrenprozesse in der Regel ab der Hangkante abwärts und wirken auch in diese Richtung, also weg vom zu untersuchenden Perimeter. Es kann dabei der erste Eindruck entstehen, der Verzicht auf die Abklärung der Gefährdung könne unbesehen verantwortet werden.

Bei der Gefahrenkarten-Erstellung im Kanton St. Gallen und speziell im Teilgebiet 8 (Alltoggenburg) wurde offensichtlich, dass derartigen Geländekanten eine besondere Bedeutung beizumessen ist und dass die Vorgehensweise bei der Beurteilung nicht klar ist. Speziell in der Gemeinde Lütisburg, aber auch an anderen Stellen, sind sehr steile bis senkrechte Uferabschnitte bekannt, in welchen von der Geländekante abgewandte Gefahrenprozesse für den Gefahrenkarten-Perimeter relevant werden.

Nachfolgend soll aufgezeigt werden, wann solche von der Geländekante abgewandte Gefahrenprozesse für den Perimeter relevant

werden, unter welcher Prozessart diese einzuordnen sind und welche Vorgehensweisen bei der Gefahrenbeurteilung einzuhalten sind (bezüglich Wegleitung Gefahrenkarten Kanton St. Gallen und Bundesempfehlungen).

Grundsätze, Empfehlungen

Die nachfolgend aufgeführten Empfehlungen für die üblichen Abklärungen im Rahmen der Naturgefahrenanalysen sollen auch bei Gefährdungen an Geländekanten berücksichtigt werden.

- Es gilt der Betrachtungsmaßstab von 1:5'000.
- Die minimale Grösse und Darstellbarkeit der gefährdeten Flächen unterliegen auch hier dem Datenmodell (100 m²).
- Es wird die aktuelle Situation beurteilt und nicht eine Prognose der künftigen Landschaftsentwicklung.
- Es werden keine neuen Gefahrenprozesse definiert, sondern die Beurteilungskriterien von bestehenden Prozessen sind den speziellen Fragestellungen anzupassen.

- Die Beurteilung unter dem Titel „Naturgefahren“ darf nicht als Vehikel für anderweitig motivierte Entscheide missbraucht werden.

Prozessarten der Gefährdungen an Geländekanten

Entlang einer steilen Geländekante können sich unterschiedliche Prozesse auslösen. Der Prozess, der auf die Geländekante sowie auf Objekte entlang dieser einwirkt, ist Einsturz. Gemäss Bundesempfehlungen wird Einsturz wie folgt definiert:

„Absenkungs- und Einsturzphänomene sind im Zusammenhang mit der Auslaugung eines löslichen Untergrundes oder infolge unterirdischer Hohlräume zu beachten. Typische Erscheinungsformen sind Dolinen.“

Die Intensität von Absenkungs- und Einsturzphänomenen wird anhand der Fläche des Einsturztrichters und der Einsturztiefe beurteilt. Diese Beurteilungskriterien können aber nicht in jedem Fall für Einsturzprozesse an Geländekanten angewendet werden. Es müssen demnach zusätzliche Beurteilungskriterien von Rutsch- bzw. Sturzprozessen

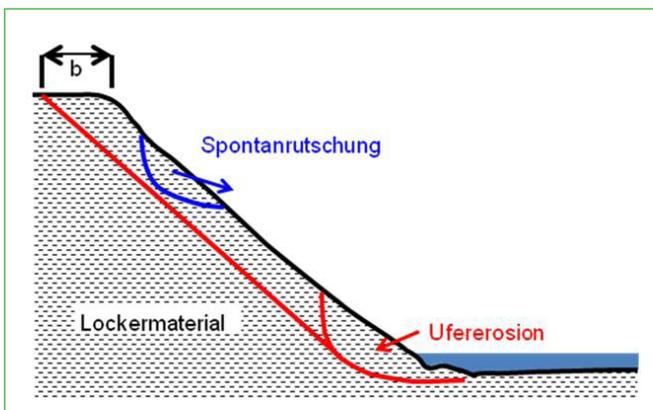


Abb. 1: Destabilisierung der Böschung durch Ufererosion und Spontanrutschungen

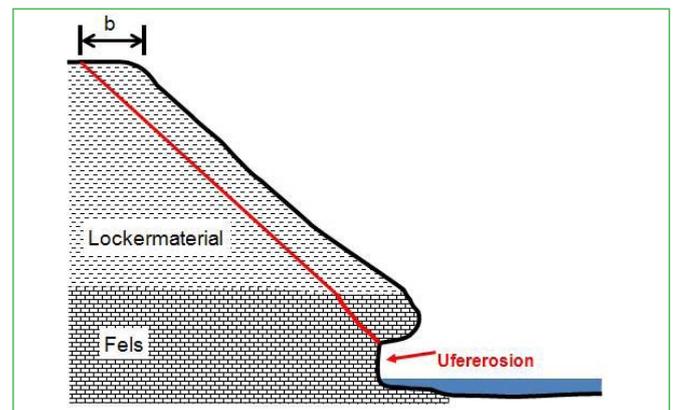


Abb. 2: Destabilisierung der Böschung durch Sturzprozesse mit nachfolgendem Nachrutschen von Lockermaterial

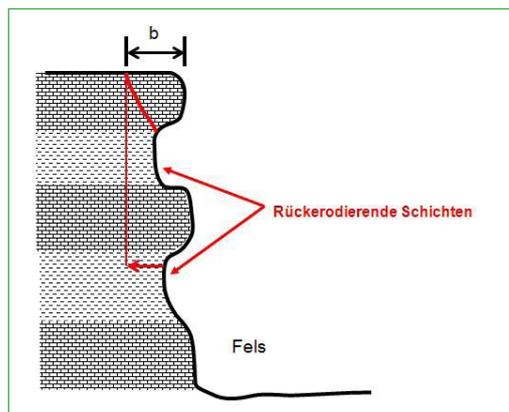


Abb. 3: Einsturz an der Geländekante durch Sturzprozesse in der Felsböschung unterhalb der Geländekante



Abb. 4: Die Geländekante unter diesem Haus hat sich deutlich abgesenkt. Der Einflussbereich 'b' ist jedoch kleiner als 5 m. Das Haus ist eindeutig einsturzgefährdet

beigezogen werden.

Nachfolgend sind die für die Geländekante relevanten Prozesse beschrieben.

Rutschprozesse

Bei diesem Typ ist Spontanrutschung der Prozess, welcher an der Hangkante wirkt. Die Art der Auslösung ist grundsätzlich unerheblich und für die Beurteilung der Intensität gilt der Prozess der Spontanrutschung. Dazu zählen auch durch Ufererosion ausgelöste Destabilisierungen der Böschung (Abb. 1).

Als Rutschprozess gilt auch, wenn eine Felsböschung durch Erosion am Hangfuss destabilisiert wird, einstürzt und das aufliegende Lockermaterial nachrutscht (Abb. 2).

Sturzprozesse

Besteht die Geländekante durchgehend aus Fels, können durch rückerozierende Schichten Überhänge oder Hohlräume entstehen. Unterschnittene Schichtköpfe oder Felsnasen können durch fortschreitende Verwitterung entlang von Trennflächengefügen abbrechen. Je nach Lage des Abbruchs an der Felswand kann es zum Einsturz der Geländekante kommen (Abb. 3).

Da im konkreten Fall Transit und Ablagerung

nicht von Interesse sind, gilt der Prozess nicht als Sturz, sondern als Einsturz, wenngleich es sich dabei nicht um einen eigentlichen Einsturz gemäss Bundesempfehlungen handelt.

Vorgehen

Gefahrenerkennung

An erster Stelle steht die Gefahrenerkennung mit der Ereignisdokumentation und der Geländeanalyse. Beobachtungen, die auf eine bestehende Gefahr an Geländekanten hindeuten, werden erfasst (stumme Zeugen, relevante Spuren, morphologische Merkmale). Die Abklärungen der geomorphologischen, geologischen, geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse bilden die Grundlage für die Gefahrenbeurteilung.

In Lütisburg SG gibt es deutliche Spuren von Naturgefahrenprozessen entlang von Geländekanten. Örtlich sind die Geländekanten gegenüber dem umliegenden Terrain deutlich abgesenkt und an mehreren Häusern sind durch diese Absenkung Risse entstanden (Abb. 4). Bei einigen Fällen wurden bereits geotechnische Untersuchungen durchgeführt und/oder bauliche Massnahmen gegen Ufererosion und Spontanrutschungen umgesetzt.

Gefahrenbeurteilung

Anhand der bestehenden Phänomene und dokumentierten Ereignissen eingestürzter Geländekanten sowie den vorhandenen geologischen und geomorphologischen Verhältnissen wird der Einflussbereich 'b' (vgl. Abbildungen 1-3) der Prozesse an der Geländekante ermittelt. Die Gefährdung an Hangkanten wird nur dann ausgeschieden, wenn die gefährdete Fläche mindestens 5 m in den Perimeter hineinreicht. Dies entspricht in der Kartendarstellung 1: 5'000 einem Millimeter, was als minimal darstellbare und lesbare Fläche betrachtet wird. Der effektive Verlauf der Geländekante bezüglich des Perimeterrandes muss so genau als möglich dargestellt werden, da ansonsten Gefahrenbereiche fälschlicherweise ganz wegfallen und folglich keine Beachtung finden würden.

Das Ausmass der Gefährdung von Spontanrutschungen wird anhand des mutmasslich langfristig stabilen Böschungswinkels ermittelt. Dieser variiert je nach Art des vorhandenen Lockermaterials.

Bei Sturzprozessen sind die potentiellen Ausbruch- und Einsturzvolumina massgebend für die Szenarienbildung.

Die Eintretenswahrscheinlichkeiten werden

nach den in den Bundesempfehlungen gängigen Wahrscheinlichkeitsklassen bestimmt. Im Kanton St. Gallen wird die Restgefährdung nur bei der Prozessart Überschwemmung ausgedehnt. Bei Prozessen an Hangkanten können Eintretenswahrscheinlichkeiten $P \leq 0.0033$ folglich vernachlässigt werden.

Wirkungsanalyse

Der bei der Szenarienbildung ermittelte Einflussbereich des Prozesses an der Hangkante sowie die Eintretenswahrscheinlichkeiten ergeben die entsprechende Gefährdung.

Bei Spontanrutschungen ist der Einflussbereich ,b' (vgl. Abbildungen 1-3) für die Beurteilung der Intensitäten massgebend. Die Intensität von Spontanrutschungen an Hangkanten wird also immer stark, wenn man berücksichtigt, dass Gefährdungen an Hangkanten nur dann ausgedehnt werden, wenn die Breite ,b' mindestens 5 m misst. Dies ergibt in jedem Fall erhebliche Gefährdung und deshalb rotes Gefahrengelände.

Bei Einsturz infolge von Sturzprozessen ist nicht der Einflussbereich ,b' massgebend, sondern die Einsturztiefe. Ein Felspaket, wel-

ches durch Flusserosion unterhöhlt wird, kann sich bei Einsturz als Ganzes absetzen. Die Absenkung an der Geländekante hängt dabei von der Höhe des Hohlraumes ab und kann dementsprechend auch weniger als 0.5 m betragen. Diesbezüglich resultiert mittlere Intensität, da es gemäss Wegleitung des Kantons St. Gallen schwache Intensität bei Einsturz nicht gibt.

Zur Bestimmung der Intensität bei Einsturz muss jedoch noch die Beschaffenheit des Felsens mitberücksichtigt werden. Sobald sich ein Felspaket nicht nur absenkt, sondern auch auseinander bricht, erhält man sofort starke Intensität.

Entscheidend für die Aufnahme in die Gefahrenkarte bei Einsturz ist, wie bei Spontanrutschungen, der Einflussbereich ,b'.

Problemfälle / Spezialfälle

Probleme bei der Anwendung der vorgeschlagenen Methode können entstehen, wenn ein Gebäude direkt an der Geländekante steht, der Einflussbereich ,b' jedoch kleiner ist als 5 m. Ein solches Beispiel befindet sich an einem Haus in Lütisburg SG (Abb. 4). Die Ge-

ländekante unter dem Haus hat sich deutlich abgesenkt. Der Einflussbereich reicht aber nur 2.5 m in den Perimeter hinein, weshalb der Gefahrenbereich nicht in der Gefahrenkarte erscheinen würde. Dennoch ist die Hausmauer eindeutig (einsturz-)gefährdet. Auch wenn der einstürzende Bereich nur wenige Meter beträgt, wird das Haus auf jeden Fall unbewohnbar.

Solche Spezialfälle dürfen nicht einfach unberücksichtigt bleiben.

Umsetzung im Kanton St. Gallen

Die Umsetzung der Gefahrenbeurteilung an Geländekanten erfolgt strikt nach den Grundsätzen der Gefahrenbeurteilung. Sofern weitere Kriterien in die raumplanerische Umsetzung einfließen sollen, muss dies auf anderen Wegen geschehen. Es kann je nach Situation sinnvoll sein, einen zusätzlichen Abstand einzuhalten, der beispielsweise Landschaftsveränderungen in die Überlegungen einbezieht. Es ist jedoch nicht Aufgabe der Gefahrenbeurteilung, solche Kriterien mitzuliefern. Dazu sind die Gefahrenabklärungen nicht geeignet.

Modellierung Oberflächenabfluss

Methodik und Fallbeispiele

Andy Kipfer (geo7 AG, Bern, andy.kipfer@geo7.ch)

Ausgangslage

Unter Oberflächenabfluss wird gemäss Loat R., Meier E. (2003) der Teil des Niederschlags verstanden, welcher einem Vorfluter über die Bodenoberfläche unmittelbar zufliesst. In der Schweiz haben verschiedene Unwetterereignisse der letzten Jahre gezeigt, dass Oberflächenabfluss auf Hängen als Folge von Starkniederschlägen oder lang andauernden Niederschlagsereignissen zu grossen Schäden führen kann. Zwar werden durch diesen Prozess ausserhalb von Gebäuden kaum Personen gefährdet. Oberflächenabfluss führt aber immer wieder zu beträchtlichen Schäden an Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen. Innerhalb von Gebäuden (in ausgebauten Kellern, Untergeschossen etc.) können zudem auch Personen gefährdet werden. Mit Massnahmen entlang von Fließgewässern wird das Schadenrisiko häufig gezielt reduziert. Die Gefährdung durch Oberflächenabfluss erfolgt aber vielfach aus einer anderen Fließrichtung und kann deshalb andere, allenfalls ungeschützte Teile von Siedlungen resp. Gebäudehüllen betreffen.

Auswertungen zeigen, dass bis zu 50 % der durch Wasser verursachten Schadenfälle durch Oberflächenabfluss verursacht werden (vgl. z.B. Bezzola und Hegg, 2008). Im Ge-

fahrenkartierungsprozess wird Oberflächenabfluss in der Schweiz aber kaum berücksichtigt. Nur ein Teil der Kantone gibt Hinweise auf diesen Prozess. Dazu werden häufig Pfeilsignaturen oder eine Schraffur verwendet.

Grundlagen

Für die Modellierung des Oberflächenabflusses wird das Programm FloodAreaHPC verwendet. Dies ist ein hydrodynamisches Modell, welches unter anderem die Berechnung von Überschwemmungsbereichen aus einer Beregnung (flächige Einspeisung) über eine Niederschlagsganglinie ermöglicht. Dabei kann für jede Rasterzelle die Wasserzufuhr modifiziert werden (z.B. keine oder eine reduzierte Wasserzufuhr). Durch diese Reduktion kann beispielsweise eine mögliche Speicherwirkung des Bodens berücksichtigt werden. Die wichtigste Eingabegrösse ist ein hoch aufgelöstes Digitales Geländemodell (DTM), welches die Topografie der Erdoberfläche abbildet. Dazu wird das DTM-AV, resp. das SwissALTI3D, verwendet. Neben dem DTM wird eine Niederschlagsganglinie benötigt. Basierend auf dieser Ganglinie kann auf jede Rasterzelle des Geländemodells Wasser zugeführt werden. Die Ganglinie kann über einen Faktor für jede Rasterzelle angepasst

werden. Enthält eine Rasterzelle den Wert „0“, erfolgt keine Wasserzufuhr. Bei allen anderen Werten werden die Werte der Ganglinie mit dem entsprechenden Wert der Rasterzelle multipliziert.

Um differenziertere Modellresultate zu erhalten, werden zusätzlich Angaben zur Oberflächenbedeckung verwendet. Die Integration ins Modell erfolgt anschliessend über eine Anpassung der Niederschlagsganglinie. Das bedeutet, dass die Niederschlagsmenge für jede Rasterzelle um den Betrag reduziert wird, welcher an dieser Stelle im Boden gespeichert werden kann. So wird das Speicherungsvermögen des Bodens berücksichtigt. Es findet keine Modellierung der unterirdischen Wasserflüsse statt.

Methodik

Nachfolgend sind die Arbeitsschritte für die Durchführung einer Oberflächenabfluss-Modellierung aufgeführt:

1. Aufbereitung des Geländemodells.
2. Spezifizierung der Niederschlagsganglinie.
3. Gewichtete Klassifikation der Oberflächenbedeckung.
4. Bestimmung des Bodenspeichers unter

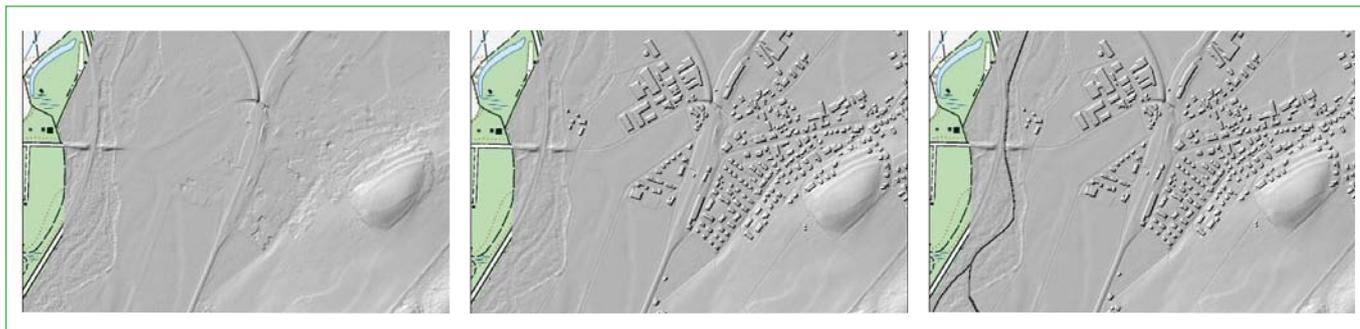


Abb. 1: Aufbereitung Geländemodell am Beispiel von Buswil (Gemeinde Lyss) (Quelle Kartengrundlage und DTM: Bundesamt für Landestopographie)

Berücksichtigung der Oberflächenbedeckung und des Gefälles.

5. Bestimmung der Oberflächenrauigkeit.
6. Modellierung und anschließende Generalisierung und Verifizierung des Resultats.

Die Aufbereitung des Geländemodells ist notwendig, damit bei der Modellierung ein möglichst optimales Resultat erzielt werden kann. Dazu gehören, neben der Elimination des Rauschens und weiterer Artefakte im DTM, insbesondere Anpassungen im Bereich von Gebäuden, Gewässerstrecken und Verkehrswegen (vgl. Abbildung 1). Falls entsprechende Daten vorhanden sind, werden auch Kleinstrukturen (freistehende Mauern etc.), welche die Fliesswege entscheidend beeinflussen können, in das Geländemodell integriert.

Das Niederschlagszenario wird für das gesamte Untersuchungsgebiet einheitlich festgelegt. Dazu wird, unter Berücksichtigung von realen Ereignissen, eine Niederschlagsganglinie bestimmt, welche die Dauer und Intensität des Ereignisses festlegt.

Als Grundlage für die Oberflächenbedeckung können Daten der Amtlichen Vermessung oder aus dem Vector25-Datensatz resp. von SwissTLM vom Bundesamt für Landestopographie verwendet werden. Basierend auf der gewählten Grundlage werden die verfügbaren Informationen über die Oberflächenbedeckung in generalisierten Oberflächentypen zusammengefasst.

Resultate

Bis anhin wurden im Auftrag des BAFU resp. der Gebäudeversicherung Zürich Modellierungen in vier unterschiedlichen Gebieten in der Schweiz durchgeführt: Langnau am Albis (Kt. ZH), Gebiet Lyssbach (Kt. BE), Region Heiden (Kt. AR) und Region Verbier (Kt. VS). Dort wo Vergleiche mit realen Ereignissen möglich sind, zeigen die Modellierungen eine sehr gute

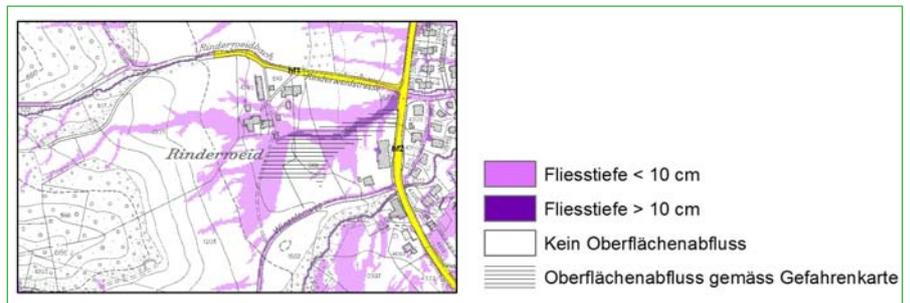


Abb. 2: Oberflächenabflussmodellierung in Langnau am Albis im Vergleich mit der Gefahrenkarte Wasser. (Quelle: geo7, 2009. Quelle Gefahrenkarte: Flussbau, geo7, 2010. Quelle Kartengrundlage: © Amt für Raumentwicklung des Kantons Zürich)

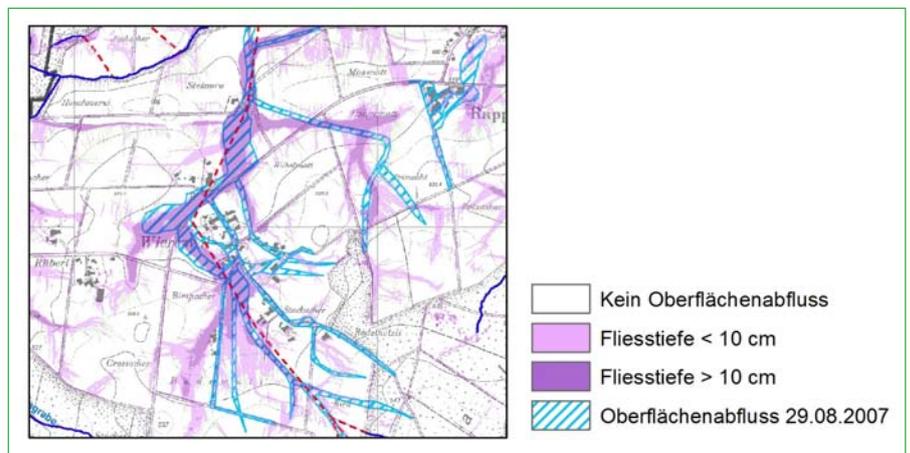


Abb. 3: Vergleich von Oberflächenabflussmodellierung mit kartierten Oberflächenabfluss-Prozessflächen vom Unwetterereignis vom 29.08.2007 im Gebiet Wierenzwil (Kanton Bern) (Quelle: geo7, 2010. Quelle Kartengrundlage: Geotest, Scherrer, 2008, UP5 © Amt für Geoinformation des Kantons Bern)

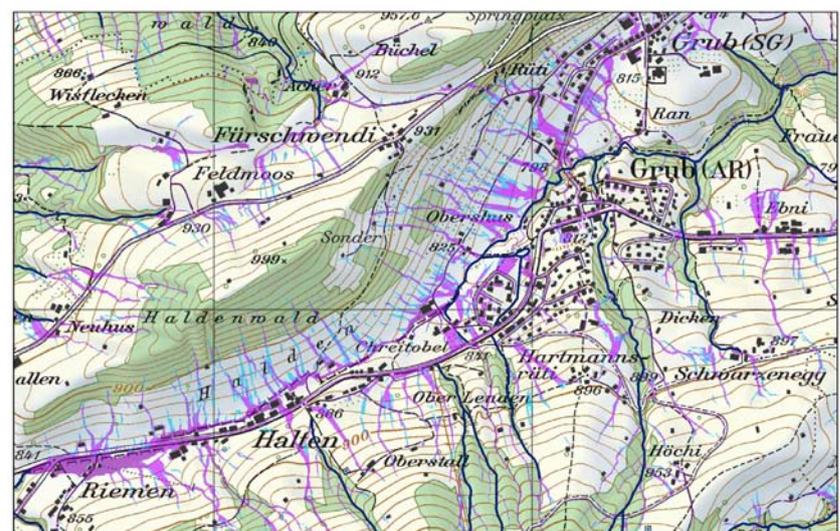


Abb. 4: Oberflächenabflussmodellierung bei Grub (Kanton Appenzell Ausserrhoden) (Quelle: geo7, in Vorb., Quelle Kartengrundlage: Bundesamt für Landestopographie)

Übereinstimmung mit den kartierten Überschwemmungsflächen.

Die Abbildungen 2 - 4 zeigen Ausschnitte der Modellierungen aus Langnau am Albis (Kt. ZH), Wieriezwil (bei Lyss, Kt. BE) und Grub (Kt. AR).

Anwendungen

Als mögliche Einsatzbereiche der Oberflächenabflussmodellierungen stehen folgende Themenkreise im Vordergrund:

- Hinweiskarte Oberflächenabfluss („Objektschutzkarte“): Eine Oberflächenabflusskarte kann einen Hinweis auf eine mögliche Gefährdung bringen. Bei diesem Gefahrenprozess können einfache Massnahmen sehr viel bewirken – wenn sie bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden. Das Modellresultat ist aber auf jeden Fall im Gelände zu überprüfen und besitzt nicht die Aussagegenauigkeit einer Gefahrenkarte.
- Ergänzung zur Gefahrenkarte Hochwasser: Es können mit einem einfachen Verfahren potenziell gefährdete Gebiete erkannt werden, welche bis jetzt kaum

durch Gefahrenkarten abgedeckt sind. Das Verfahren ist objektiv und nachvollziehbar. Neubauten entstehen zudem häufig an Siedlungsrändern – hier zeigt die Methodik sehr gute Ergebnisse.

- Grundlagenkarte für weitere Themenkreise: Neben dem Oberflächenabfluss verursacht auch eindringendes Grundwasser Schäden an Gebäuden, welche nicht durch die Gefahrenkarte abgedeckt sind. Bei Oberflächenabflussmodellierungen kann die Fliessrichtung und Fliessgeschwindigkeit innerhalb der Prozessflächen ebenfalls ausgegeben werden. Dies kann einen Baustein zur Identifikation von Flächen liefern, in welchen Grundwasser verstärkt angereichert wird (stehendes Wasser an der Oberfläche).

Literatur

BEZZOLA G.R., HEGG C. (2008) *Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen*. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825.

FLUSSBAU AG SAH, GEO7 AG (2010) *Gefahrenkartierung Naturgefahren Unteres Sihltal*. Baudirektion Kanton Zürich, AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft.

GEO7 AG (2009) *Modellierung Oberflächenabfluss. Methodenevaluation*. Gebäudeversicherung Zürich. Zürich.

GEO7 AG (2010) *Oberflächenabfluss. Methodenevaluation*. Bundesamt für Umwelt. Bern.

GEO7 AG (in Vorb.) *Oberflächenabfluss. Validierung Methodik: Perimeter Heiden (AR) und Verbier (VS)*. Bundesamt für Umwelt. Bern.

LOAT R., MEIER E. (2003). *Wörterbuch Hochwasserschutz*. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern.

GEOTEST AG, SCHERRER HYDROLOGIE AG (2008). *Gesamtbericht Unwetter Lyssbach Sommer 2007 und Kartenbeilagen*. Gemeindeverband Lyssbach, Tiefbauamt des Kantons Bern, Oberingenieurkreis III, Biel.

Caractérisation du ruissellement de surface

Démarche basée sur les SIG

Olivier Monod (Sittel Consulting SA, Sion, sdis@sdingenierie.com)

Frédéric Guex, (sd ingénierie Lausanne SA, Lausanne, sdgestion@sdingenierie.com)

Problématique et objectifs

Suite aux crues de 1987 qui ont causé d'énormes dommages en Suisse, la Confédération impose aux cantons l'établissement de cartes de dangers. Ces dernières sont un outil efficace d'aménagement du territoire permettant d'abaisser la vulnérabilité des infrastructures et des activités humaines par rapport aux risques naturels. Malgré leurs qualités indéniables, ces cartes ne contiennent aucune information sur les zones exposées à des inondations par ruissellement de surface.

En juillet 2008, des précipitations extrêmes ont entraîné de nombreuses inondations sur la commune de Morrens (VD) dues à un ruissellement de surface extraordinaire. En seulement 5 heures, plus de 100mm d'eau sont tombés sur le bassin versant concerné. Ces inondations ont donné lieu à 62 déclarations de sinistres et les dégâts humains ont été évités de justesse alors que les bâtiments inondés ne se trouvaient, ou ne se seraient trouvés, sur aucune carte de danger liés aux crues établie conformément à la démarche actuellement en vigueur.

Ayant accès à de nombreuses données sur le bassin versant concerné, le bureau sd ingénierie SA a jugé opportun de tenter une modélisation hydrologique de cet événement. Cet essai a été réalisé en collaboration avec 2 étudiants de l'EPFL dans le cadre d'un « Design Project » (Florian Comment et Olivier Monod).

Objectifs du projet :

- Mettre au point une méthode pour évaluer les débits de ruissellement exploitant au mieux les possibilités offertes par les

SIG et le traitement de l'information géographique.

- Extraction des paramètres automatisée, exploitation maximale de données d'acquisition simple et peu coûteuses.
- Paramétrisation simplifiée du modèle hydrologique.
- Rapidité de mise en œuvre afin de pouvoir tester des scénarios facilement.

Le point central de la démarche repose également sur une intégration maximale du modèle hydrologique au SIG.

Le projet n'a pas consisté à évaluer des modèles hydrologiques ou à en créer un nouveau, mais à sélectionner parmi les outils existants ceux qui sont à la fois les plus pertinents et les plus adaptés dans le cadre de la pratique d'un bureau d'étude.

Modèle et outils SIG

La sélection du modèle hydrologique s'est ba-

sée sur une revue de littérature, en particulier sur l'ouvrage *Water Resources Engineering* [Mays, 2005], référence internationale en la matière. Le modèle KINEROS (*Kinematic-Wave Overland Flow Runoff Model*) a finalement été sélectionné car il est bien adapté aux événements intenses de courte durée. Il a aussi fait l'objet d'une intégration SIG particulièrement intéressante par l'Université de Tucson (Arizona) qui a développé l'outil AGWA (*Automated Geospatial Watershed Assessment tool*). AGWA permet une mise en œuvre simple et rapide de la modélisation en automatisant au maximum la paramétrisation du modèle par analyse spatiale principalement. La démarche SIG est la suivante.

Données nécessaires

KINEROS est un modèle gourmand en paramètres car il modélise de façon relativement complète le processus d'infiltration de l'eau dans le sol. Il permet également d'évaluer les volumes de sédiments arrachés à la sur-

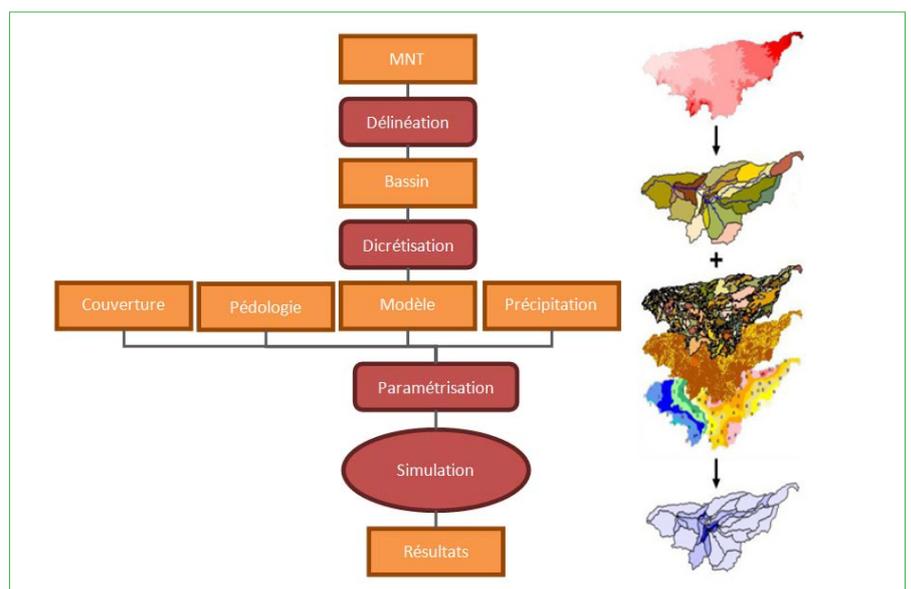


Fig. 1: processus de travail dans l'environnement SIG

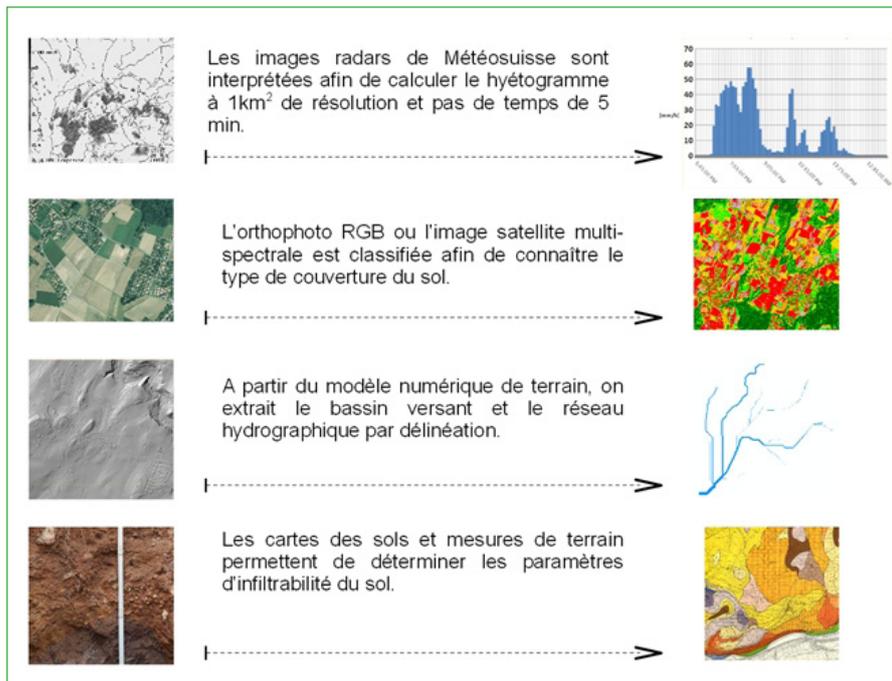


Fig. 2: extraction et pré-traitement des paramètres

face sur sol mais ce dernier aspect n'a pas été étudié ici. AGWA a été mis au point dans le contexte US où la standardisation des géodonnées environnementale est relativement avancée. Certaines adaptations des données suisses ont donc dû être réalisées. En particulier, AGWA supporte des cartes pédologiques selon la nomenclature US ou FAO ce qui demande d'adapter les données suisses. A l'exception des données pédologiques, il est facile en Suisse d'obtenir les autres données nécessaires. Dans le cas d'étude, les propriétés des sols ont été déterminées sur la base

d'analyses réalisées par les agriculteurs de la commune. Les géodonnées nécessaires à la paramétrisation sont :

- Un modèle de terrain (raster) ;
- Une carte de couverture du sol (raster) ;
- Une carte pédologique (vecteur).

Afin de déterminer les précipitations, il faut également fournir un/des hyétoigramme(s) en différents points du bassin versants qui seront interpolés. Dans le cas d'étude, la variabilité spatiale des précipitations n'a pas été consi-

dérée en raison de la faible taille du bassin versant (~1.5km²), ainsi que de la résolution des données de précipitations utilisées (images radar de météoSuisse - GSD = 1km).

Résultats

Par des traitements SIG successifs, AGWA génère le fichier de simulation requis par KINEROS. Une fois la simulation effectuée, les résultats sont importés automatiquement au sein d'une geodatabase ESRI et peuvent être consultés dans ArcGIS. Les hydrogrammes sont calculés pour les exutoires sélectionnés au début de la démarche. Sur la figure 3, les débits de pointes sont représentés par la taille du trait pour les éléments linéaires. Pour les éléments surfaciques, la couleur représente le volume ruisselé. L'hydrogramme peut être extrait à chaque point identifiant un sous-bassin versant.

La simplicité de mise en œuvre des simulations permet d'évaluer rapidement de multiples scénarios. Les essais réalisés soulèvent l'éternelle question de la sensibilité du modèle aux paramètres. En effet, certains paramètres ont un effet massif sur les débits de pointe, comme par exemple la rugosité de la surface (coefficient de Manning), ou la conductivité hydraulique (Ks) du sol.

La figure 4 illustre la grande sensibilité de la rugosité de la surface. Comme la procédure est

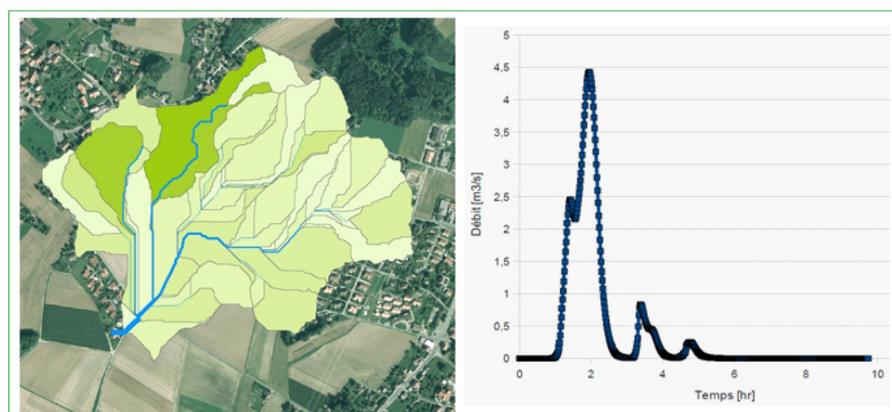


Fig. 3: illustrations du résultat

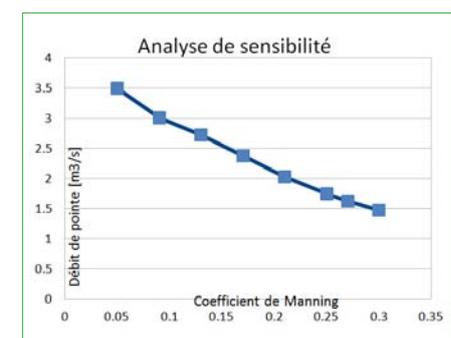


Fig. 4: analyse de sensibilité sur le coefficient de rugosité

fortement automatisée, il est possible, par exemple, d'évaluer l'effet de l'urbanisation d'un quartier sur les débits de pointe à l'exutoire. Ceci est particulièrement intéressant dans le cadre de la planification des zones à bâtir afin de limiter les mesures de protection qui seront à prendre ultérieurement.

Conclusion

Les inondations par ruissellement de surface constituent un danger naturel important en termes de risques et de potentiel de dommages, humain et matériel. Leur prise en compte dans l'établissement des cartes de danger n'est pas formellement établie, et n'est

considérée que de façon sporadique. Cet aléa n'est par conséquent pas directement considéré dans les démarches d'aménagement du territoire liées aux dangers naturels. Aucune méthode n'est à ce jour établie et éprouvée. L'approche présentée ici est intéressante par sa forte intégration SIG, les faibles ressources computationnelles requises ainsi que par l'exploitation optimale de géodonnées existantes. Les résultats permettent d'évaluer le danger d'inondation par ruissellement de surface de façon ponctuelle et est en ce sens complémentaire de l'approche classique de simulation bidimensionnelle.



Ual da Valdun (Rueun GR), Unwetter November 2002, Bild: WSL



Gerinneverlagerungen der Lanquart oberhalb von Klosters GR, Bild: Schweizer Luftwaffe